

شناسایی مناطق با انتشار گاز رادون طبیعی شهر مشهد و اجرای سیستم کاهش آلودگی آن در مقیاس سایت

حمید سرخیل^{۱*}، داریوش شیرخانی^۲، یوسف عظیمی^۳، احمد طالبی^۲

۱. دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی کاربردی

۲. دانشکده محیط زیست کرج، گروه محیط زیست انسانی

۳. پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، گروه مهندسی محیط زیست و پالایش آلاینده‌ها

دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

چکیده

انتشار طبیعی گاز رادون یک پدیده نوظهور است که شیوه زندگی مدرن آن را به یک خطر بالقوه برای انسان تبدیل کرده است. گازی است که شاخصه قابل درک فیزیکی ندارد و برای انسان قابل حس یا مشاهده نیست. بنابراین، بسیار خطرناک‌تر از سایر آلاینده‌های گازی است. این گاز طبیعی در داخل ساختمان‌ها، هم از جنبه ساختار زمینی که بر روی آن ساخته شده است و هم از نظر ترکیب مصالح ساخت، می‌تواند تجمع یابد. امروزه کشورهای توسعه‌یافته جهان اطلس‌های رادون را در مکان‌های مهم و شهرهای بزرگ خود تهیه نموده‌اند. مشهد به عنوان دومین شهر مهم کشور، یکی از توریستی‌ترین شهرهای ایران محسوب می‌شود، و دارای اهمیت دوچندانی است. در این مطالعه، با در نظر گرفتن وضعیت زمین‌شناسی آن، در کل مناطق شهری مشهد گاز رادون اندازه‌گیری شده و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS، نقشه‌های پهنه‌بندی انتشار رادون طبیعی در مقیاس‌های شهری و زمین‌شناسی تهیه شد. در ادامه، یک واحد مسکونی در یکی از مناطق بحرانی با انتشار طبیعی گاز رادون، انتخاب و یک روش اصلاحی برای کاهش رادون برای آن سازه اتخاذ شد. روش‌های اعمال شده بر روی سازه موردنظر، قادر به کاهش قابل توجه گاز رادون به میزان ۲۷ تا ۵۰ درصد بوده است. با توجه به این که انتشار طبیعی رادون از سنگ‌ها و شکستگی‌های زیرسطحی در تمام نقاط جهان وجود دارد. بنابراین شناسایی مناطق بحرانی (با انتشار طبیعی بالای رادون) می‌تواند اقدامات کنترلی ویژه‌ای را در ساختمان‌های محلی انجام دهد که خطرات این گاز طبیعی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رادون، مشهد، انتشار رادون طبیعی، زمین‌شناسی

*نویسنده مسئول: sarkheil@khu.ac.ir

Identification of natural radon gas emission zones in Mashhad and implementing its pollution reduction system at the site-scale

Hamid Sarkheil^{1*}, Dariush Shirkhani², Yousef Azimi³, Ahmad Talebi²

1. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

2. Department of Human Environment, College of Environment, Karaj, Iran.

3. Research Center of Environment and Sustainable Development, Department of Environment, Tehran, Iran.

Abstract

The natural emission of radon gas is an emerging phenomenon that modern lifestyles have turned into a potential danger to humans. It is a gas that has no physical properties that can be seen or understood by humans. Therefore, it is much more dangerous than other gaseous pollutants. This natural gas inside a building is determined by both the terrain on which it is built and the composition of its constructed materials. Today, the world's developed countries have prepared Radon atlases in their critical locations and big cities. As the second most important city in the country, the Mashhad, which is also considered one of the most touristic cities in Iran, is doubly important. In this study, first, the structural geology condition of the Mashhad in terms of Radon emission has been investigated, and then Radon has been measured. Using Arc GIS software, natural Radon emission zoning maps at urban and geological scales have been prepared. Also, a residential unit in one of the critical areas of natural Radon emission has been selected. A corrective method has been adopted to reduce Radon. The methods applied to the structure were able to significantly reduce radon gas by 27 to 50 percent. Given that natural radon emissions from subsurface rocks and fractures are present in all parts of the world. So identifying critical areas (with high radon emissions) can provide special control measures at the local and site scale buildings that reduce the risks of this natural gas.

Keywords: Radon, Mashhad, Natural Radon Emission, Geology

*Corresponding Author: sarkheil@khu.ac.ir

مقدمه

گاز رادون به عنوان محصول فرعی ساییدگی و فرسایش اورانیوم در برخی از سنگ‌ها تشکیل می‌شود (et al., 2004). رادون از مناطق زیرسطحی خاک ساطع می‌شود و بیشتر در فضاهای بسته متمرکز است (Meyer, 2019) و از آنجا که نیمه‌عمر رادون ۲۲۲ حدود ۳/۸۲ روز است (Kulal et al., 2018)، می‌تواند در ساختارهای بسته ذخیره شود و می‌تواند زمان زیادی در هوا بماند (Chilingarian et al., 2021). بنابراین، خانه‌ها و محل کار باید دارای تهویه مناسب باشند (Mainardi et al., 2018). عناصر طبیعی معمولاً عامل سه‌چهارم رادیواکتیویته در محیط هستند (Udovicic et al., 2020) و همچنین رادون فراوان‌ترین منبع رادیواکتیو طبیعی است (McGrath et al., 2020). در بخش بهداشت عمومی غلظت گاز رادون که هم در ساختمان‌ها و هم در آب آشامیدنی تجمع می‌یابد، نیاز به بررسی دارد (Alonso et al., 2019). تجزیه رادون ناشی از تشعشعات یونیزه کننده، می‌باشد. (Usikal et al., 2017). با نفوذ به ماده، معمولاً الکترون‌ها را از اتم‌های اطراف با مکانیزمی موسوم به یونیزاسیون دریافت می‌کند (Boerma, et al., 2016). فرض کنید این ماده یک ساختار بیولوژیکی با محتوای آب زیاد است. در این حالت، یونیزاسیون مولکول‌های آب می‌تواند رادیکال‌های آزاد با درجه فعالیت شیمیایی بالا تولید نماید، به طوری که مولکول‌های ضروری موجود در سلول‌های موجودات زنده را تغییر دهد (Ravanat and Douki, 2021; Blundell, 2015). از جمله تأثیرات آن ایجاد تغییرات شیمیایی در DNA می‌باشد که می‌تواند عواقب بیولوژیکی مانند رشد نامنظم سلول را در پی داشته باشد (Stanley et al., 2021; Gesell, 1983)، وابسته به میزان تابش دریافتی، این تغییرات ممکن است کم و بیش شدید باشند (Abaszadeh Fathabadi et al., 2020). جدی‌ترین خطری که رادون در فضاهای بسته ایجاد می‌کند، استنشاق آن می‌باشد (Lopes et al., 2021). از آنجا که حداکثر غلظت رادون در حالی که دست می‌آید که فضای مورد نظر فاقد تهویه هوا باشد (به عنوان مثال، وقتی همه پنجره‌ها و اتصالات بسته می‌باشند)، اندازه‌گیری‌های انجام شده در این مدت می‌بایست از مقدار متوسط سالانه رادون بیشتر در نظر گرفته شود (Ahmad et al., 2021). زمین مهم‌ترین منبع رادون در سازه‌های جداشده یا در طبقه همکف ساختمان‌ها است. غلظت گاز رادون در زمین بین ۱۰ تا ۵۰ بکرل بر مترمکعب متغیر است، با مقادیر بسیار بالاتر ممکن است. مقدار متوسط تقریباً به ۴۰ بکرل بر مترمکعب برسد (et Fard, 2021). سطح رادون که از زمین به ساختمان می‌رسد، عمدتاً با مقدار رادیوم ۲۲۶ موجود در زیر خاک و نفوذپذیری خاک محل تعیین می‌شود (Maestre et al., 2021). بسیاری از کشورها دارای نمودارهای پیش‌بینی کننده محتوای رادون هستند که در درجه اول نمایانگر ترکیب آذرین سنگ یا خاک است (Bochicchio et al., 2014; Spengler and Adamkiewicz, 2009). به عنوان نمونه، کشور سوئد نقشه‌هایی را با محاسبه پتانسیل ژئوژنیک رادون تولید نموده است، که سطح خطر را بر اساس منطقه و همچنین غلظت رادون در عمق ۱ متری زمین، مطالعات میدانی رادون در سنگ‌ها، خاک‌ها و آب مشخص می‌سازد. به عنوان مثال دیگر، در کشور فرانسه، نقشه ملی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و میزان متوسط اورانیوم در هر واحد زمین‌شناسی ایجاد شده است (Kemski et al., Bard, 2017). در چنین مواردی روش‌های گوناگونی ارائه خواهند شد که به منظور شناسایی خطرات و تجزیه و تحلیل ریسک بوده و بر شاخص‌های ایمنی متمرکز می‌باشند (Sarkheil and Tavakoli, 2015; Sarkheil and Rahbari, 2016; Sarkheil et al., 2016). و همچنین بر شاخص‌ها و جنبه‌های بهداشتی و زیست‌محیطی تاکید دارند (Gorbanzadeh et al., 2015; Sarkheil et al., 2016; Sarkheil et al., 2020; Sarkheil, 2021; et al., 2016). به طوری که با بهره‌گیری از آنها، خطر ناشی از انتشار رادون طبیعی و همچنین افزایش غلظت آن، کاهش خواهد داشت.

به گونه‌ای که عدم رعایت درست اصول و استانداردها در این سه حوزه بهداشت، ایمنی و محیط زیستی می‌تواند، آسیب‌های جبران‌ناپذیری از جمله آلودگی هوا، آلودگی خاک و آلودگی آب را برای انسان و اکوسیستم‌های طبیعی به همراه داشته باشد (Sarkheil et al., 2019).

در این تحقیق به دلیل نقش حیاتی گاز رادون در تأثیر بر سلامتی جامعه، میزان انتشار گاز طبیعی رادون از سازندهای مختلف زمین‌شناسی و تجمع در اماکن مسکونی و تجاری شهر مشهد، مورد بررسی و اندازه‌گیری میدانی قرار گرفت. و در ادامه پس از تعیین مناطق بحرانی شهری و اولویت‌بندی آنها، یک سازه در یکی از مناطق بحرانی انتخاب شد و پس از اندازه‌گیری میزان تجمع گاز رادون در بخش‌های مختلف آن سازه، روش‌های کاهش‌دهنده انتشار و تجمع گاز طبیعی رادون در آن اعمال شد و تأثیر آن در میزان غلظت رادون مورد بررسی قرار گرفته است.

روش مطالعه:

جمع‌آوری داده‌های انتشار گاز رادون طبیعی در مشهد

در این تحقیق به دلیل اهمیت شهر مشهد و موقعیت مذهبی، اجتماعی و اقتصادی آن در ایران، بررسی میزان انتشار طبیعی گاز رادون در شهر مشهد طراحی و انجام گردید. جمع‌آوری داده‌ها در طول سه ماه و در پاییز انجام شد. داده‌ها از مکان‌های بسته گرفته شدند، شرایط دما و رطوبت در زمان برداشت داده‌ها کنترل شد به طوری که این شرایط ثابت و یکسان بود. دما بین ۱۲ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد و درجه رطوبت به دلیل آب و هوای مشهد بسیار کم و در محدوده ۱۰ تا ۱۷ درصد بود. برداشت‌ها به گونه‌ای طراحی شد که از هر ۱۵۷ محله موجود در مشهد، حداقل یک داده برداشت گردید. در مجموع برای ۱۳۴ محله با اهمیت، تعداد ۲ داده برداشت شد و در این محله‌ها با توجه به استاندارد موجود و درباره دقت $\pm 5\%$ ، بحرانی‌ترین یا بیشترین آن در نظر گرفته شد. به گونه‌ای که اگر اختلاف داده‌ها زیر ۵ درصد بود، داده با میزان رادون اندازه‌گیری شده بیشتر، لحاظ شد (لازم به توضیح است که در این مطالعه داده برداشت‌شده تکراری با اختلاف بیش از ۵ درصد توسط دستگاه مشاهده نگردید). تمامی داده‌ها از زیرزمین واحدهای مسکونی، تجاری یا اداری واقع در نقاط مختلف مشهد جمع‌آوری شد. برخی از این زیرزمین‌ها مربوط به پارکینگ‌های موجود و برخی درون ساختمان‌ها بود. در این مطالعه سعی شده است که از مکان‌های عمومی نیز نمونه گرفته شود تا مکان‌هایی که مردم ناگزیر در آن حضور دارند و کنترل اوضاع در دست آن‌ها نیست، نیز مورد بررسی قرار گیرد. مکان‌های اطراف فلکه آب و زیرگذرهای آن چندین بار اندازه‌گیری صورت پذیرفت و بحرانی‌ترین آن‌ها در نظر گرفته شد. مقدار رادون با استفاده از دستگاه KATA Radon-Box/10 با دقت $\pm 5\%$ در شرایط استاندارد ۲۰ درجه سانتی‌گراد، اندازه‌گیری گردید، دستگاه در زمان برداشت داده‌ها دارای گواهی‌نامه کالیبراسیون از شرکت STUK فنلاند بوده است. میزان رادون اندازه‌گیری شده با واحد بکرل بر مترمکعب (Bq/m^3) نشان داده شده است.

در ادامه نقشه‌های پهنه‌بندی توزیع رادون برای مناطق مختلف شهر مشهد و مناطق شهری با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS و ابزار تجزیه و تحلیل زمین‌آمار تهیه شد. روش پهنه‌بندی به این صورت است که ابتدا نقشه زمین‌شناسی مشهد و نقشه شهری آن بارگذاری گردید. سپس با استفاده از ابزار تحلیل زمین‌آمار، پهنه‌بندی مورد نظر با روش درون‌یابی انتخاب‌شده انجام شد. از چهار روش درون‌یابی مانند Areal, IDW, Kriging و Co-Kriging برای مدل‌سازی تغییرات فضایی استفاده شد.

درون یابی ناحیه‌ای یا Areal، در این روش مدل بر اساس نقاط همسایه برازش داده شده و پهنه‌بندی، تولید می‌شود. در این روش پنجره‌هایی در اطراف نقطه مورد نظر تعریف می‌شود و نقاطی که در آن منطقه قرار می‌گیرند در برازش مدل مربوطه شرکت می‌کنند، قبل از استفاده از این مدل‌ها باید توپولوژی بین نقاط تعیین شده باشد. (Johnson and Wichern, 2002)

درون‌یابی IDW، این روش بر این فرض استوار است که تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش مسافت کاهش می‌یابد. به بیانی دیگر پدیده پیوسته در نقاط اندازه‌گیری نشده، بیشتری شباهت را به نزدیکترین نقاط برداشت شده دارد، لذا برای تخمین نقاط مجهول، نمونه‌های اطراف باید مشارکت بیشتری نسبت به آنهایی که در فاصله دورتر قرار دارند، داشته باشند. در این مدل از فاصله، به عنوان وزن متغیر معلوم در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود. زیرا نقش متغیر پیوسته در تأثیرگذاری با فاصله از مکان نقطه مجهول کاهش می‌یابد. بنابراین هر چه فاصله داده معلوم از نقطه مجهول افزایش می‌یابد، لازم است وزن‌ها بر اساس فاصله کاهش یابد، بنابراین فاصله‌ها معکوس می‌شود به بیان دیگر از معکوس فاصله به عنوان وزن نقاط اندازه‌گیری شده در پیش‌بینی نقاط مجهول استفاده می‌شود. (Burrough and McDonnell, 2000)

درون‌یابی Kriging، مهمترین و گسترده‌ترین روش درون‌یابی است، که برپایه مدل‌ها و روابط آماری پایه‌ریزی شده است. لایه رستری تولید شده از این روش، سطحی بسیار دقیق را نمایش می‌دهد. این روش معمولاً بهترین و دقیق‌ترین خروجی را تولید می‌کند. متداول‌ترین مدل‌ها در این روش، مدل خطی و کروی می‌باشند. در این روش وزن‌های بهینه برای درون‌یابی از طریق وریوگرام محاسبه می‌شوند (Demšar and Skeppström, 2005).

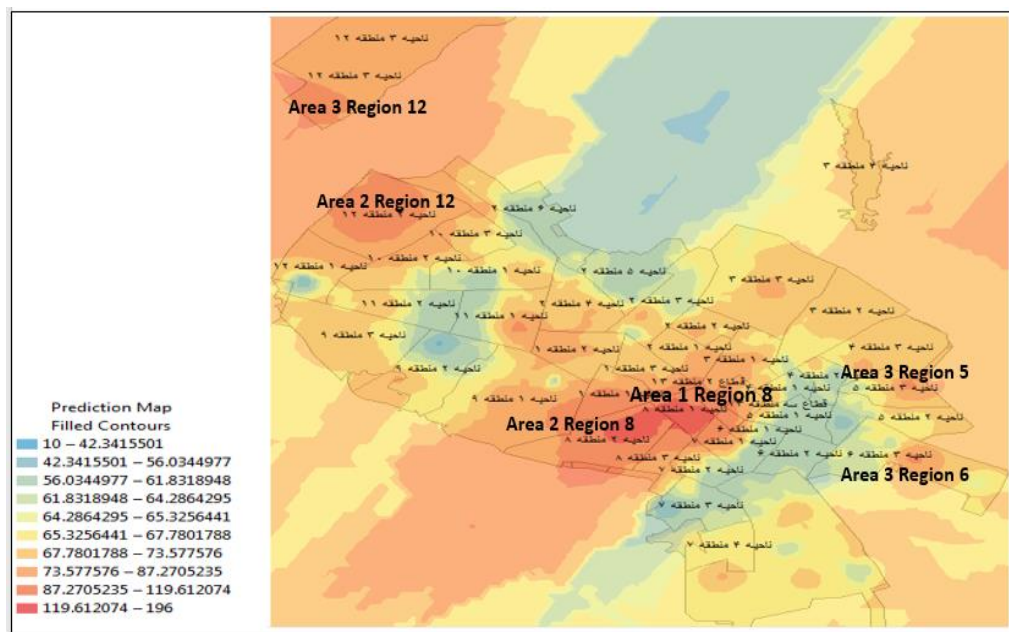
درون‌یابی Co-Kriging، مشابه روش درون‌یابی Kriging می‌باشد، ولی یک حالت چند متغیره می‌باشد، که بر اساس همبستگی موجود بین متغیر اصلی و سایر متغیرهای اندازه‌گیری شده می‌باشد، که در اصطلاح متغیر کمکی یا ثانویه نامیده می‌شوند و به تخمین متغیر مورد نظر می‌پردازد (Demšar and Skeppström, 2005).

در این تحقیق مدل به دست آمده با روش کریجینگ (Kriging)، با توجه به خطای میانگین کمتر (حدود ۴/۹۳ درصد) و تطبیق بیشتر با داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی مرتبط با محدوده مطالعاتی، به عنوان مدل درون‌یابی مناسب انتخاب شد.

جدول ۱: مقایسه روش‌های درون‌یابی برای پهنه‌بندی رادون در مقیاس شهری اندازه‌گیری شده

Table 1: Comparison of interpolation methods for radon zoning at urban scale

روش درون‌یابی	تعداد نمونه‌ها	RMSE (%)	Average Error (%)
Areal	۱۵۷	۳۲/۵۰	۱۴/۳۹
IDW	۱۵۷	۴۸/۴۱	۱۰/۲۱
Kriging	۱۵۷	۴۲/۶۲	۴/۹۳
CO-Kriging	۱۵۷	۳۸/۹۲	۶/۷۸



شکل ۱: نقشه رادون خیزی طبیعی مشهد با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ
Figure 1 Radon zoning of Mashhad by the Kriging interpolation method

اندازه‌گیری و پیاده‌سازی روش‌های کاهنده گاز رادون در یک واحد مسکونی منتخب

در یکی از محدوده‌های دارای اولویت، یک واحد مسکونی بیست و چهار ساله با مساحت کل ۲۲۴ مترمربع و زیربنای ۱۷۸ مترمربع انتخاب شد که در یک طبقه با زیرزمین و سقف شیروانی اجرا شده بود. برای ساخت این ساختمان از مصالح و بتن دستی استفاده شده است. قاب پنجره‌های این واحد مسکونی از فلز ساخته شده و از شیشه‌های تک‌جداره برای درب‌ها و پنجره‌ها تشکیل شده بود. این واحد مسکونی در منطقه کوه سنگی، خیابان ۲۰ کوه سنگی، شماره B (واقع در قسمت جنوبی مشهد-منطقه‌ای با آلودگی زیاد رادون و بافت فرسوده) واقع شده است و در زمان انجام این تحقیق، چهار نفر در آن زندگی می‌کردند. در این تحقیق مقادیر رادون طبیعی منتظر شده در ده نقطه از این واحد مسکونی، توسط دستگاه Radon Box-10 اندازه‌گیری گردید.

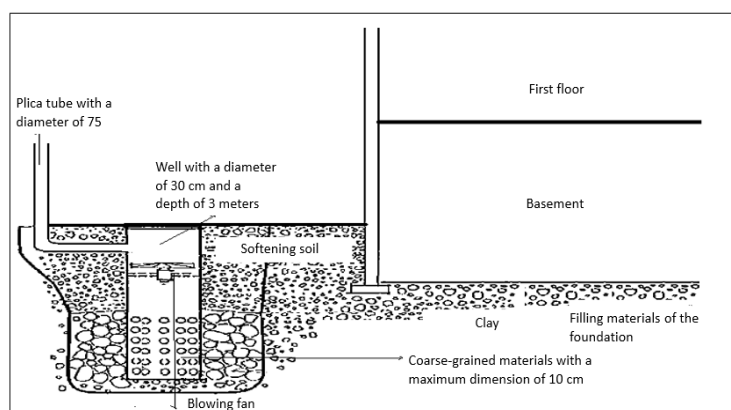
معمولاً چهار روش برای کاهش غلظت رادون در ساختمان‌ها پیشنهاد می‌شود:

- هوای مملو از گاز رادون محبوس شده را تهویه کنید.
- ورودی گاز رادون به فضای بسته ساختمان را کاهش دهید.
- منابع انتشار گاز رادون بایستی تغییر نماید.
- رادون و مشتقات آن باید به نحوی از محیط حذف شوند.

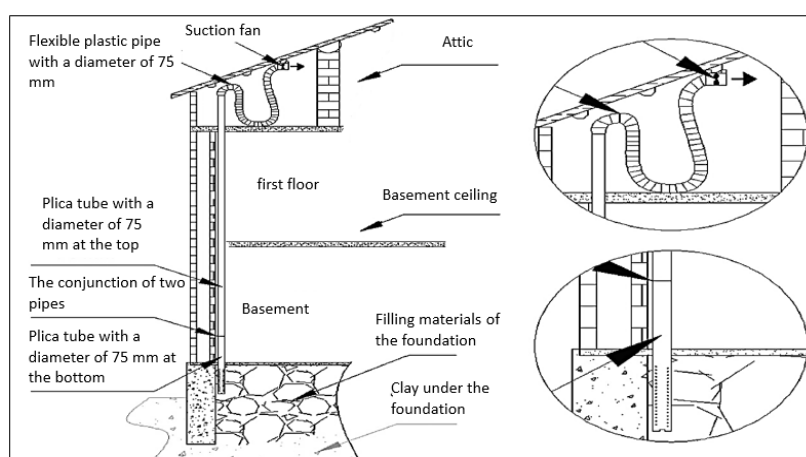
روش‌های تهویه باعث خروج هوای مملو از گاز رادون می‌شود و با ورود به هوای بیرون، از تجمع گاز رادون جلوگیری می‌شود. کیفیت دیوارها و کف نیز نقش مهمی در جلوگیری از ورود گاز رادون دارد به‌گونه‌ای که بستن ترک‌ها و سوراخ‌های کف و دیواره‌ها می‌تواند در حذف تدریجی گاز رادون از محیط محبوس بسیار مؤثر باشد. علاوه بر آن، می‌توان هوای داخل خانه را از مسیر نوعی فیلتر عبور داد، تا گاز رادون و مشتقات آن توسط فیلتر مزبور جذب شده و از هوای داخل خارج شوند.

بحث

پس از اندازه‌گیری مقادیر رادون خیزی در سازه منتخب، به منظور حذف بخشی از گاز رادون موجود در سازه، با استفاده از روش‌های کاهش فشار هوا در زیر دال، روش حفاری چاه جذب رادون (شکل ۲) و سیستم فن کشنده (شکل ۳ و شکل ۱ بخش ضمیمه) و ترمیم ترک‌های بدنه و فونداسیون در زیرزمین اقدام صورت پذیرفت. در ادامه به منظور بهبود کارایی سیستم، تمام شکاف‌های کف، دیوارها و گوشه اتاق‌ها و زیرزمین‌ها شناسایی و با چسب بتن با استحکام کششی و خمشی بالا ترمیم شد. مجدد پس از نصب این روش‌های مهندسی و لایه‌های حفاظتی، مقادیر رادون طبیعی در بخش‌های مختلف واحد مسکونی برحسب بکرل بر مترمکعب مطابق جدول شماره ۲، اندازه‌گیری گردید.



شکل ۲: طرح شماتیک اتخاذ روش دفع رادون در یک واحد مسکونی (حفر چاه، لوله‌کشی و مکندگی درون چاه)
Figure 2 Schematic plan of adopting the Radon disposal method in a residential unit
(Drilling a well, plumbing and sucker inside the well)



شکل ۳: طرح شماتیک اتخاذ روش دفع رادون با روش فن کشنده در یک واحد مسکونی
Figure 2 Schematic plan of adopting the Radon disposal suction fan method in a residential unit

جدول ۲: اندازه‌گیری مقادیر رادون طبیعی در بخش‌های مختلف واحد مسکونی بر حسب بکرل بر مترمکعب
Table 2: Natural Radon measured values in different parts of the residential unit Bq/m³

موقعیت نمونه‌گیری	کف	مقادیر اولیه	۱۲ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده	۲۴ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده	۳۶ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده	۴۸ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده
راهرو	زیرزمین	۱۲۷	۱۱۹	۱۱۲	۱۰۸	۱۰۱
سرویس بهداشتی شماره ۲	زیرزمین	۲۱۹	۱۸۹	۱۶۸	۱۳۹	۱۱۲
اتاق اصلی	زیرزمین	۱۷۹	۱۶۷	۱۵۹	۱۴۶	۱۳۲
اتاق نشیمن	طبقه اول	۱۶۸	۱۵۳	۱۴۹	۱۳۵	۱۲۱
آشپزخانه	طبقه اول	۱۵۶	۱۴۷	۱۳۸	۱۲۷	۱۱۳
اتاق زیر شیروانی	طبقه اول	۸۶	۸۵	۸۳	۸۲	۷۹
اتاق خواب	طبقه اول	۱۱۹	۱۱۳	۱۰۶	۱۰۰	۹۷
اتاق کودک	طبقه اول	۱۳۸	۱۲۴	۱۱۹	۱۱۵	۱۱۰
سرویس بهداشتی شماره ۱	طبقه اول	۱۶۳	۱۵۷	۱۳۸	۱۲۱	۱۱۹
اتاق میهمان	طبقه اول	۱۱۴	۱۱۰	۱۰۸	۱۰۵	۹۸
میانگین	هر دو (زیرزمین و طبقه اول)	۱۴۶/۹	۱۳۶/۴	۱۲۸	۱۱۷/۸	۱۰۸/۲

همان‌گونه که می‌توان از مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول شماره ۲ استنباط نمود، میانگین مقادیر ثبت‌شده اولیه برای ارزیابی عملکرد سیستم برابر با ۱۴۶/۹ بکرل بر مترمکعب می‌باشد، به طوری که هر ۱۲ ساعت پس از نصب سیستم و لایه‌های حفاظتی، مقادیر رادون اندازه‌گیری شده، کاهش یافته است. با توجه به اطلاعات جدول ۳ مشخص می‌شود که چگونه راندمان سیستم افزایش یافته و در عرض ۴۸ ساعت، راندمان سیستم ۲۸ درصد رشد داشته است، یعنی پس از ۴۸ ساعت، میزان رادون به ۷۲ درصد مقدار اولیه خود، رسیده است. انتظار می‌رود این مقدار در بلندمدت تا ۵۰ درصد نیز افزایش یابد، و پس‌از آن ثابت بماند.

جدول ۳: مقادیر رادون اندازه‌گیری شده و افزایش درصد راندمان سیستم در طول زمان

Table 3 Measured Radon values and increase in system efficiency percentage over time

مقادیر اولیه	۱۲ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده	۲۴ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده	۳۶ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده	۴۸ ساعت پس از نصب سیستم کاهنده	
۱۴۶/۹	۱۳۶/۴	۱۲۸	۱۱۷/۸	۱۰۸/۲	مقدار رادون
۱	۰/۹۲۸۵۲	۰/۸۷۱۳۴	۰/۸۰۱۹۱	۰/۷۳۶۵۶	نسبت کاهش یافته
صفر	۷/۱۴۷۷۲	۱۲/۸۶۵۲	۱۹/۸۰۹۴	۲۶/۳۴۴۵	کارایی سیستم (درصد)

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت رادون خیزی طبیعی در مناطق شهری به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناختی و ساختاری زیرسطحی آن، و همچنین تاثیر میزان گاز رادون برای سلامت شهروندان، در این مطالعه، کلان‌شهر مشهد محله به محله برای بررسی میزان گاز رادون در فضاهای بسته مورداندازه‌گیری و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی‌ها با روش‌های زمین‌آماري بررسی شد و پهنه‌بندی غلظت آلاینده‌گی این گاز خطرناک در محیط نرم‌افزارهای Arc GIS مدل گردید. نتایج نشان می‌دهد که مناطق داخلی و پرجمعیت شهر مشهد، با انتشار و افزایش غلظت این گاز طبیعی مواجه هستند که این خود لزوم رعایت مقررات ساختمانی ویژه‌ای را مورد تأکید قرار می‌دهد. در ادامه تحقیق در یکی از مناطق با آلودگی بالا، یعنی منطقه کوه سنگی مشهد در مقیاس سایت، در یک ساختمان مسکونی میزان انتشار گاز رادون در ده نقطه اندازه‌گیری شد و به منظور کاهش مقادیر غلظت رادون در این واحد مسکونی، از روش کاهش فشار زیر دال به همراه دو روش کمکی دیگر استفاده شد. به دلیل تجمع رادون در سطوح پایین و تهویه نامناسب در زیرزمین، مقادیر ثبت شده در این مناطق بیشتر از مقادیر ثبت شده در طبقه اول بود. همچنین در زیرزمین، حمام و اتاق خواب که فاقد پنجره بود، بیشترین مقدار رادون اندازه‌گیری و ثبت گردید. میانگین مقادیر اولیه ثبت شده معادل ۱۴۶/۹ بکرل بر مترمکعب بود که هر ۱۲ ساعت پس از نصب سیستم مقدار رادون کاهش یافت. پس از ۴۸ ساعت از نصب سیستم‌های کاهش دهنده گاز رادون، مقدار کاهش گاز رادون به ۷۲ درصد مقدار اولیه اش رسید. که این خود نشان از کارایی سیستم‌های کاهنده استفاده شده در ساختمان منتخب را دارد. با توجه به این‌که اندازه‌گیری‌ها در پاییز انجام شده است، به احتمال زیاد سطح رادون در زمستان به دلیل استفاده از وسایل گرمایشی و عایق‌بندی درها و پنجره‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه تهویه طبیعی کاهش می‌یابد. در صورتی که ساکنان چنین مناطق و ساختمان‌هایی، سیستم اصلاحی کاهش دهنده گاز رادون متناسب را نصب نکنند، احتمالاً در خطر جدی خواهند بود. بنابراین این پیشنهاد وجود دارد که، با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت رادون شهری انتشار یافته در مناطق مختلف الزامات ساخت و ساز متناسب با استانداردها، در این مناطق اعمال شود و همچنین ایجاد فضاهای سبز شهری در مناطق آلوده شهری، همانند یک کمربند سبز می‌تواند از میزان تراکم این گاز های آلاینده و خطرناک بکاهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت معنوی دانشکده محیط زیست کرج در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی کنند. نویسندگان هیچ منافع مالی یا غیرمالی مرتبطی برای افشاء ندارند و همچنین نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافی مرتبط با محتوای این مقاله ندارند.

منابع

1. Abaszadeh Fathabadi Z., Ehrampoush M. H., Mirzaei M., Mokhtari M., Nadi Sakhvidi M., Rahimdel A., Dehghani Tafti A., "The Relationship of Indoor Radon Gas Concentration with Multiple Sclerosis: A Case-Control Study." *Environmental Science and Pollution Research* 27 (14) (2020) 16350–61. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08147-y>.
2. Ahmad N., Khan I. U., Rehman J. U., Nasir T., "Journal of radiation research, and undefined 2017. n.d. "An Overview of Radon Concentration in Malaysia." Elsevier, (2021).
3. Alonso H., Rubiano J. G., Guerra J. G., Arnedo M. A., Tejera A., Martel P., "Assessment of Radon Risk Areas in the Eastern Canary Islands Using Soil Radon Gas Concentration and Gas Permeability of Soils." *Science of the Total Environment*, 664 (2019) 449–60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.411>.
4. Bard D., "Commentaries." *Environment, Risques et Sante*. John Libbey Eurotext. (2017). <https://doi.org/10.3390/ijerph14040344>.
5. Blundell M., "Naturally Occurring Radioactive Materials." In *Proceedings of the American Gas Association, Operating Section*, 1:490–502. American Gas Association. (2015). <https://doi.org/10.1201/9780203746042>.
6. Bochicchio F. Z. S., Zunic C., Carpentieri S., Antignani G., Venoso V., Carelli C., Cordedda N., Veselinović T., Tollefsen Bossew P., "Radon in Indoor Air of Primary Schools: A Systematic Survey to Evaluate Factors Affecting Radon Concentration Levels and Their Variability." *Indoor Air* 24 (3) (2014) 315–26. <https://doi.org/10.1111/ina.12073>.
7. Boerma M., Vijayalakshmi S., Xiao W. M., Nelson Gregory A., Cheema Amrita K., Koturbash Igor, Singh Sharda P., Tackett Alan J., Hauer-Jensen M., "Effects of Ionizing Radiation on the Heart." *Mutation Research - Reviews in Mutation Research* 770 (2016) 319–27. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.07.003>.
8. Burrough P. A., McDonnell R. A., "Principles of geographical information systems". United States: Oxford University Press; (2000). 333 pp.
9. Chilingarian A., Hovsepyan, G., Sargsyan B., "Circulation of Radon Progeny in the Terrestrial Atmosphere During Thunderstorms." *Geophysical Research Letters*. Blackwell Publishing Ltd. (2021). <https://doi.org/10.1029/2020GL091155>.

10. Demšar U., Skeppström K., "Use of GIS and 3D visualisation to investigate radon problem in groundwater". 10th Scandinavian research conference on geographical information sciences, Scangis. Stockholm, Sweden: Universitets- Service AB; (2005) 39–51.
11. Fard Z. D., Rahimi M., Malakootian M., Javid, N., "Studying Radon Concentration in Drinking Water Resources in Zarand City (Iran) and Its Villages." *Journal of Radio analytical*, (2021). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-020-07349-5>.
12. Gesell Thomas F., "Background Atmospheric ²²²Rn Concentrations Outdoors and Indoors: A Review". *Health Physics* 45 (2), (1983) 289–302. <https://doi.org/10.1097/00004032-198308000-00002>.
13. Ghorbanzade T., Sarkheil H., Ramezani R., "Analysis of Occupational Hazardous Causes: Ergonomics, Thermal Stress, Noise and Vibration; Provision of HSE_MS Improvement Resolutions for Refinery A of Assaluyeh, Iran". *Journal of Applied Environment Biological Sciences*. 5, 8, (2015) 291 – 297.
14. Johnson R., Wichern D., "Applied multivariate statistical analysis". New Jersey: Prentice Hall; (2002). 767 pp.
15. Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M., "Mapping the Geogenic Radon Potential in Germany." In *Science of the Total Environment*, 272 (2001) 217–30. *Sci Total Environ*. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00696-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00696-9).
16. Kulal F., İskender A., Nevzat Ö., Mehmet S., "The Correlation of the Seismic Activities and Radon Concentration in Soil Gas." *Arabian Journal of Geosciences* 11 (16), (2018). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3743-8>.
17. Lopes S. I., Silva J., Antão A., Curado A., " Short-Term Characterization of the Indoor Air Radon Concentration in a XII Century Monastery Converted into a School Building." *Energy Procedia*, (2021).
18. Maestre C. R., Echarri Iribarren V., "The Radon Gas in Underground Buildings in Clay Soils. The Plaza Balmis Shelter as a Paradigm." *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, (2018) 1004, doi: 10.3390/ijerph15051004.
19. Mainardi Anne S., Redlich Carrie A., "Indoor Air Quality Problems at Home, School, and Work." *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 198 (1). (2018). <https://doi.org/10.1164/rccm.1981P1>.
20. McGrath James A., Byrne Miriam A., "An Approach to Predicting Indoor Radon Concentration Based on Depressurisation Measurements." *Indoor and Built Environment*. (2020) <https://doi.org/10.1177/1420326X20924747>.
21. Meyer W., "Impact of Constructional Energy-Saving Measures on Radon Levels Indoors." *Indoor Air*, 29 (4), (2019) 680–85. <https://doi.org/10.1111/ina.12553>.

22. Przylibski, T. A., Kalina M. C., Monika K., Jerzy D., Beata K., "Radon Concentrations in Groundwaters of the Polish Part of the Sudety Mountains (SW Poland)." *Journal of nvironmental Radioactivity*, 75 (2), (2004) 193–209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.12.004>.
23. Ravanat J. L., Douki T., "UV and Ionizing Radiations Induced DNA Damage, Differences and Similarities." *Radiation Physics and Chemistry*, (2021). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X1630216X>.
24. Sarkheil H., Rahbari S., "HSE key performance indicators in HSE_MS establishment and sustainability: a case of south pars gas complex, Iran". *International Journal of Occupational Hygiene*. 8 (1) (2016) 52–60.
25. Sarkheil H., Rahbari S., "Development of case historical logical air quality indices via fuzzy mathematics (Mamdani and Takagi–Sugeno systems), a case study for Shahre Rey Town". *Environmental Earth Sciences*. 75, (2016) 1319. DOI: 10.1007/s12665-016-6131-2
26. Sarkheil H., Tavakoli J., "Oil-Polluted Water Treatment Using Nano Size Bagasse Optimized-Isotherm Study". *European Online Journal of Natural and Social Sciences*. 4, 2, (2015) 392–400.
27. Sarkheil H., Alavi-Tabar A., Fard, P.S., "An Innovative Method for Identifying and Detecting Factors and indication of Fraud Occurrences in Health, Safety and Environmental Management System Audits". *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention*. 7, 2, (2019) 95-105. (In Persian with English abstract).
28. Sarkheil H., Tavakoli J., Rezvani S., "An innovative neglected invisible hazard identification (NIHI) at workplaces; the case of athletics Hall boroujen-Iran". *International Journal of Occupational Hygiene*. 7, (2015) 159-166.
29. Sarkheil H., Tavakoli J., Rezvani S., "Inherent safety process assessment in the initial phase of the chemical design process: the case of acetic acid production process", *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention* 4 (1) (2016) 207–212.
30. Sarkheil H., Tahery B., Rayegani B., Ramezani J., Goshtasb H., Jahani A., "Evaluating the current status of the national health, safety, and environment management system for integration, harmonization, and standardization of environmental protection", *Health Risk Analysis* 1, (2020), 18–24, <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.1.02.eng>.
31. Sarkheil H., "Risk and incident analysis on key safety performance indicators and anomalies feedback in south pars gas complex, Results in Engineering". *Results in Engineering* 9 (2021) 100210, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100210>
32. Spengler J., Adamkiewicz G., "Indoor Air Pollution: An Old Problem with New Challenges". (2009). <https://www.mdpi.com/1660-4601/6/11/2880>.
33. Stanley F. K. T., Zarezadeh S., Dumais C. D., Dumais K., "Comprehensive Survey of Household Radon Gas Levels and Risk Factors in Southern Alberta". *Ncbi.Nlm.Nih.Gov*. 10, (2021).

34. Udovicic V., Veselinovic N., Maletic D., Banjanac R., "Radon Variability Due to Floor Level in Two Typical Residential Buildings in Serbia." III International Conference Radon in the Environment, 65 (2), (2020) 121-125. <https://doi.org/10.2478/nuka-2020-0019>.
35. Usikalu M. R., Olatinwo V., Akpochafor M., Aweda M. A., Giannini G., Massimo V., "Measurement of Radon Concentration in Selected Houses in Ibadan, Nigeria." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 852. Institute of Physics Publishing, (2017). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/852/1/012028>.

ضمیمه:



شکل ۱ ضمیمه: اجرای پروژه کاهش تجمع گاز رادون، در ساختمان نمونه در منطقه کوه سنگی مشهد

**Figure 1 Appendix: Implementation of Radon gas reduction project in a sample building
in the Kohe-Sangi of Mashhad**

Identification of natural radon gas emission zones in Mashhad and implementing its pollution reduction system at the site-scale

Hamid Sarkheil^{1*}, Dariush Shirkhani², Yousef Azimi³, Ahmad Talebi²

1. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

2. Department of Human Environment, College of Environment, Karaj, Iran.

3. Research Center of Environment and Sustainable Development, Department of Environment, Tehran, Iran.

Introduction

Radon gas is formed naturally as a byproduct of fractures and rocks (Przylibski et al. 2004). Natural Radon is emitted from the subsurface and is most concentrated in pore media and enclosed spaces (Meyer 2019), so Radon 222 has a half-life of around 3.8 days (Kulal et al. 2018); it can be stored in closed spaces/structures and remain in the environment/air for many days (Chilingarian et al. 2021). So, residential rooms and workplaces must be adequately ventilated (Mainardi et al. 2018). Natural elements are responsible for 3-quarters of the radioactivity in the air (Udovicic et al. 2020). Radon has large quantities of natural radioactive sources (McGrath and Byrne 2020). So, the public health issue that its emission/concentration causes both within near-to-surface structures/buildings and drinking water necessitates consideration for measuring (Alonso et al. 2019). So, the natural emission of radon gas is an emerging phenomenon that modern lifestyles have turned into a potential danger to humans. It is a gas with no physical properties that humans can see or understand. Therefore, it is much more dangerous than other gaseous pollutants. This natural gas inside a building is determined by the terrain on which it is built and the composition of its constructed materials. Today, the world's developed countries have prepared Radon atlases in their critical locations and big cities. As the second most important city in the country, Mashhad, which is also considered one of the most touristic cities in Iran, is doubly important.

Natural Radon data collection in the case study

Data collection/measurement was performed during the three-months and in the fall. The data were taken from closed places, the temperature and humidity conditions were constant and the same in each measurements. Temperature ranges from 12-18 (C) degrees, and humidity degrees were very low due to the climate of the Mashhad region and in the range of 10-17%. There are 145 neighborhoods in the urban

scale of the Mashhad case study, and we had at least one harvest in each neighborhood. It is considered the most critical in neighborhoods where 2 or 3 harvest has taken place.

Material and methods

In this study, first, the structural geology condition of the Mashhad region in terms of Radon emission has been investigated, and then Radon has been measured. Using Arc GIS software and the geostatistical analysis tool. Kriging, co-kriging, and Areal, IDW (Zhao et al. 2019), natural Radon emission zoning maps at urban and geological scales have been prepared. Finally, a residential unit in one of the critical areas of natural Radon emission has been selected. A corrective method has been adopted to reduce Radon.

Results and discussion

Usually, four methods are suggested to reduce radon in buildings:

- Ventilate the trapped radon gas air.
- Reduce the entry of radon gas into the building space.
- The sources of radon gas emissions must be changed.
- Radon and its derivatives must be somehow removed from the environment.

Ventilation methods remove the air filled with radon gas and prevent the accumulation of radon gas by entering the outside. The quality of the walls and floor also plays an essential role in preventing the entry of radon gas, so cracks and holes in the walls can be significant in removing the external environment of radon gas from the enclosure. In addition, the indoor air can be passed through a filter so that radon gas and its derivatives are absorbed by the said filter and removed from the indoor air.

Based on the mean error values and RMSE, the kriging method was selected as the most optimal method. In this study, Radon levels were measured in 145 neighborhoods of the city. Then, Radon zoning was performed by four interpolation methods based on the measured values. As expected, the kriging method was selected as the most optimal method. The population density map of the city, the zoning map by kriging method, and the map of places and streets of the study area were used to evaluate the zoning results on an urban scale.

Conclusion

- Mashhad has areas with high radon levels naturally.
- A corrective method has been adopted to reduce Radon.

- The methods applied to the structure were able to significantly reduce radon gas by 27 to 50 percent.
- Given that natural radon emissions from subsurface rocks and fractures are present in all parts of the world. So identifying critical areas (with high radon emissions) can provide special control measures at the local and site scale buildings that reduce the risks of this natural gas.

References

1. Alonso, H., J. G. Rubiano, J. G. Guerra, M. A. Arnedo, A. Tejera, and P. Martel. "Assessment of Radon Risk Areas in the Eastern Canary Islands Using Soil Radon Gas Concentration and Gas Permeability of Soils." *Science of the Total Environment* 664 (May): 449–60, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.411>.
2. Chilingarian, A., G. Hovsepyan, and B. Sargsyan. "Circulation of Radon Progeny in the Terrestrial Atmosphere during Thunderstorms." *Geophysical Research Letters*. Blackwell Publishing Ltd. (2021). <https://doi.org/10.1029/2020GL091155>.
3. Mainardi, Anne S., and Carrie A. Redlich "Indoor Air Quality Problems at Home, School, and Work." *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 198 (1). (2018). <https://doi.org/10.1164/rccm.1981P1>.
4. McGrath, James A., and Miriam A. Byrne. "An Approach to Predicting Indoor Radon Concentration Based on Depressurisation Measurements." *Indoor and Built Environment* (2020). <https://doi.org/10.1177/1420326X20924747>.
5. Meyer, Winfried. "Impact of Constructional Energy-Saving Measures on Radon Levels Indoors." *Indoor Air* 29 (4): 680–85 .9 (2019). <https://doi.org/10.1111/ina.12553>.
6. Kulalı, Feride, İskender Akkurt, Nevzat Özgür, and Mehmet Sezer "The Correlation of the Seismic Activities and Radon Concentration in Soil Gas." *Arabian Journal of Geosciences* 11 (16) (2018). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3743-8>.
7. Przylibski, Tadeusz Andrzej, Kalina Mamont-Cieśla, Monika Kusyk, Jerzy Dorda, and Beata Kozłowska. "Radon Concentrations in Groundwaters of the Polish Part of the Sudety Mountains (SW Poland)." *Journal of Environmental Radioactivity* 75 (2): 193–209 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.12.004>.
8. Udovicic, V, N Veselinovic, D Maletic, R Banjanac -, and undefined. "Radon Variability Due to Floor Level in Two Typical Residential Buildings in Serbia". *Yadda.Icm.Edu.Pl.* (2020). <https://doi.org/10.2478/nuka-2020-0019>.
9. Zhao, Wenju, Taohong Cao, Zongli Li, and Jie Sheng. "Comparison of IDW, Cokriging and ARMA for Predicting Spatiotemporal Variability of Soil Salinity in a Gravel–Sand Mulched Jujube Orchard." *Environmental Monitoring and Assessment*. Springer International Publishing (2019). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7499-8>.

Keywords: Radon; Mashhad; Natural Radon Emission; Geology

*Corresponding Author: sarkheil@khu.ac.ir