مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هشتم، شماره بیست و یکم، پاییز ۱۳۹۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۳

تاریخ بازنگری نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱

صفحات: ۲۸۲ - ۲۶۷

اندازه‌گیری غلظت گاز رادون در آبهای زیرزمینی دشت جیرفت و تعیین ارتباط آن با گسل‌های منطقه

علی مهرابی[۱]*

چکیده

گاز رادون یکی از عوامل اصلی سرطان ریه محسوب می‌شود، انتشار این گاز در منابع آبی می‌تواند باعث مخاطرات زیست محیطی عمده‌ای شود. هدف از این تحقیق اندازه‌گیری غلظت گاز رادون محلول درآب‌های زیرزمینی دشت جیرفت و تعیین ارتباط آن با گسل‌های فعال در منطقه است. در این راستا ۴۰ نمونه آب از چاه‌های محدوده دشت جیرفت تهیه و با استفاده از دستگاه RAD7 غلظت گاز رادون محلول در آنها محاسبه شد. طبق نتایج بدست آمده ۶۷ درصد از چاه‌های منطقه مورد مطالعه دارای غلظت گاز رادون بیش از حد مجاز هستند. با انجام عملیات درونیابی، نقشه پهنه‌بندی میزان غلظت گاز رادون تهیه شد و منطقه مورد مطالعه به چهار کلاس بسیار بالا، بالا، متوسط وکم به لحاظ غلظت گاز رادون طبقه‌بندی شد. به طوری‌که منطقه‌ای در حدود ۵۴۰۰۰ هکتار در محدوده با غلظت بالا و خیلی بالا قرار دارد. در این بین شهر جیرفت در بخش غلظت بالای گاز رادون قرار گرفته است. جهت تعیین ارتباط بین غلظت بالای گاز رادون و گسل‌های منطقه از روش وزن‌های نشانگر استفاده شد. نتایج حاصل از این روش نشان می‌دهد که بین چاه‌های دارای غلظت بالا و خیلی بالای گاز رادون و گسل‌های اصلی منطقه ارتباط بالایی وجود داشته و به لحاظ کمی بیشترین ارتباط در فاصله ۱۰۰۰ متری از گسل‌ها به دست آمد و با فاصله گرفتن از امتداد گسل‌ها این ارتباط نیز کمتر می‌شود.

واژگان کلیدی: منابع آب، مخاطرات زیست محیطی، روش وزن‌های نشانگر، آشکارساز RAD7، جیرفت.

[۱]- استادیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان (نویسنده مسئول) Mehrabi@uk.ac.ir

مقدمه

رادون گازی است بی‌رنگ، بی‌بو و بی‌مزه که از واپاشی عنصر رادیوم که خود محصول واپاشی ۲۳۸ U است، تولید می‌شود. بر اساس مطالعات جهانی زیست‌محیطی که روی آثار زیانبار این گاز بر سلامتی انسان صورت گرفته، رادون در ردیف گازهای سرطان‌زا قرارگرفته و پس از سیگار دومین عامل اصلی سرطان ریه محسوب می‌شود (حسینی، ۱۳۹۱). منبع اصلی گاز رادون، اورانیوم موجود در خاک و سنگ است. از نظر زمین‌شناسی کانی‌های حامل اورانیوم بویژه مونازیت در سنگ‌های گرانیتی و همچنین پگماتیت‌ها، شیل‌های سیاه و سنگ‌های رسوبی غنی از فسفات از مهمترین منابع رادون در سنگ‌ها و خاک‌ها هستند(لیو و همکاران[۱]، ۲۰۱۶). در اثر واپاشی رادیوم، اتمهای رادون از دانه‌های خاک بیرون می‌آیند و به آبهای زیرزمینی یا فضاهای خالی در اطراف دانه‌های خاک منتقل می‌شوند و در نهایت به داخل هوا راه می‌یابند (آکربلوم و لندگرن[۲]، ۱۹۹۶). با توجه به اینکه آب تهیه شده برای مصارف خانگی عمدتاً از آبهای زیرزمینی تامین می‌شوند. بنابراین میزان حلالیت گاز رادون در آبهای زیرزمینی به عنوان یک پارامتر قابل توجه به حساب می‌آید و مطالعات زیادی در این زمینه به عمل آمده است (بیم[۳] و همکاران، ۲۰۱۴؛ ملکوتیان و سلمانی[۴]، ۲۰۱۵؛ ملکوتیان و سلطانی نژاد[۵]، ۲۰۱۷). گاز رادون محلول در آب از دو طریق آشامیدن آب و استنشاق گاز رادون متصاعد شده از آن در هوا (خصوصاً در فضاهای بسته) وارد بدن می‌گردد. مقادیر اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی غلظت گاز رادون آبهای زیرزمینی در نقاط مختلف جهان از ۱ تا ۱۰۰ بکرل بر لیتر متغیر است. حد مجاز تعیین شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست،۲ - ۱۱ بکرل بر لیتر است (حسینی، ۱۳۹۱).

تاکنون تحقیقاتی در مورد وجود ارتباط بین بالا بودن غلظت گاز رادون و وضعیت تکتونیکی منطقه‌های مختلف انجام گرفته است (السباق و همکاران[۶]، ۲۰۱۸؛ علی ضفر و همکاران[۷]، ۲۰۱۸) بطور مثال کندری[۸] و همکاران (۲۰۱۶) غلظت گاز رادون ۱۵ نمونه آب را در منطقه دهرادون هندکه در نزدیکی گسل فعال قرار داشت اندازه‌گیری نمودند و مقادیر ۱/۷ تا ۵۷/۷ بکرل بر لیتر را برای غلظت این گاز به دست آوردند. فنولوسا[۹] و همکاران (۲۰۱۶) غلظت گاز رادون ۱۵ چشمه آب را در جنوب کاتالونیای اسپانیا اندازه‌گیری نمودند و مقادیر غلظت گاز رادون را محدوده در ۱/۴ تا ۱۰۵ بکرل بر لیتر به دست آوردند، اسدی و همکاران[۱۰] (۲۰۱۵) غلظت گاز رادون ۳۶ نمونه از آبهای کشاورزی و منابع آب شرب را در منطقه رفسنجان و انار اندازه‌گیری نمودند و حداقل و حداکثر مقادیر غلظت گاز رادون را برای منابع آب شرب به ترتیب ۰/۳۲ و ۱۳/۹ بکرل بر لیتر و برای آب چاههای کشاورزی حداقل و حداکثر مقادیر غلظت

1 - Lio et al.
2 - Akerblom and Lindgren.
3 - Bem et al.
4 - Malakootian and Salmani
5 - Malakootian and Soltaninejad
6 - Alsabagh et al.
7 - Ali Zafar et al.
8 - Kandari et al.
9 - Fonollosa. et al.
10 - Asadi et al.

گاز رادون را به ترتیب ۳/۶۸ و ۲۴/۵۱ بکرل بر لیتر به دست آوردند. همچنین ملکوتیان و همکاران[1] (۲۰۱۴، ۲۰۱۵) در ۲ مطالعه جداگانه غلظت گاز رادون را در منابع آب شرب در دو منطقه اطراف گسل لاله‌زار و گسل رفسنجان اندازه‌گیری نموده‌اند که حداقل و حداکثر مقادیر غلظت گاز رادون محلول در آب را در اطراف گسل لاله‌زار به ترتیب ۰/۷۴ و ۲۶/۸۸ بکرل بر لیتر و در روستاهای اطراف گسل رفسنجان این مقادیر را به ترتیب صفر و ۱۸/۴۸ بکرل بر لیتر به دست آورده‌اند. کومار و همکاران[2] (۲۰۱۷) با اندازه‌گیری گاز رادون محلول در چشمه‌های ایالت کشمیر هندوستان مشخص ساختند در نزدیکی گسل‌های اصلی غلظت گاز رادون افزایش یافته است. همچنین رحیمی و همکاران (۱۳۹۶) غلظت گاز رادون محلول در آبهای زیرزمینی شهرستان زرند را اندازه‌گیری کردند، آنها حداقل و حداکثر مقادیر غلظت گاز رادون چاه‌های منطقه را به ترتیب ۴/۶۶ و ۳۱/۵۵ بکرل بر لیتر به دست آوردند.

دشت جیرفت به دلیل قرار گرفتن در کمربند رسوبی- آتشفشانی ایران مرکزی و وجود سنگ‌های آذرین مختلف در منطقه در معرض خطر غلظت بالای گاز رادون قرار دارد، همچنین تاثیر نیروهای زمین‌ساختی به صورت نیروهای کششی و فشارشی، شکستگی‌ها و گسل‌های فراوانی را در این منطقه ایجاد کرده است که از مهمترین آنها می‌توان به گسل‌های فعال سبزواران، جبال بارز، دلفارد و ده‌بکری اشاره نمود. به دلیل وجود چندین گسل‌های فعالی در این محدوده، احتمال انتشار این گاز سرطان زا به درون منابع آبی و محیط، افزایش می‌یابد. بنابراین لزوم انجام چنین مطالعه و تحقیقی در منطقه ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق ضمن اندازه‌گیری میزان غلظت گاز رادون محلول در چاه‌ها دشت جیرفت، تعیین محدوده‌های پرخطر و بررسی ارتباط کمی بین گسل‌های منطقه و افزایش غلظت گاز رادون با استفاده از روش وزن‌های نشانگر[3] است.

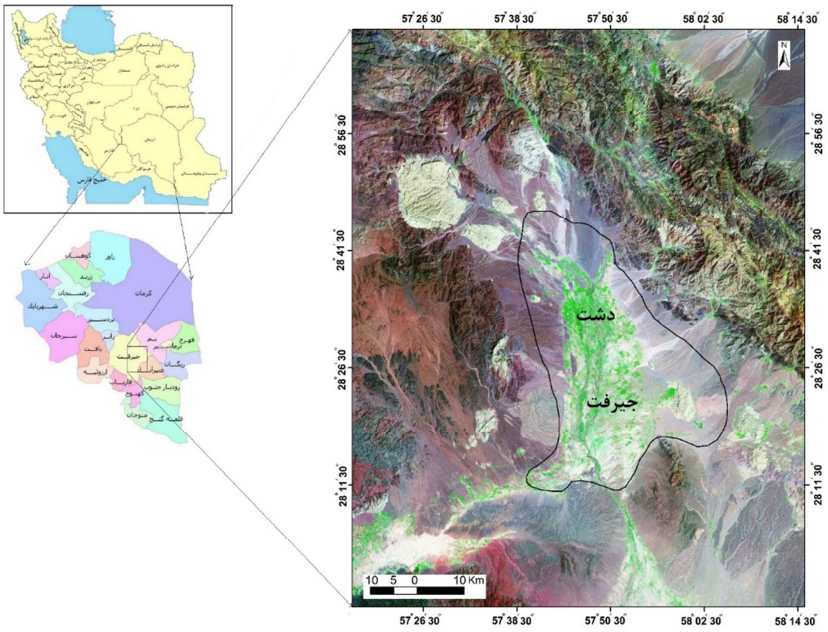
داده‌ها و روش‌ها

موقعیت و زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

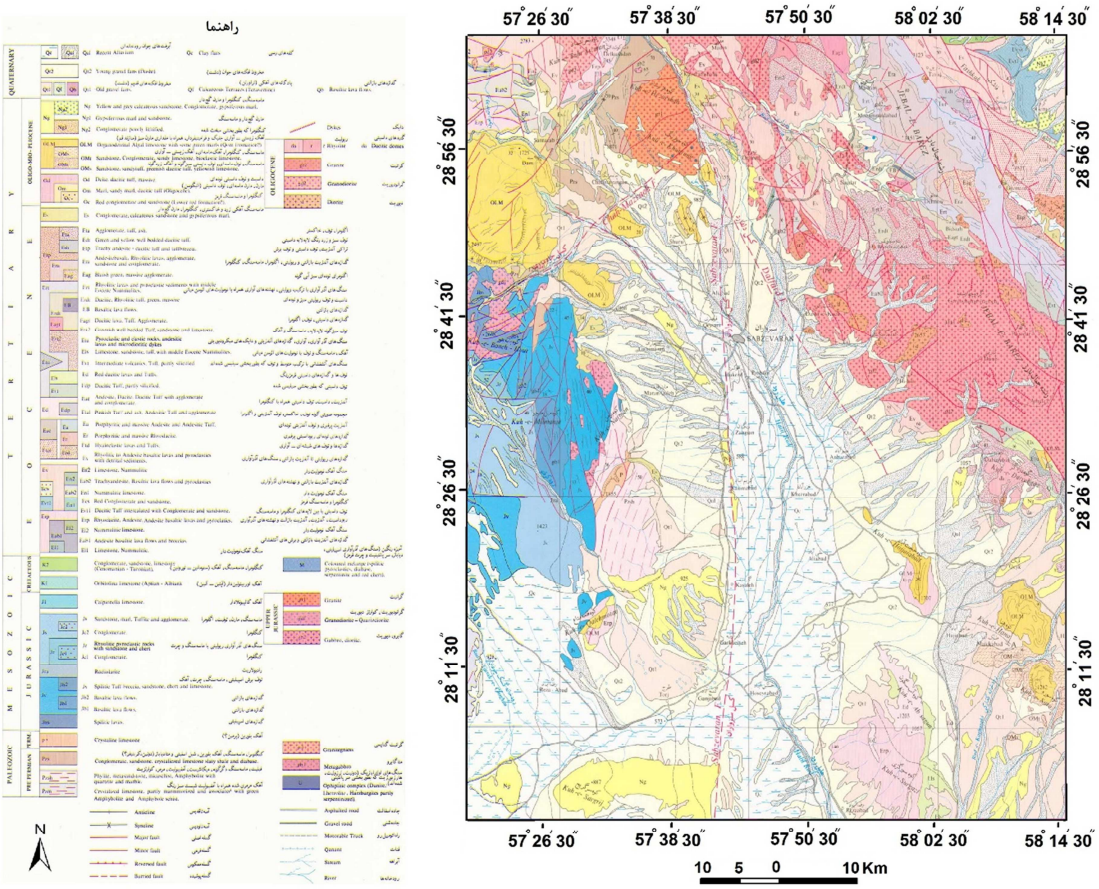
دشت جیرفت در بخش غربی حوضه جازموریان بین طول‌های جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۵ دقیقه و ۵۸ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۲ دقیقه و ۲۹ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی، در استان کرمان واقع شده است (شکل۱). این منطقه از نظر آب و هوایی جزء مناطق نیمه خشک به حساب می‌آید. حوضه آبریز دشت جیرفت به لحاظ محصور شدن توسط گسل‌های فعال تکتونیکی به صورت یک دره فروافتاده در آمده است (ریگارد[4] و همکاران، ۲۰۰۵). رسوبات آبرفتی این دره پس از فرسایش کوه‌های آتشفشانی اطراف، توسط رودخانه هلیل رود به داخل دشت هدایت و رسوبگذاری شده است. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل شماره ۲ ارائه شده است. همانطور که در این نقشه نیز مشخص است بیشتر سازندهای رخنمون یافته در محدوده مورد مطالعه از سنگ-

1 - Malakootian et al.
2 - Kumar et al.
3 -Weights of Evidence Method.
4 -Regard et al.

های آتشفشانی نظیر سنگ‌های گرانیتی، دگرگونی و مونزونیتی که از عوامل اصلی تولید گاز رادون به شمار می‌روند، تشکیل شده است.



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه

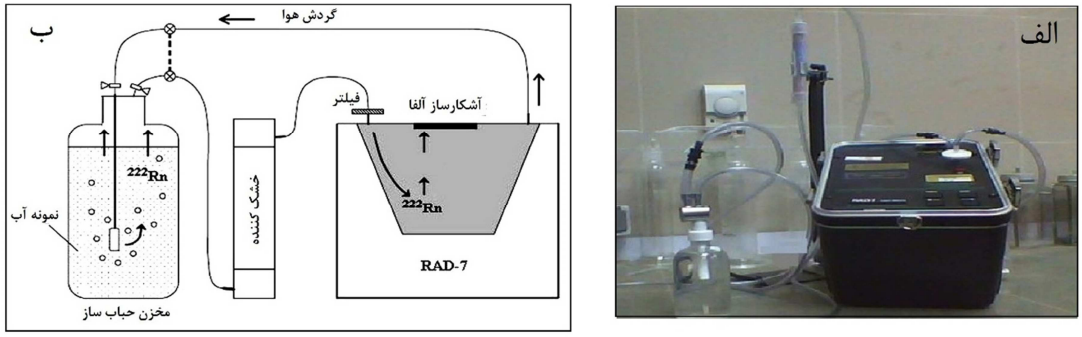


شکل ۲: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

اندازه‌گیری گاز رادون

به منظور اندازه‌گیری میزان گاز رادون محلول تعداد ۴۰ نمونه آب از چاه‌های عمیق منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شد. در این راستا از دستگاه الکترونیکیRAD7 ساخت شرکت DURRIGE با دقت ۰/۵ بکرل بر لیتر و براساس پروتکل استاندارد همراه دستگاه استفاده شد. این دستگاه از نوع آشکارسازهای فعال می‌باشد و بر اساس میزان انرژی ذرات آلفای گسیل شده از رادون عمل می‌کند (شکل ۳). به همراه این دستگاه بطری شیشه‌ای ۲۵۰ میلی‌لیتری برای برداشت نمونه آب وجود دارد. پس از برداشت نمونه آب توسط این بطری، دستگاه با استفاده از یک سیکل بسته در مدت زمان ۵ دقیقه حباب‌سازی می‌نماید که در این مدت تقریباً ۹۴ درصد رادون از آب جدا می‌شود. بعد از ۵ دقیقه پمپ خاموش شده و دستگاه برای رسیدن به حالت تعادل ۵ دقیقه منتظر می‌ماند. بعد از رسیدن به حالت تعادل میان آب، هوا و ذرات رادون چسبیده به آشکارساز سیستم، اندازه‌گیری غلظت گاز رادون در ۴ مرحله ۵ دقیقه‌ای

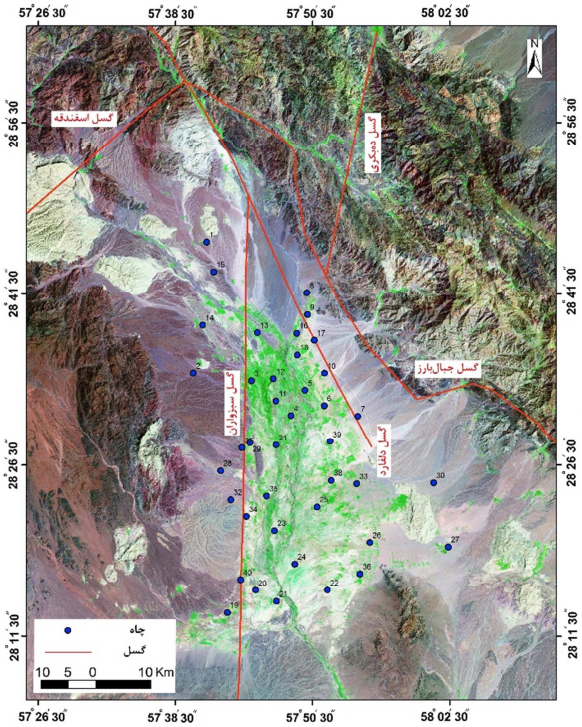
شروع می‌شود. در مدت زمان اندازه‌گیری، گاز Rn۲۲۲ درون اتاقک واپاشی کرده و ذرات آلفا تولید می‌شوند. آشکارساز هر ذره آلفا را با توجه به انرژی آن ثبت می‌کند و از روی تعداد ذرات ثبت شده غلظت رادون را مشخص می‌نماید. که موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل شماره ۴ ارائه شده است.



شکل ۳: الف-تصویری از دستگاه RAD7 مورد استفاده در این تحقیق. ب- طرحی شماتیک از آن (ملکوتیان و سلطانی نژاد، ۲۰۱۷).

گسل‌های منطقه

دشت جیرفت به لحاظ قرارگرفتن در زون ساختاری ایران مرکزی، به لحاظ تکتونیکی یک پهنه فعال است. در نتیجه گسل‌های فعال زیادی نیز در منطقه وجود دارد (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۶). از شواهد و معیارهای فعال بودن گسل-های منطقه می‌توان به جابجایی‌های رخداده در مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات‌کواترنر و برش آبراهه‌ها اشاره کرد (تاج الدینی، ۱۳۹۵؛ رشیدی و همکاران، ۱۳۹۶). به منظور تعیین ارتباط بین تغییرات میزان غلظت گاز رادون با گسل‌ها، نقشه گسل‌های فعال محدوده مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۴). همانطور که در شکل شماره ۴ مشاهده می‌شود پنج گسل مهم سبزواران، جبال‌بارز، اسفندقه، ده‌بکری و دلفارد محدوده مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده‌اند.



شکل ۴: موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری و گسل‌های منطقه (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۶)

روش وزن‌های نشانگر

ارتباط مکانی بین غلظت گاز رادون با موقعیت گسل‌ها با استفاده از روش وزن‌های نشانگر[۱] (بونهام کارتر و همکاران[۲]، ۱۹۸۹) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این روش تاکنون در مطالعات و تحقیقات جغرافیایی متفاوت و مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (درخشانی و مهرابی[۳]، ۲۰۰۹؛ کارانزا[۴]، ۲۰۰۴؛ فن و همکاران[۵]، ۲۰۱۱؛ آرمس[۶]، ۲۰۱۲؛ عبدالهی و پرادهم[۷]، ۲۰۱۵؛ مهرابی و همکاران[۸]، ۲۰۱۵؛ پاملا و همکاران[۹]، ۲۰۱۷). البته پایه ریاضی این تکنیک پیچیده بوده و در این تحقیق از نوع ساده شده این روش، ارائه شده توسط ترنر[۱۰] (۱۹۹۷)، استفاده شد. مبنای این

1 - Weights of Evidence
2 - Bunham-Carter et al.
3 - Derakhshani and Mehrabi
4 - Carranza
5 - Fan et al.
6 - Armas
7 - Abdollahi and Pradhem
8 - Mehrabi et al.
9 - Pamella et al.
10- Turner

روش بر حضور یا عدم حضور یک پدیده نقطه‌ای (مانند موقعیت چاهها) در یک محدوده[1] است که این محدوده می-تواند فواصل مشخص از گسل‌ها باشد. این روش بر اساس وزن‌دهی بین این نقاط و محدوده‌ها عمل می‌کند. این وزن-ها به‌صورت W^+ (وزن‌دهی به پدیده‌های درون محدوده (D_P)) و W^- (وزن‌دهی به پدیده‌های بیرون از محدوده (D_A)) است. باید توجه کرد $D_P T =+D_A$ و T کل محدوده‌ای است که مطالعه شده است. ارتباط مکانی بین مجموعه نقاط و محدوده های دوتایی را با توجه به رابطه زیر می‌توان مشخص نمود:

ارتباط مکانی مثبت اگر:

۱ < (درصد کل مساحت درون محدوده) / (درصد پدیده‌های قرارگرفته در درون محدوده)

ارتباط مکانی منفی اگر:

۱ > (درصد کل مساحت درون محدوده) / (درصد پدیده‌های قرارگرفته در درون محدوده)

بدون ارتباط مکانی اگر:

۱ = (درصد کل مساحت درون محدوده) / (درصد پدیده‌های قرارگرفته در درون محدوده)

اما به دلیل اینکه مساحت پدیده‌ها بسیار کوچکتر از محدوده‌هایی است که درون آن قرار دارند، برای نمایش تغییرات، روابط بالا به صورت لگاریتمی ارائه می‌شود.

لگاریتم (درصد پدیده‌های درون محدوده)/ (درصد کل مساحت درون محدوده)= W^+

لگاریتم (درصد پدیده‌های برون محدوده)/ (درصد کل مساحت برون محدوده)= W^-

پس از وزن دهی، واریانس وزنها از طریق فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$s^2(w+) = \frac{1}{mD_p} + \frac{1}{bD_p} \quad (۱)$$

$$s^2(w-) = \frac{1}{mD_A} + \frac{1}{bD_A} \quad (۲)$$

در فرمول بالا mD_P تعداد پیکسل‌های (کوچکترین واحد سازنده تصویر) درون محدوده که شامل موقعیت چاه، بوده. و bD_P تعداد پیکسل‌های که بدون موقعیت چاه بوده ولی درون محدوده است. سپس برای هر محدوده دو تایی ضریب تباین (C) از رابطه زیر بدست می آید:

$$C = (W+) - (W-) \quad (۳)$$

سپس انحراف معیار محاسبه می‌شود:

$$s(C) = \sqrt{s^2(W+) + s^2(W-)} \quad (۴)$$

[1] - Domain

در مواردی که نقاط و رخنمون ها نسبتاً کم باشند (مانند تحقیق پیش‌رو) نسبت C/s(C) مبنای کار قرار می‌گیرد (بونهام کارتر[1]، ۱۹۹۴)، این نسبت به عنوان آزمون غیررسمی با فرض صفر= C عمل می‌کند تا زمانی که این نسبت به طور نسبی زیاد باشد دال بر این است که کنتراست در مقایسه با انحراف استاندارد زیاد است در نتیجه کنتراست به واقعیت نزدیکتر است. از نظر تئوری، اگر مقدار این نسبت از ۱/۵ یا ۲ بالاتر باشد، ارتباط بین دو متغیر مطلوب است. به خاطر فرض‌های لازم برای آزمون آماری رسمی، به ویژه مساله وابستگی (Cs) بر روی واحدهای اندازه‌گیری بهترین راه استفاده از این تناسب نه به طور مطلق بلکه بطور نسبی است. براین اساس هر چه مقدار نسبت بدست آمده بالا، بزرگتر باشد ارتباط مکانی مطلوب‌تر بوده به طوری که حداکثر نسبت بدست آمده برای یک محدوده ارتباط مکانی مطلوب‌تری را برای آن محدوده می توان در نظر گرفت. جهت آماده‌سازی و انجام تجزیه و تحلیل‌های نهایی از نرم-افزارهای ENVI 5.3، ArcGIS 10.3 و افزونه SDM[2] استفاده شد. شرط کار با داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مذکور اینست که ابتدا این لایه‌های از فرمت بردار[3] به فرمت رستر[4] تبدیل شوند.

نتایج و بحث

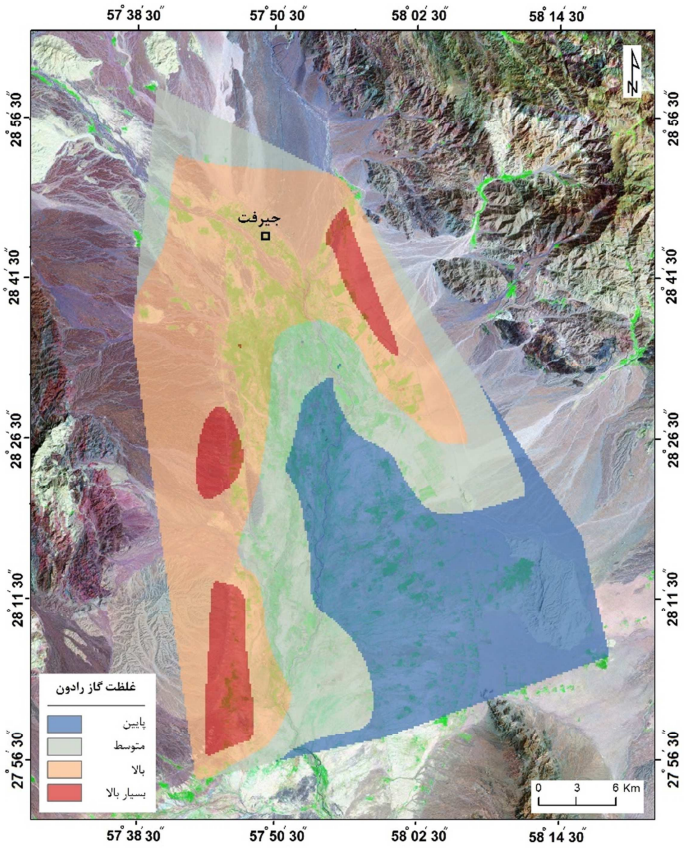
نتایج غلظت گاز رادون نمونه‌های اندازه‌گیری شده بر حسب بکرل بر لیتر (Bq/lit) در جدول شماره ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهدکه در ۲۷ چاه (۶۷ درصد از نمونه‌ها) غلظت گاز محلول در آب بیش از حد مجاز (۱۱ بکرل بر لیتر) است. بیشترین میزان گاز رادون ۳۴/۵۳ بکرل بر لیتر و مربوط به چاه شماره ۴۰ است. چاه شماره ۱۳ یکی از چاه‌های تأمین آب شرب بخشی از شهر جیرفت است که غلظت گاز در آن بیش از حد مجاز است. با انجام عملیات درونیابی به روش کریجینگ بر روی غلظت‌های گاز بدست‌آمده از اندازه‌گیری‌ها در محیط GIS نقشه تغییرات غلظت گاز رادون در سطح دشت جیرفت تهیه شد (شکل۴)، همانطور که در شکل شماره ۵ مشخص می‌شود منطقه مورد مطالعه به لحاظ غلظت گاز رادون به چهار طبقه تقسیم بندی شده است. نحوه طبقه‌بندی بدین صورت انجام گرفته است که مقادیر صفر تا ۱۱ بکرل بر لیتر در طبقه با غلظت کم، مقادیر ۱۱ تا ۲۰ بکرل بر لیتر در طبقه با غلظت متوسط، مقادیر ۲۰ تا ۲۷ بکرل بر لیتر در طبقه با غلظت بالا و در نهایت مقادیر ۲۷ تا ۳۴ بکرل بر لیتر در طبقه با غلظت بسیار بالا طبقه‌بندی شدند. حدود ۸۰۰۰ هکتار از دشت که با رنگ قرمز دیده می‌شود، به لحاظ غلظت گاز رادون در حد بسیار بالا قرار دارد و حتماً نیاز به بررسی‌ها و مطالعات بیشتری دارد تا آب چاه‌های این محدوده به عنوان آب شرب استفاده نشود. در حدود ۴۶۰۰۰ هکتار از محدوده مورد مطالعه در طبقه با درجه بالای غلظت گاز رادون قرار گرفته بطوری که شهر جیرفت نیز در این طبقه قرار دارد. و مطمئناً بایستی تمهیدات ویژه‌ای جهت نظارت بر آبهای استحصالی از چاه‌های این محدوده جهت شرب به عمل آید. همانطور که در اشکال ۴ و ۵ دیده می‌شود روند

[1] - Bunham-Carter
[2]- Spatial Data Modeler
[3]- Vector
[4] - Raster

جهت‌یافتگی محدوده‌ها کاملاً با روند گسل‌های سبزواران و دلفارد همخوانی دارند، بطوری که محدوده‌های با غلظت بسیار بالا دقیقاً منطبق بر این دو گسل هستند. بنابراین بطور ظاهری نیز ارتباط بین غلظت‌های بالای گاز رادون محلول در آب با گسل‌های فعال موجود در دشت مشخص می‌شود. در نتیجه شواهد موجود، می‌توان به فعال بودن این دو گسل پی برد، موضوعی که مطالعات (شفیعی و همکاران، ۱۳۸۸؛ رشیدی و همکاران، ۹۶) نیز آن را تأیید می-نماید.

جدول ۱: غلظت گاز رادون محلول در نمونه‌ها

شماره نمونه	نام چاه	غلظت (Bq/lit)	شماره نمونه	نام چاه	غلظت (Bq/lit)
۱	ده نو	۱۱/۲۸	۲۱	حسین آباد	۰۹/۱۱
۲	عشرت آباد	۲۱/۱۱	۲۲	چهل منی	۰۹/۰۸
۳	شالباف	۲۷/۱۵	۲۳	ریگان بار	۱۳/۰۷
۴	مرادآباد ۱	۰۷/۳۲	۲۴	سلمان آباد	۱۷/۷۱
۵	ساغری	۱۰/۷۶	۲۵	حاجی آباد	۰۶/۵۴
۶	مراد آباد ۲	۱۹/۶۷	۲۶	جهاد آباد	۰۳/۷۶
۷	آزادگان	۲۵/۱۳	۲۷	سه سیلی	۰۷/۴۲
۸	کوچ بالا	۲۰/۸۸	۲۸	ناصر	۲۳/۵۹
۹	ده شیخ	۳۱/۲۱	۲۹	ابراهیم رضا	۲۸/۷۶
۱۰	پاستوری	۲۸/۳۱	۳۰	پشت کوه دوس	۰۳/۴۵
۱۱	پیش سفلی	۱۵/۸۵	۳۱	زحمت آباد	۱۰/۳۴
۱۲	پیش علیا	۱۸/۴۱	۳۲	جنگل گرگی	۲۳/۷۴
۱۳	ملک آباد	۲۶/۱۴	۳۳	لرد خران	۰۹/۱۲
۱۴	مهدی آباد	۱۸/۹۰	۳۴	کاظم آباد	۳۲/۴۱
۱۵	فرودگاه	۱۹/۶۲	۳۵	بیگمان	۱۴/۶۲
۱۶	شاه سوا	۲۴/۹۸	۳۶	جهاد آباد	۰۳/۱۲
۱۷	عشایری	۳۰/۶۷	۳۷	کریم آباد ۱	۳۱/۹۷
۱۸	ملاوی	۲۳/۱۲	۳۸	کریم آباد ۲	۰۵/۸۳
۱۹	گنج آباد	۲۲/۶۰	۳۹	شهید نجف	۰۹/۷۴
۲۰	نامجو	۲۸/۱۱	۴۰	محمود اشرافی	۳۴/۵۳

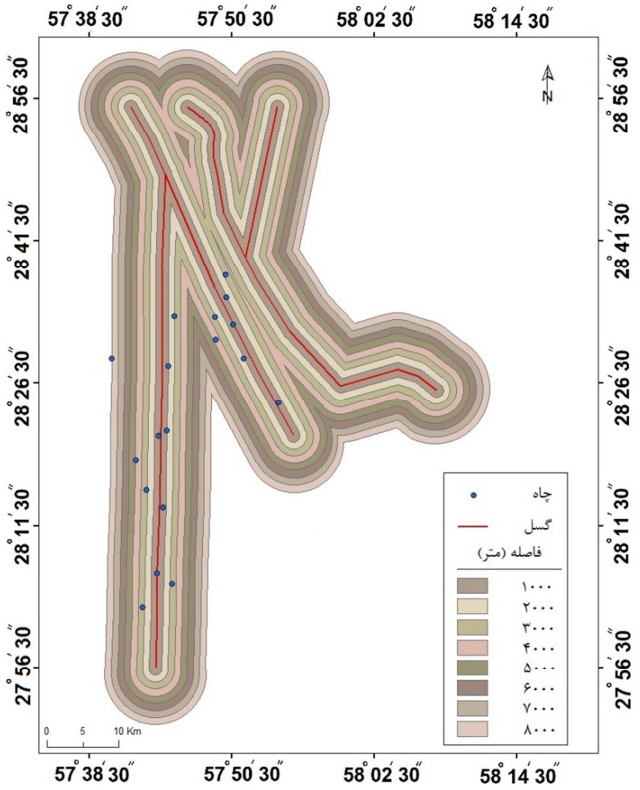


شکل ۵: نقشه پهنه‌بندی میزان غلظت گاز رادون

به منظور تعیین ارتباط بین گسل‌ها فعال منطقه و میزان غلظت گاز رادون محلول در آب از روش وزن‌های نشانگر استفاده شد. برای انجام این روش ابتدا در محیط GIS تعداد ۸ محدوده[1] ۱۰۰۰ متری اطراف گسل‌ها طراحی شد (شکل ۶). سپس با انجام عملیات روی‌هم‌اندازی[2] لایه مربوط به چاه‌هایی که در آنها غلظت گاز رادون محلول در آب بالاتر از حد نرمال بود، بر روی لایه گسل‌های محدوده‌دار قرارگرفته و ضرایب مربوط به روش وزن‌های نشانگر محاسبه شد (جدول ۲). همانطور که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود ضریب C/s(C) که در این روش ملاک عمل قرار می‌گیرد، برای محدوده ۱۰۰۰ متری مقدار ۳/۵۵ بدست‌آمده است و برای فواصل بعدی این ضریب کاهش می-یابد، بنابراین طبق اصول روش وزن‌های نشانگر، فاصله ۱۰۰۰ متری از گسل‌ها بیشترین ارتباط را با چاه‌های

1 - Buffers
2 - Overlay

مطالعاتی داشته و با فاصله گرفتن از امتداد گسل‌ها این ارتباط نیز کاهش می‌یابد. ولیکن تا فاصله ۵۰۰۰ متری نیز هنوز ارتباط مکانی وجود دارد.



شکل ۶: موقعیت بافرهای ۱ کیلومتری و چاه‌های دارای غلظت بالای گاز رادون

جدول ۲: تغییرات وزن ها و تباین ها برای فواصل تجمعی از حواشی گسل‌ها نسبت به موقعیت چاه‌های با غلظت بالای گاز رادون

محدوده‌ها (متر)	تعداد نقاط	W+	s(W+)	W-	s(W-)	C	s(C)	C/s(C)
۱۰۰۰	۹	۱/۲۵	۰/۳۶	-۰/۴۹	۰/۳۳	۱/۷۴	۰/۴۹	۳/۵۵
۲۰۰۰	۱۳	۰/۸۴	۰/۲۹	-۰/۸۶	۰/۴۵	۱/۶۹	۰/۵۳	۳/۱۸
۳۰۰۰	۱۵	۰/۶۷	۰/۲۷	-۱/۱۸	۰/۵۷	۱/۸۴	۰/۶۴	۲/۹۰
۴۰۰۰	۱۷	۰/۵۷	۰/۲۶	-۲/۰۷	۱/۰۰	۲/۶۴	۱/۰۳	۲/۵۵
۵۰۰۰	۱۷	۰/۳۹	۰/۲۵	-۱/۸۱	۱/۰۰	۲/۲۱	۱/۰۴	۲/۱۴
۶۰۰۰	۱۷	۰/۲۵	۰/۲۵	-۱/۵۰	۱/۰۱	۱/۷۴	۱/۰۴	۱/۶۹
۷۰۰۰	۱۷	۰/۱۳	۰/۲۴	-۱/۰۷	۱/۰۱	۱/۱۹	۱/۰۴	۱/۱۵
۸۰۰۰	۱۸							

مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با مطالعات قبلی انجام گرفته در مناطق دیگر نشان می‌دهد که غلظت گاز رادون محلول در آب چاه‌های دشت جیرفت، مشابهت زیادی با چاه‌های شهرستان زرند (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۶) دارد. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نتایج مطالعات گذشته (ملکوتیان و همکاران، ۲۰۱۴؛ کندری و همکاران[1]، ۲۰۱۶؛ کومار و همکاران[2]، ۲۰۱۷؛ علی ضفر و همکاران[3]، ۲۰۱۸) مبنی بر وجود ارتباط بین گسل‌ها و افزایش غلظت گاز رادون را مورد تایید قرار می‌دهد، بدین صورت که با کاهش فاصله چاه‌ها از گسل‌ها، غلظت گاز محلول مربوط به آن چاه‌ها افزایش یافته و این موضوع با افزایش مقادیر ضرایب محاسبه شده به روش وزن‌های نشانگر برای فواصل کمتر، همخوانی دارد. آنچه که این تحقیق را نسبت به مطالعات قبلی متمایز می‌کند تأیید وجود ارتباط بین گسل‌ها و افزایش غلظت گاز رادون محلول در آبهای زیرزمینی، بصورت کمی و با استفاده از روابط آماری است، در حالی که مطالعات قبلی صرفاً جنبه توصیفی و مشاهداتی داشته‌اند.

رابطه انتشار گاز رادون با سایر عوارض طبیعی یا انسانی

به غیر از گسل‌ها می‌توان به سازندهای زمین شناسی به عنوان یکی دیگر از عوارض طبیعی موثر در انتشار گاز رادون اشاره کرد (لیو و همکاران، ۲۰۱۶). همانطور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود اکثریت سازندهای رخنمون‌یافته در منطقه مورد مطالعه از سنگ‌های آتشفشانی و گرانیتی، تشکیل شده است. و با توجه به اینکه این سازندها از عوامل اصلی تولید گاز رادون، هستند، در نتیجه باعث شده است تا غلظت گاز رادون محلول در آب چاه‌های منطقه نیز بالا برود. با توجه به قابلیت آزادسازی گاز رادون و انتشار آن در هوا (حسینی، ۱۳۹۱؛ السباق و همکاران، ۲۰۱۸)، گسترش سکونتگاه‌های شهری و روستایی نیز می‌تواند به نوبه خود باعث افزایش آنومالی گاز رادون در منطقه بشود بدین صورت که با افزایش روزافزون کاربرد سنگ های گرانیتی به عنوان نمای ساختمان‌ها و با توجه به عاملیت این سنگ در تولید گاز رادون، خطر آزاد سازی گاز رادون در هوا نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر اینکه گسترش مناطق شهری و روستایی به سمت سازندهای آتشفشانی و گرانیتی نیز به نوبه خود باعث افزایش این خطر می‌شود.

نتیجه‌گیری

دشت جیرفت بدلیل قرارگرفتن در کمربند آتشفشانی ایران مرکزی و احاطه شدن آن توسط سنگ‌های آذرین و با توجه به اینکه سنگ‌های آذرین از عوامل اصلی تولید گاز رادون محسوب می‌شوند، بسیار مستعد تمرکز گاز رادون است. موضوعی که با بررسی و اندازه‌گیری‌های انجام‌گرفته در این تحقیق تأیید می‌شود. اندازه‌گیری غلظت گاز رادون محلول در آب چاه‌های دشت جیرفت با استفاده از دستگاه RAD7 نشان می‌دهد که بالاترین غلظت گاز رادون

[1] - Kandari et al.
[2] - Kumar et al.
[3] - Ali Zafar et al.

محلول در آب ۳۴/۵۳ بکرل بر لیتر و مربوط به چاه اشراقی در بخش جنوب شرقی دشت است. از ۴۰ نمونه مورد آزمایش، ۲۷ نمونه غلظت گاز در آنها بالاتر از حد استاندارد است. نتایج حاصل از انجام روش وزن‌های نشانگر نشان می‌دهد که بین چاه‌های با غلظت بالای گاز رادون و گسل‌های فعال در منطقه ارتباط وجود دارد و این ارتباط به لحاظ کمی در فاصله ۱۰۰۰ متری از امتداد گسل‌ها بیشترین بوده و تا فاصله ۵۰۰۰ متری نیز ادامه دارد. قرارگیری یکی از چاه‌های اندازه‌گیری در محدوده شهر جیرفت و بالا بودن میزان گاز رادون در آب آن، می‌تواند باعث افزایش مبتلایان به سرطان ریه شود که باید هرچه زودتر مورد توجه مسئولین امر قرارگرفته و تمهیدات لازم اندیشیده شود.

تقدیر و تشکر

با تشکر از حوزه پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان جهت همکاری در انجام این پژوهش، از همکاری شرکت سهامی آب منطقه‌ای جیرفت در کمک به مطالعات میدانی این تحقیق قدردانی می‌گردد.

منابع

تاج الدینی نازیلا (۱۳۹۵). رابطه بین فعالیت زمین ساختی گسل‌ها و ریختار بادبزن‌های آبرفتی (مطالعه موردی: گسل سبزواران، جنوب ایران مرکزی). دومین کنگره بین المللی علوم زمین و توسعه شهری، موسسه تحقیقاتی کیان و جهاد دانشگاهی آذربایجان شرقی، صص. ۱-۲۱.

حسینی محبوبه (۱۳۹۱). گاز رادون و خطرات زیست‌محیطی آن. مجله رشد، دوره ۱۸، شماره۱، صص ۱۷-۲۵.

رحیمی مجتبی.، اسدی احمد.، جباری لیلی (۱۳۹۶). اندازه‌گیری غلظت گاز رادون محلول در آبهای زیرزمینی شهرستان زرند و برآورد دوز سالیانه گاز رادون جذب شده در سال ۱۳۹۵. مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، دوره ۱۶، صص ۱۱۲۷ -۱۱۳۷.

رشیدی احمد؛ خطیب محمد مهدی؛ موسوی سید مرتضی؛ جمور یحیی (۱۳۹۶). برآورد جنبایی گسل‌های فعال در جنوب و باختر بلوک لوت بر پایه گشتاورهای زمین‌شناختی، لرزه‌ای و ژئودتیک. فصلنامه علوم زمین، سال ۲۶، شماره ۱۰۴، صص ۲۱۱-۲۲۲.

شفیعی بافتی امیر؛ جعفری حمیدرضا؛ شاه پسندزاده مجید (۱۳۸۸). زمین ساخت جنبا و برآورد خطر زمین لرزه در منطقه سبزواران. زمین شناسی ژئوتکنیک، دوره ۵، شماره۳، صص ۲۳۰-۲۳۹.

Abdullahi, S., Pradhan, B., (2016), Sustainable Brownfields Land Use Change Modeling Using GIS-based Weights-of-Evidence Approach, Appl. Spatial Analysis (2016) 9:21–38.

Akerblom, G., Lindgren, J., (1996), Mapping of groundwater radon potential. IAEA Technical Committee Meeting, Vienna, Austria, 7(2): 125-135.

Ali Zafar, W., Ahmed, J., Barkat, A., Nabi, A., Mahmood, R., Manzoor, S., Iqbal, T. (2018), Spatial mapping of radon: Implication for fault delineation, Geochemical Journal, 52: 359 - 371.

Alsabbagh, A., Alzghou, S., Marashdeh, S., Abu Saleem, R., (2018), Examination of fault zones and uranium concentration effects on the in-soil radon levels at Central Jordan Area, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 317(1): 511-517.

Asadi, A., Rahimi, M., Jabbari, L., (2015), An Estimation of Annual Effective Absorbed Dose of Radon Gas for Adults and Children in Anar and Rafsanjan Cities through Measuring Dissolved Radon Gas in Water by the RAD7 Detector, The Persian Golf Biomedical Research Institute, 18(5): 960-69.

Armas, I., (2012), Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping, Prahova Subcarpathians, Romania. Nat Hazards (2012) 60:937–950.

Bem, H., Plota, U., Staniszewska, M., Bem, EM., Mazurek, D., (2014), Radon (222Rn) in underground drinking water supplies of the Southern Greater Poland Region, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 299: 1307-1312.

Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., Wright, D. F., (1989), Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential, in Agterberg, F. P., and Bonham-Carter, G. F., eds., Statistical Applications in the Earth Sciences: Geol. Survey Canada Paper 89–9, p. 171–183.

Carranza, E. J., (2004), Weights of Evidence Modeling of Mineral Potential: A Case Study Using Small Number of Prospects, Abra, Philippines, Natural Resources Research, Vol. 13, No. 3, 173-187.
Derakhshani, R., Mehrabi, A., (2009), Spatial association of copper mineralization and faults/fractures in Southern Part of Central Iranian volcanic belt, Trends in Applied Sciences Research 4 (4), 229-240.
Fan, D., Cui, X., Yuan, D., Wang, J., Yang, J., Wang S., (2011), Weight of Evidence Method and Its Applications and Development, Procedia Environmental Sciences 11 (2011) 1412 – 1418.
Fonollosa, E., Penalver, A., Borrull, F., Aguilar, C., (2016), Radon in spring waters in the south of Catalonia, Journal of environmental radioactivity, 151: 275-81
Kandari, T., Aswal, S., Prasad, M., Bourai, A., Ramola, R. C., (2016), Estimation of annual effective dose from radon concentration along Main Boundary Thrust (MBT) in Garhwal Himalaya, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 9(3): 228-33.
Kumar, A., Vij, R., Sarin, A., Kanwar, P., (2017), Radon and uranium concentrations in drinking water sources along the fault line passing through Reasi district, lesser Himalayas of Jammu and Kashmir State, India, Journal Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, Volume 23, 2017 - Issue 7. P. 1668-1682.
Liu, H., Wang, N., Chu, X., Li, T., Zheng, L., Yan, S., Li, S. (2016), Mapping radon hazard areas using 238U measurements and geological units: a study in a high background radiation city of China, J Radioanal Nucl Chem (2016) 309:1209–1215.
Malakootian, M., Fard, Z.D., Rahimi M., (2015), Determination of radon concentration in drinking water resources of villages nearby Lalehzar fault and evaluation the annual effective dose, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 304(2): 805-15.
Malakootian, M., Khashi, Z., Iranmanesh, F., Rahimi, M., (2014), Radon concentration in drinking water in villages nearby Rafsanjan fault and evaluation the annual effective dose, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 302(3): 1167-76.
Malakootian, M., Salmani, H., (2015), Determination Of Radon Level In Drinking Water In Mehriz Villages And Evaluation The Annual Effectiveabsorbed Dose, Journal of Community Health Research, 2015; 3(4): 253-260.
Malakootian, M., Soltani Nejhad, Y., (2017), Determination of radon concentration in drinking water of Bam villages and evaluation of the annual effective dose, International Journal of Radiation Research, 15(1): 81-89.
Mehrabi, A., Dastanpour, M., Radfar, Sh. Vaziri, M. R., Derakhshani, R., (2015), Detection of fault lineaments of the Zagros fold-thrust belt based on Landsat imagery interpretation and their spatial relationship with Hormoz Series salt dome locations using GIS analysis, Geosciences, 24 (95): 17-32.
Pamela, A., Sadisun, I., Arifianti, Y., (2017), Weights of Evidence Method for Landslide Susceptibility Mapping in Takengon, Central Aceh, Indonesia, Global Colloquium on GeoSciences and Engineering, 1-5.
Regard, V., Bellier, O., Martinod, J., Faccenna. C., (2005), Analogue Experiments of Subduction vs. Collision Processes: Insights for the Iranian Tectonics, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 7 (3), pp.129-137
Turner, D.D., (1997), Predictive GIS model for sediment-hosted gold deposits, North-Central Nevada, U.S.A, in Gubins, A. G., ed., Proc. Exploration 97: Fourth Decennial Intern. Conf. on Mineral Exploration (Toronto, Canada), p. 115–126.

Research Article

Measuring the concentration of radon gas in groundwater of Jiroft plain and its relation with the region faults

Ali Mehrabi*[1]

Received: 25-10-2018 Revised: 04-02-2019 Accepted: 10-04-2019

Abstract

Radon gas is one of the main causes of lung cancer, the release of this gas in water resources can lead to major environmental hazards. The purpose of this study was to measure the concentration of radon gas in groundwater of the Jiroft plain and determine its relationship with active faults in the region. In this regard, 40 samples of wells water were collected from Jiroft plain and the RAD7 was used to calculate the concentration of dissolved radon gas in them. According to the results, 67% of wells have more than the limit of radon concentration in the studied area. The zoning map of the radon gas concentration was prepared By performing an interpolation operation. The study area was classified into four classes: very high, high, medium and low in terms of radon gas concentration. So that the area is about 54,000 hectares are in a high and very high concentration range. While the Jiroft city is in the high concentration of radon gas. In order to determine the relationship between the high concentrations of radon gas and faults in the region, the weights of evidence method were used. The results of this method indicate that there is a high correlation between high and very high concentrations of radon gas and main faults. The greatest association was found in 1000 meters of faults and this association will be reduced by Getting away from the faults.

Keywords: Water Resources, Environmental hazards, Weights of evidence, RAD 7 Detector, Jiroft.

[1]*- Assistant Professor, Department of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
Email: Mehrabi@uk.ac.ir

References

References (in Persian)

Hosseini, M., (2012), Radon gas and its environmental hazards, Roshd Magazine, 18(1): 17-25.[In Persian]
Rahimi, M., Asadi, A., Jabari, L., (2017), Measurement of dissolved radon gas concentrations in groundwater of Zarand city and estimation of annual dose of radon gas absorbed in 1395, Medical Sciences Journal of Rafsanjan University, 16: 1127-1137. [In Persian]
Rashidi, A., Khatib, M., Mosavi, M., Jamour, Y., (2017), Estimation of the active faults in south and west of the Lut Bloc based on geological, seismic, and geodetic moments, Geosciences Journal, 26(104): 211-222. [In Persian]
Shafiei Bafti, A., Jafari, H., Shahpasandzadeh, M., (2009), Active tectonics and estimation of earthquake hazard in Sabzevaran area. Applied Geology, 5(3): 230-239. [In Persian]
Tajadini, N., (2016), The Relationship Between the tectonics Activity of Faults and Alluvial fan structures (Case Study: Sabzevaran Fault, South Central Iran), The 2nd international congress on earth sciences and urban development, Kian research institute, pp.1-21. [In Persian]

References (in English)

Abdullahi, S., Pradhan, B., (2016), Sustainable Brownfields Land Use Change Modeling Using GIS-based Weights-of-Evidence Approach, Appl. Spatial Analysis (2016) 9:21–38.
Akerblom, G., Lindgren, J., (1996), Mapping of groundwater radon potential. IAEA Technical Committee Meeting, Vienna, Austria, 7(2): 125-135.
Ali Zafar, W., Ahmed, J., Barkat, A., Nabi, A., Mahmood, R., Manzoor, S., Iqbal, T. (2018), Spatial mapping of radon: Implication for fault delineation, Geochemical Journal, 52: 359 - 371.
Alsabbagh, A., Alzghou, S., Marashdeh, S., Abu Saleem, R., (2018), Examination of fault zones and uranium concentration effects on the in-soil radon levels at Central Jordan Area, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 317(1): 511-517.
Asadi, A., Rahimi, M., Jabbari, L., (2015), An Estimation of Annual Effective Absorbed Dose of Radon Gas for Adults and Children in Anar and Rafsanjan Cities through Measuring Dissolved Radon Gas in Water by the RAD7 Detector, The Persian Golf Biomedical Research Institute, 18(5): 960-69.
Armas, I., (2012), Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping, Prahova Subcarpathians, Romania. Nat Hazards (2012) 60:937–950.
Bem, H., Plota, U., Staniszewska, M., Bem, EM., Mazurek, D., (2014), Radon (222Rn) in underground drinking water supplies of the Southern Greater Poland Region, Journal of Radioanalycal and Nuclear Chemistry, 299: 1307-1312.
Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., Wright, D. F., (1989), Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential, in Agterberg, F. P., and Bonham-Carter, G. F., eds., Statistical Applications in the Earth Sciences: Geol. Survey Canada Paper 89–9, p. 171–183.
Carranza, E. J., (2004), Weights of Evidence Modeling of Mineral Potential: A Case Study Using Small Number of Prospects, Abra, Philippines, Natural Resources Research, Vol. 13, No. 3, 173-187.
Derakhshani, R., Mehrabi, A., (2009), Spatial association of copper mineralization and faults/fractures in Southern Part of Central Iranian volcanic belt, Trends in Applied Sciences Research 4 (4), 229-240.
Fan, D., Cui, X., Yuan, D., Wang, J., Yang, J., Wang S., (2011), Weight of Evidence Method and Its Applications and Development, Procedia Environmental Sciences 11 (2011) 1412 – 1418.
Fonollosa, E., Penalver, A., Borrull, F., Aguilar, C., (2016), Radon in spring waters in the south of Catalonia, Journal of environmental radioactivity, 151: 275-81
Kandari, T., Aswal, S., Prasad, M., Bourai, A., Ramola, R. C., (2016), Estimation of annual effective dose from radon concentration along Main Boundary Thrust (MBT) in Garhwal Himalaya, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 9(3): 228-33.
Kumar, A., Vij, R., Sarin, A., Kanwar, P., (2017), Radon and uranium concentrations in drinking water sources along the fault line passing through Reasi district, lesser Himalayas of Jammu and Kashmir State, India, Journal Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, Volume 23, 2017 - Issue 7. P. 1668-1682.
Liu, H., Wang, N., Chu, X., Li, T., Zheng, L.,Yan, S., Li, S. (2016), Mapping radon hazard areas using 238U measurements and geological units: a study in a high background radiation city of China, J Radioanal Nucl Chem (2016) 309:1209–1215.
Malakootian, M., Fard, Z.D., Rahimi M., (2015), Determination of radon concentration in drinking water resources of villages nearby Lalehzar fault and evaluation the annual effective dose, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 304(2): 805-15.
Malakootian, M., Khashi, Z., Iranmanesh, F., Rahimi, M., (2014), Radon concentration in drinking water in villages nearby Rafsanjan fault and evaluation the annual effective dose, Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry, 302(3): 1167-76.
Malakootian, M., Salmani, H., (2015), Determination Of Radon Level In Drinking Water In Mehriz Villages And Evaluation The Annual Effectiveabsorbed Dose, Journal of Community Health Research, 2015; 3(4): 253-260.
Malakootian, M., Soltani Nejhad, Y., (2017), Determination of radon concentration in drinking water of Bam villages and evaluation of the annual effective dose, International Journal of Radiation Research, 15(1): 81-89.

Mehrabi, A., Dastanpour, M., Radfar, Sh. Vaziri, M. R., Derakhshani, R., (2015), Detection of fault lineaments of the Zagros fold-thrust belt based on Landsat imagery interpretation and their spatial relationship with Hormoz Series salt dome locations using GIS analysis, Geosciences, 24 (95): 17-32.

Pamela, A., Sadisun, I., Arifianti, Y., (2017), Weights of Evidence Method for Landslide Susceptibility Mapping in Takengon, Central Aceh, Indonesia, Global Colloquium on GeoSciences and Engineering, 1-5.

Regard, V., Bellier, O., Martinod, J., Faccenna. C., (2005), Analogue Experiments of Sub- duction vs. Collision Processes: Insights for the Iranian Tectonics, Journal of Seismology and Earth- quake Engineering, 7 (3), pp.129-137

Turner, D.D., (1997), Predictive GIS model for sediment-hosted gold deposits, North-Central Nevada, U.S.A, in Gubins, A. G., ed., Proc. Exploration 97: Fourth Decennial Intern. Conf. on Mineral Exploration (Toronto, Canada), p. 115–126.