

## بررسی اولیه تغییرات غلظت گاز رادون در چشمه آبگرم جوشان واقع در استان کرمان به منزه پیش‌نشانگر زلزله برای زلزله‌های ۴/۹ ریشتری شهداد و ۴/۳ ریشتری اردیبهشت

۱۳۸۸ سیرچ

علی نگارستانی<sup>۱,۲,۳\*</sup>، سید مهدی هاشمی<sup>۱</sup>، فرزین ناصری<sup>۲</sup>، مجتبی ناموران<sup>۱</sup>، سید محمد موسوی نسب<sup>۳</sup> و حبیب‌اله منتظری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران

<sup>۲</sup> مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان

<sup>۳</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمان، گروه فیزیک، کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۶)

### چکیده

یافتن روش‌های قابل اطمینان به منظور پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه‌ها از مهم‌ترین رهیافت‌هایی است که سال‌ها است دانشمندان به دنبال آن هستند. در این میان، ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی، از جمله تغییرات در میزان گاز رادون خروجی از زمین، ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی را می‌توان در حکم یکی از روش‌های نوین و قابل بررسی در این راستا معرفی کرد. از این رو، در این مقاله، ضمن معرفی اولین ایستگاه پایش پیوسته غلظت گاز رادون روی چشمه‌های آبگرم در کشور، زلزله‌های رویداده و داده‌های ثبت شده پیرامون غلظت گاز رادون ایستگاه فوق، در بازه‌های زمانی ۸۸/۲/۱۱ تا ۸۸/۲/۲۹، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از میان زلزله‌های روی داده در این مدت، تنها دو زلزله ۴/۹ و ۴/۳ ریشتری، با فاصله رومرکزی ۲۱ و ۵ کیلومتری نسبت به ایستگاه پایش، که به ترتیب در تاریخ‌های ۸۸/۲/۲۱ و ۸۸/۲/۲۲ به وقوع پیوسته‌اند، قابلیت تاثیرگذاری روی غلظت گاز رادون اندازه‌گیری شده را طبق مدل‌های تنش-واکنش موجود داشته‌اند. ثبت بی‌هنجاری در داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت گاز رادون، چند روز قبل از بروز این دو زلزله، می‌تواند بیانگر نقش پیش‌نشانگری گاز رادون برای زلزله‌های فوق باشد. مقادیر ثبت شده، دو بی‌هنجاری با تغییرات نسبی ۴۰ درصدی گاز رادون، به ترتیب یکی در روز ۸۸/۲/۱۵ و دیگری در روز ۸۸/۲/۱۹ را نشان می‌دهد. داده‌های فوق نیز همانند داده‌های دوره‌های پیشین، به خوبی نشان می‌دهد که بین تغییرات نسبی گاز رادون و رویداد زلزله در این منطقه، ارتباط وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: غلظت گاز رادون، زلزله، پیش‌نشانگر، چشمه آبگرم جوشان

### **Preliminary investigation of the variation of radon concentration in the Jowshan hot spring in the SE of Iran as a precursor for the M 4.9 Shadad and M 4.3 Sirch earthquakes on May, 2009**

Ali Negarestani<sup>1,2,3\*</sup>, Seyed Mehdi Hashemi<sup>2</sup>, Farzin Naseri<sup>2</sup>, Mojtaba Namvaran<sup>2,3</sup>, Seyed Mohammad MusaviNasab<sup>1</sup> and Habiballah Montazeri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kerman Graduate University of Technology (KGUT), Kerman, Iran

<sup>2</sup>International Center For Science, High Technology & Environmental Sciences (ICST), Kerman, Iran

<sup>3</sup>Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran

(Received: 23 January 2010, accepted: 6 March 2012)

\*Corresponding author:

a.negarestani@kgut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

## Summary

Since the beginning of seismology, a hundred years ago, seismologists have always been hopeful to be able to predict earthquakes in order to help populations across the globe avoid destruction and casualties. However, earthquakes continue to occur without any warning.

Soil and groundwater gas variations due to the change in stress related to seismotectonic activity are well documented and used extensively in seismotectonic studies, including fault tracing and seismic surveillance as a precursor. Radon has a more sensitivity than other precursory gases and is considered as the most appropriate gas form precursor.

The first continuous radon monitoring station in Iran, for assessment of radon as an earthquake precursor, was established in September 2007, in Jowshan hot spring (N 30°09'38.7" – E 57°35'57.5"), Kerman Province, SE of Iran. Jowshan complex is composed of six springs, which outflow through fractured limestone, along the Gowk fault. This fault is stretched from the southwest of Bam Plain to the west of Shahdad Town which is well-known for its reservoir-triggered seismicity and has an active history. Occurrence of more than 20 earthquakes  $M > 5$  in the 20th century (According to IIEES earthquake catalogue). As an example, Bam earthquake with  $M 6.6$  (According to USGS data) and more than 25000 victims on December 26, 2003, represents this active history. In this study, in order to measure radon concentration in the spring water, an Alpha Guard PQ 2000 PRO (Genitron Instruments) detector was used. This instrument with a resolution of  $1 \text{ Bq/m}^3$  is able to measure  $^{222}\text{Rn}$  concentration from 2 to  $2000000 \text{ Bq/m}^3$ . Detection of Alpha ( $\alpha$ ) particles produced by radon decaying in the ionization chamber depends on the instrument. This detector, like the most of the radon detectors, has measured the concentration of radon in the gas phase - not in the liquid phase. Therefore, at the beginning, the radon must be transformed from liquid phase to gas phase. The detector was setup in the Jowshan hot spring outlet as shown in Figure 1, schematically. In this system, water enters into an exchange unit which acts as a flow stabilizer. Gaseous radon that leaves the spring water by diffusion is pumped into the detector. This instrument has humid sensitivity. Therefore, the air contains radon cross from humidity absorption chamber (Silica Gel). In this study, a sodium chloride crystal was used as a humidity absorber. Radon was detected every 10 minutes by mentioned instrument and the results were saved into the internal memory of detector.

There are different experimental equations concerning the relation between earthquake magnitude and its effective range on geo-gas variations. According to *Dobrovolsky's* empirical relation ( $D=10^{0.43M}$ ) and the stress-strain theory, strain distribution radii ( $D$ ), depend on the earthquake magnitude ( $M_L$ ). Therefore, anomalies due to earthquakes can indicate whether precursor monitoring station lies in the stress - strain field. Three spike like radon anomalies have been observed several days prior the  $M 4.9$  Shahdad and  $M 4.3$  Sirch earthquakes that occurred on May 11 and 12, 2009, respectively. Location of Jowshan hot spring in the stress - strain field of 11/05/2009 and 12/05/2009 earthquakes in Shahdad and Sirch respectively, can be ascribed to the radon concentration anomalies on 05/05/ 2009 and 09/05/2009.

**Key words:** Radon concentration, earthquake, precursor, Jowshan hot spring.

## ۱ مقدمه

جست‌وجو برای یافتن روش‌های قابل اطمینان پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه از مباحث مهم زلزله‌شناسی و ژئوفیزیک است. از سال ۱۹۶۰، هم‌زمان با پیشرفت دستگاه‌های اندازه‌گیری، روش‌های ژئوشیمیایی در مقایسه با سایر روش‌های معمول در تحقیقات پیش‌نشانگری، امکان استفاده از اطلاعاتی با کیفیت بالاتر را فراهم کرد (هدرواری، ۱۹۷۷). در این میان می‌توان به نقش پیش‌نشانگری گاز رادون در این تحقیقات اشاره کرد.

رادون-۲۲۲، با عدد اتمی ۸۶ و جرم اتمی ۲۲۲ (گرم بر مول)، در شرایط استاندارد دما و فشار، گازی است بی‌رنگ و بی‌بو، که از واپاشی طبیعی اورانیم ۲۳۸، ایجاد می‌شود. این گاز به راحتی درون آب حل می‌شود و از این طریق قادر است، مسافت‌های نسبتاً زیادی را در داخل زمین طی کند. از آنجا که دگرریختگی جنبای پوسته زمین از طریق فرایندهای گوناگون حرارتی و ژئودینامیکی، سبب تراوش گازها و صعود آنها به همراه سایر شاره‌های زیرزمینی به سطح زمین در پهنه‌های فعال و چشمه‌های آبگرم قبل از رویداد زمین‌لرزه می‌شود، این گاز از مدت‌ها پیش، به‌منظور پیش‌بینی زمین‌لرزه مورد پایش قرار گرفته است (الومف و مواشف، ۱۹۷۶؛ کینگ، ۱۹۸۰؛ فلیشر و مگرو کامپرو، ۱۹۸۵؛ سیگویا و همکاران، ۱۹۸۹؛ شاپیرو و همکاران، ۱۹۸۹؛ ویت و همکاران، ۱۹۹۱)؛ به‌طوری که اولین ناهنجاری غلظت گاز رادون درون آب را اولموف و مواشف، پس از وقوع زمین‌لرزه سال ۱۹۶۶ در تاشکند، پایتخت ازبکستان، به ثبت رساندند (الومف و مواشف، ۱۹۷۶). نتایج متنوعی در ارتباط با سازوکارهای ایجاد کننده بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی و اطلاعاتی که در اثر چنین تحقیقاتی به‌دست می‌آید، عرضه شده است (رابرت و همکاران، ۱۹۸۸). هاکسون در ۱۹۸۱ پیشنهاد کردند که تغییرات غلظت گاز رادون در مناطق لرزه‌خیز می‌تواند نشان‌دهنده میزان تنش در سامانه شکستگی محلی

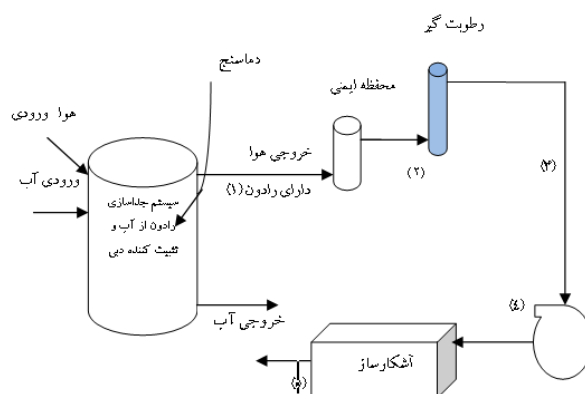
باشد. وی همچنین اشاره کرد که این بی‌هنجاری‌ها به‌واسطه رشد آرام شکستگی‌های کوچک در پوسته بر اثر خوردگی با آب‌های زیرزمینی به‌وجود می‌آیند. او پیشنهاد کرد که بی‌هنجاری‌های رادون به شدت به شرایط محلی مانند نوع سنگ، میزان تنش و درجه اشباع‌شدگی سنگ از آب بستگی دارد (توماس و همکاران، ۱۹۸۸؛ ویرک و همکاران، ۱۹۹۳). کینگ ویزگی‌های کلی تغییرات گازها در اثر زمین‌لرزه را بیان کرد. بی‌هنجاری‌های ناگهانی در میزان تغییرات غلظت گازها می‌تواند ارتباط مستقیمی با زمان وقوع زمین‌لرزه داشته باشد. دامنه و مساحت زیر منحنی تغییرات غلظت گازها در مناطق لرزه‌خیز، به بزرگای زمین‌لرزه بستگی دارد (کینگ و همکاران، ۱۹۹۳) در حال حاضر، شبکه نسبتاً متراکمی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری این گاز، عمدتاً در چین (چن دیون و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژو و همکاران، ۲۰۰۸)، ایالات متحد آمریکا (هریس و همکاران، ۲۰۰۶؛ وینسون و همکاران، ۲۰۰۹)، شوروی سابق (یاکاوآلف و همکاران، ۲۰۰۵) و ژاپن (اوکاوآ و همکاران، ۲۰۰۳)، ایجاد شده است (توتاین و بابر، ۱۹۹۹). نتایج به‌دست آمده، باعث شد تا تغییرات غلظت گاز رادون به‌منزله پیش‌نشانگر زلزله، در ۱۹۹۷، مورد قبول انجمن بین‌المللی لرزه‌شناسی و فیزیک درون زمین (IASPEI) قرار گیرد (وایز، ۱۹۹۷).

بی‌هنجاری در میزان غلظت گاز رادون نه فقط بر اثر پدیده‌های درونی زمین، همانند تغییرات منجر به وقوع زمین‌لرزه، به‌وجود می‌آید، بلکه پارامترهای جوئی نظیر دما، فشار جو، بارش و رطوبت خاک نیز بر آن تاثیرگذار هستند. بنابراین به هنگام استفاده از تغییرات غلظت گاز رادون به‌منزله پیش‌نشانگر قابل اعتماد زمین‌لرزه، بایستی تغییرات ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی از تغییرات حاصل از سایر پارامترها متمایز شود. علاوه بر گاز رادون، میزان گاز تورون موجود در خاک نیز در حکم یکی از نتایج تلاشی، قابل اندازه‌گیری و بررسی خواهد بود

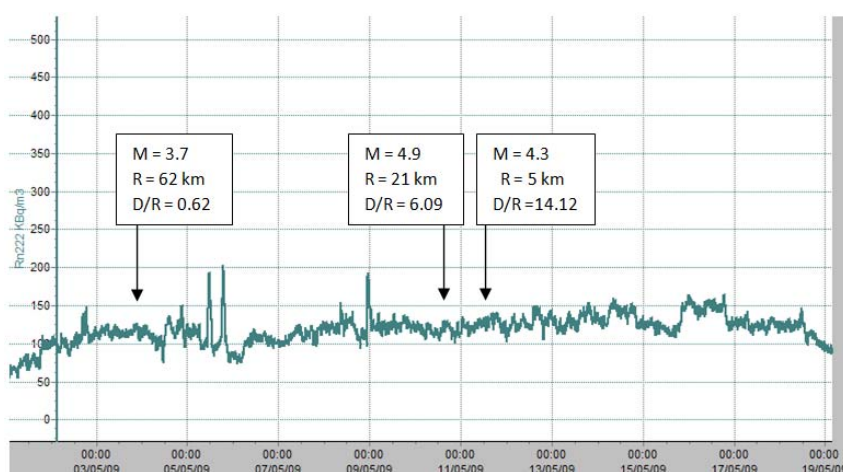
(نگارستانی و همکاران، ۲۰۰۳).

درجه سلیسوس)، تأیید کننده زیاد بودن فعالیت زمین‌ساختی منطقه است (موسوی‌راد و همکاران، ۲۰۱۱). قرار گرفتن مرکز بیش از ۱۲ زمین‌لرزه تاریخی و قرن بیستم، با بزرگی بیش از ۵ ریشتر، روی این گسل، باعث شده است تا گسل پیش‌گفته در زمره یکی از فعال‌ترین و لرزه‌خیزترین گسل‌های استان معرفی شود (شاهپسندزاده و حیدری، ۱۳۷۵؛ عباس-نژاد و داستانی‌پور، ۱۳۷۸؛ بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). در این مقاله، ضمن شرح چگونگی اندازه‌گیری پیوسته گاز رادون محلول در آب، به بررسی زلزله‌های رویداده و نقش پیش‌نشانگری بی‌بهنجاری‌های مشاهده شده پرداخته می‌شود.

اولین ایستگاه پایش پیوسته تغییرات غلظت گاز رادون محلول در چشمه-های آبگرم ایران، با هدف بررسی نقش پیش‌نشانگری آن در رویداد زلزله، در تابستان ۱۳۸۶ در چشمه آبگرم جوشان ( $30^{\circ}09'38''N$  و  $57^{\circ}35'57''E$ ) در استان کرمان، ایجاد شد. مجموعه آبگرم جوشان در ۵۰ کیلومتری جنوب شرق کرمان، شامل شش مظهر چشمه، با فاصله‌ای کمتر از یک کیلومتر از یکدیگر است که در منطقه‌ای به شدت گسلش یافته و دارای جابه‌جایی زیاد، از درون آهک‌های درز و شکاف‌دار بادامو (با سن ژوراسیک)، روی زون گسله گوک، در سطح ظاهر شده‌اند (بربریان و همکاران، ۱۹۷۹). دمای بالای آب (۴۵



شکل ۱. طرحواره دستگاه اندازه‌گیری رادون محلول در آب.

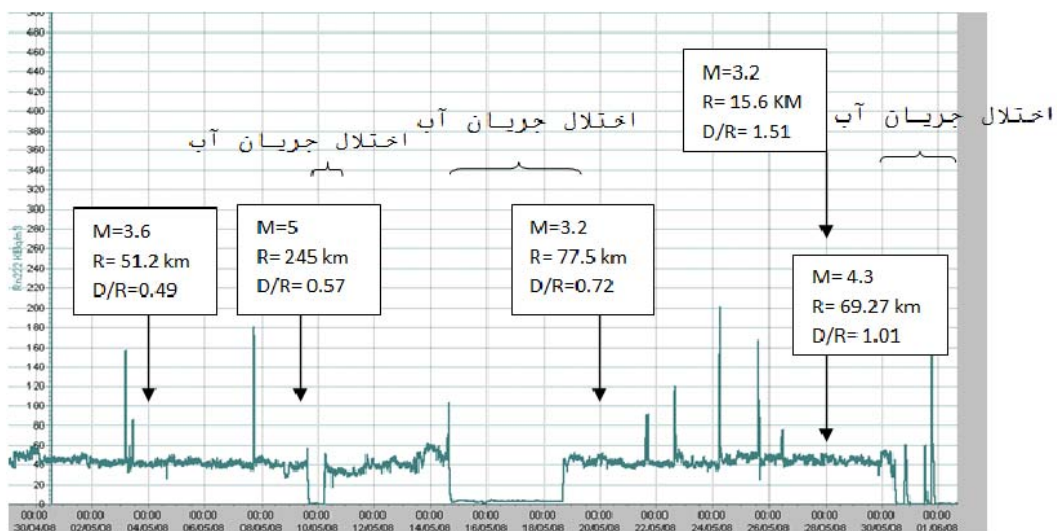


شکل ۲. مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت گاز رادون، از تاریخ ۸۸/۲/۱۱ (۲۰۰۹/۰۵/۰۱) الی ۸۸/۲/۲۹ (۲۰۰۹/۰۵/۱۹). پیکان‌ها زلزله‌های رویداده در این بازه زمانی، به همراه نسبت  $D/R$  و فاصله رو مرکزی آنها از ایستگاه اندازه‌گیری را نشان می‌دهند. همه زلزله‌های رویداده در این مدت زمان که نسبت  $D/R$  بزرگتر از ۰/۵ داشته‌اند، در شکل نشان داده شده‌اند.

## ۲ روش‌شناسی

از آنجاکه همه آشکارسازهای پیوسته گاز رادون، فقط قادر به اندازه‌گیری گاز رادون در فاز هوا هستند، در ابتدا لازم است که گاز رادون از فاز مایع به فاز هوا منتقل شود. برای این منظور، می‌توان از روش حباب‌سازی، پودر کردن و یا از غشا ملکولی استفاده کرد که در این مقاله، از روش پودر کردن استفاده شده است. در این بررسی، به‌منظور اندازه‌گیری رادون محلول در آب، از آشکارساز آلفاگارد استفاده شده است. این دستگاه با قدرت تفکیک ۱ بکرل بر متر مکعب، توانایی تعیین غلظت رادون-۲۲۲ از ۲ تا ۲ میلیون بکرل بر متر مکعب را دارد. آشکارسازی ذرات آلفای ناشی از واپاشی رادون در اتاقک یونش، اساس کار این دستگاه را تشکیل می‌دهد. به‌منظور پایش پیوسته تغییرات غلظت رادون محلول در آبگرم جوشان، دستگاهی براساس نحوه کار آشکارساز آلفاگارد، در مجاورت استخر مجموعه ایجاد شد، که نمودار طرح‌وار آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، آب چشمه قبل از ورود به استخر، به

سمت دستگاه اندازه‌گیری و محفظه استخراج رادون، آورده می‌شود. جریان آب در این محفظه، با استفاده از شناور تنظیم‌کننده سطح آب و خروجی ایجاد شده در پایین ظرف، به میزان ۲ لیتر در دقیقه، تثبیت شده است. در محفظه استخراج، بعد از پودر کردن آب ورودی، رادون از حالت محلول خارج و به همراه هوای بالای ظرف، با مکش پمپ، که در شرایط بی‌دررو (ایزوله) نسبت به هوای اطراف قرار دارد، به سمت آشکارساز کشیده می‌شود. دستگاه آشکارساز به‌گونه‌ای تنظیم شده است که می‌تواند در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای، میزان رادون را اندازه‌گیری کند. نتایج اندازه‌گیری، در حافظه داخلی دستگاه ذخیره و با توجه به ظرفیت آن، پس از ۳۰ روز اندازه‌گیری، اطلاعات به رایانه منتقل می‌شود. از آنجاکه دستگاه اندازه‌گیری، نسبت به رطوبت حساس است، هوای عبوری دارای رادون از محفظه محتوی رطوبت‌گیر عبور داده می‌شود، تا رطوبت آن گرفته شود. در این تحقیق، از بلورهای کلرید کلسیم که توانایی جذب رطوبت را دارند،



شکل ۳. مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت گاز رادون، از تاریخ ۸۷/۲/۱۱ (۲۰۰۸/۰۵/۰۱) الی ۸۷/۳/۱۱ (۲۰۰۸/۰۶/۰۱). پیکان‌ها زلزله‌های رویداده در این بازه.

### ۳ بررسی نتایج اندازه‌گیری غلظت گاز رادون

بروز ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی، به شدت می‌تواند تحت تأثیر شرایط محلی، مانند نوع سنگ، میدان تنش-واتنش، درجه اشباع‌شدگی منافذ از آب و فاکتورهای دیگر قرار گیرد (پیست و همکاران، ۲۰۰۵). براساس رابطه دوپرولسکی (دوپرولسکی و همکاران، ۱۹۷۹) و نظریه تنش-واتنش، شعاع توزین استرین (D) برحسب کیلومتر، تابع بزرگی زلزله،  $M_L$  است به طوری که داریم:

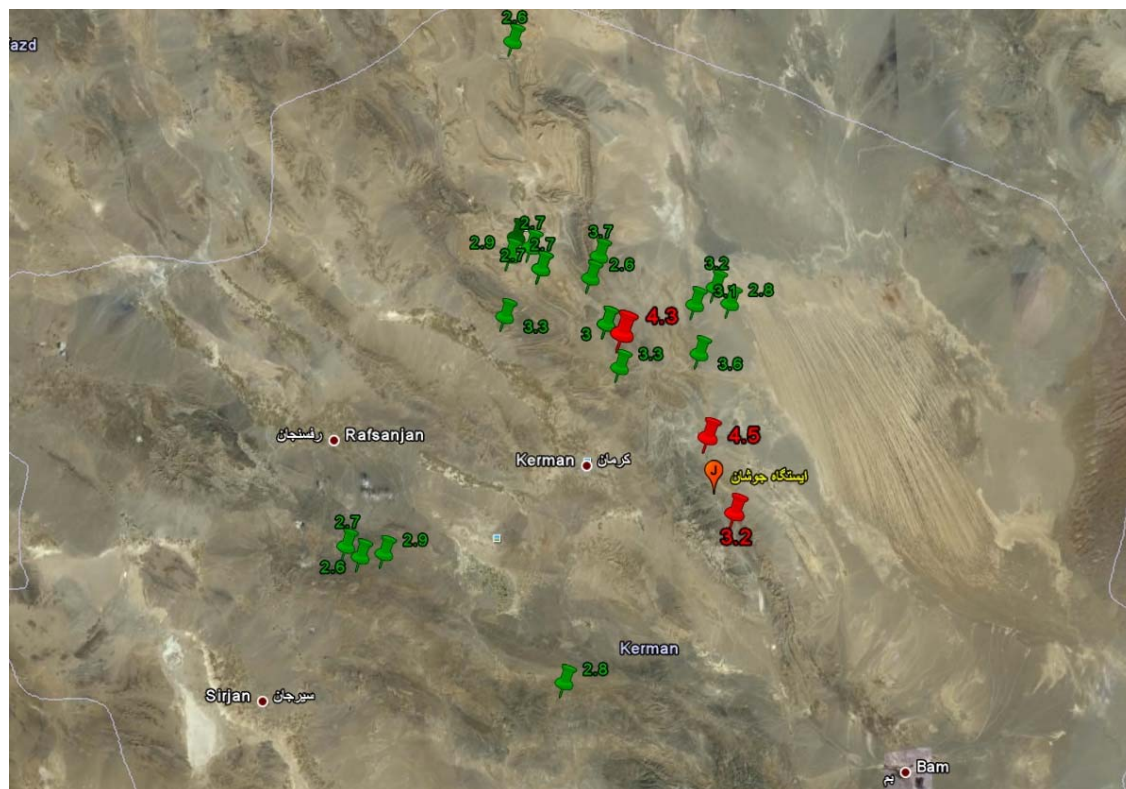
$$D = 10^{0.43M_L} \quad (1)$$

بنابراین در شرایطی که فاصله رومرکز زمین‌لرزه، نسبت به ایستگاه پایش پیش‌نشانگر زلزله، کمتر از شعاع توزین استرین باشد، ناهنجاری در ارتباط با زمین‌لرزه بروز می‌کند (دوپرولسکی و همکاران، ۱۹۷۹).

به عنوان عامل رطوبت‌گیر استفاده شده است. این مواد، در نتیجه جذب رطوبت، تغییر رنگ می‌دهند و باید به صورت متناوب تعویض گردند. همچنین، یک محفظه اطمینان نیز قبل از رسیدن جریان هوا به رطوبت‌گیر، در دستگاه تعبیه شده است تا آب حاصل از میعان در آن جمع‌آوری شود. بر مبنای به چینه‌ش فوق، داده‌های اندازه‌گیری غلظت گاز رادون محلول در آب چشمه، مربوط به دوره زمانی ۸۸/۲/۲۹ تا ۸۸/۲/۱۱، در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است. در محدوده زمانی عملیات برداشت، گاهی طرح با قطع مقطعی جریان آب دستگاه مواجه می‌شد که این بازه کوتاه را می‌توان در مجموعه تاثیرات محیطی بر روند انجام طرح دسته‌بندی کرد و قاعدتاً با توجه به کارکرد دستگاه در این بازه کوتاه، برداشت امکان‌پذیر نمی‌بود. این مسئله به وضوح در قسمت‌های کوچکی از شکل شماره ۳ دیده می‌شود.



شکل ۴. موقعیت ایستگاه جوشان، همراه با محل و بزرگی زلزله‌های روی داده از از تاریخ ۸۸/۲/۱۱ الی ۸۸/۳/۸



شکل ۵. موقعیت ایستگاه جوشان، همراه با محل و بزرگی زلزله‌های روی داده، از ازن تاریخ ۸۷/۲/۱۱ الی ۸۷/۳/۱۱

گرفته‌است (دوبرولوسکی و همکاران، ۱۹۷۹). از این رو، افزایش غلظت رادون در تاریخ‌های ۸۸/۲/۱۵ و ۸۸/۲/۱۹ تا میزان حدوداً  $200 \text{ kBq/m}^3$  را می‌توان به مثابه بی‌هنجاری ایجاد شده از این دو زلزله، در نظر گرفت. بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در داده‌های اندازه‌گیری غلظت گاز رادون مربوط به دوره‌های پیشین (نمودار شکل ۳)، همچنین رخداد چندین زلزله (شکل ۵) با نسبت  $D/R$  بزرگ‌تر از یک نیز موید این ارتباط است (اطلاعات مربوط به زلزله‌های پیش‌گفته در جدول شماره ۲ آورده شده است). برای توجیه دیگر بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در شکل فوق، در نظر گرفتن زلزله‌های با نسبت  $D/R$  بزرگ‌تر از نیم، می‌تواند راه‌گشا باشد که این خود دلیلی برای بررسی مجدد و اصلاح فرمول دوبرولوسکی، برای این منطقه است

در جدول ۱، زلزله‌های رویداده در مجاورت ایستگاه جوشان، از تاریخ ۸۸/۲/۱۱ الی ۸۸/۳/۸، همراه با فاصله رومرکزی آنها تا ایستگاه (R) و میدان یا شعاع توزین استرین (D)، برحسب کیلومتر آورده شده است. در شکل ۴ نیز، موقعیت ایستگاه جوشان نسبت به زلزله‌های رویداده مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به رابطه دوبرولوسکی، شعاع توزین استرین برای زلزله‌های ۴/۹ و ۴/۳ ریشتری، که در تاریخ‌های ۸۸/۲/۲۱ و ۸۸/۲/۲۲ به وقوع پیوست به ترتیب برابر با ۱۲۷/۹ و ۷۰/۶ کیلومتر، به دست آمده است. از طرفی، فاصله رومرکزی این دو زمین‌لرزه تا ایستگاه موردنظر، به ترتیب ۲۱ و ۵ کیلومتر است. بنابراین حاصل تقسیم  $D/R$  برای این دو زلزله، بزرگ‌تر از یک است. به عبارتی، این ایستگاه در میدان استرین با تاثیرپذیری از این دو زلزله قرار

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های رخ داده در مجاورت ایستگاه رادون‌سنجی از تاریخ ۸۸/۲/۱۱ الی ۸۸/۳/۸

نسبت D/R	میدان استرین <sup>۱</sup> (D)	فاصله تا ایستگاه بر حسب کیلومتر (R)	عمق (km)	بزرگی *	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	زمان (محلی)	تاریخ (خورشیدی)
۰/۶۲	۳۸/۹	۶۲	۱۳	۳/۷	۲۹/۹۶	۵۷/۰۰	۰۵:۴۰	۸۸/۲/۱۴
۰/۱۷	۱۱/۸	۶۸	۱۰	۲/۵	۲۹/۹۳	۵۶/۹۵	۰۷:۲۰	۸۸/۲/۱۴
۰/۱۳	۱۳/۱	۹۶	۲	۲/۶	۳۰/۸۰	۵۶/۹۳	۱۸:۲۵	۸۸/۲/۱۴
۰/۱۳	۱۵/۹	۱۲۱	۱۰	۲/۸	۲۹/۹۸	۵۶/۳۶	۱۲:۱۰	۸۸/۲/۱۹
۰/۲۶	۹/۷	۳۶	۱۸	۲/۳	۳۰/۴۰	۵۷/۵۴	۲۲:۴۱	۸۸/۲/۱۹
۶/۰۹	۱۲۷/۹	۲۱	۱۳	۴/۹	۳۰/۳۵	۵۷/۶۲	۰۶:۴۴	۸۸/۲/۲۱
۰/۰۸	۱۱/۸	۱۴۶	۱۰	۲/۵	۲۹/۸۹	۵۶/۱۱	۱۱:۵۶	۸۸/۲/۲۱
۱۴/۱۲	۷۰/۶	۵	۳	۴/۳	۳۰/۱۶	۵۷/۶۵	۱۱:۰۰	۸۸/۲/۲۲
۰/۱۳	۱۴/۴	۱۰۴	۱۷	۲/۷	۲۹/۶۹	۵۶/۶۶	۰۶:۲۶	۸۸/۲/۲۴
۰/۰۸	۱۳/۱	۱۴۸	۱۰	۲/۶	۳۰/۸۱	۵۶/۲۶	۱۵:۵۳	۸۸/۲/۲۸
۰/۱۵	۱۴/۴	۹۶	۴	۲/۷	۳۰/۷۳	۵۶/۸۴	۱۲:۲۰	۸۸/۲/۳۱
۰/۰۵	۷/۹	۱۳۷	۱۰	۲/۱	۳۰/۲۰	۵۶/۱۷	۱۱:۵۹	۸۸/۳/۲
۰/۰۸	۱۳/۱	۱۴۷	۱۰	۲/۶	۳۰/۷۴	۵۶/۲۲	۱۵:۲۳	۸۸/۳/۲
۰/۷۲	۲۱/۵	۲۹/۵	۱۶	۳/۱	۲۹/۹۴	۵۷/۷۷	۰۸:۱۳	۸۸/۳/۸

\* بزرگی زمین‌لرزه‌ها برگرفته از IRSC: مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (<http://irsc.ut.ac.ir>) است.  
<sup>۱</sup> میدان استرین براساس رابطه دوبرولسکی ( $D=10^{0.43M}$ ) محاسبه شده است.

جدول ۲. مشخصات تعدادی از زلزله‌های رخ داده در مجاورت ایستگاه رادون‌سنجی از تاریخ ۸۷/۲/۱۳ الی ۸۷/۳/۱۶

نسبت D/R	میدان استرین <sup>۱</sup> (D)	فاصله تا ایستگاه بر حسب کیلومتر (R)	عمق (km)	بزرگی * (ریشتر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	زمان (محلی)	تاریخ (خورشیدی)
۰/۰۹	۲۳/۷	۲۵۱/۲	۳۱	۳/۲	۲۸/۰۶	۵۶/۶۲	۰۱:۱۲	۸۷/۲/۱۳
۰/۴۹	۳۵/۳	۵۱/۲	۲۲	۳/۶	۳۰/۶۲	۵۷/۵۴	۱۲:۴۶	۸۷/۲/۱۵
۰/۲۲	۱۵/۹	۷۱/۱۶	۱۸	۲/۸	۳۰/۰۸	۵۷/۶۸	۱۹:۴۱	۸۸/۲/۱۵
۰/۵۷	۱۴۱/۲	۲۴۵	۳۳	۵	۲۷/۹۵	۵۷/۸۲	۰۰:۲۰	۸۷/۲/۱۹
۰/۱	۲۱/۵	۲۰۴	۲۶	۳/۱	۲۸/۳۴	۵۷/۳۴	۱۸:۵۴	۸۷/۲/۱۹
۰/۱۳	۱۴/۴	۱۱۰	۱۰	۲/۷	۳۰/۹۲	۵۶/۸۵	۱۳:۵۴	۸۷/۲/۲۱
۰/۲۵	۱۹/۴	۷۷/۱۹	۶	۳	۳۰/۷۴	۵۷/۱۵	۱۵:۵۴	۸۷/۲/۲۷
۰/۱۲	۱۴/۴	۱۱۱	۲۱	۲/۷	۳۰/۹۵	۵۶/۸۸	۱۵:۳۷	۸۷/۲/۲۸
۰/۰۹	۱۳/۱	۱۴۸/۵	۱۰	۲/۶	۲۹/۹۲	۵۶/۰۸	۱۲:۹	۸۷/۲/۳۱
۰/۳	۲۱/۵	۷۰/۸۴	۳۶	۳/۱	۳۰/۸۰	۵۷/۵۳	۰۵:۳۰	۸۷/۳/۱
۰/۷۲	۲۳/۷	۷۷/۵	۱۰	۳/۲	۳۰/۸۶	۵۷/۶۲	۰۷:۵۲	۸۷/۳/۱



ادامه جدول ۲.

۰/۲	۴۷/۵	۲۳۷	۳	۳/۹	۲۸/۲۱	۵۶/۵۹	۰۱:۳۹	۸۷/۳/۴
۰/۱۲	۱۴/۴	۱۲۰/۵	۲	۲/۷	۳۱/۰۳	۵۶/۸۴	۲۲:۱۸	۸۷/۳/۵
۱/۵۱	۲۳/۷	۱۵/۶	۳	۳/۲	۳۰/۰۳	۵۷/۶۶	۰۹:۰۰	۸۷/۳/۷
۰/۱۲	۱۷/۶	۱۳۹	۸	۲/۹	۲۹/۹۳	۵۶/۱۸	۱۲:۰۸	۸۷/۳/۷
۱/۰۱	۷۰/۶	۶۹/۲۷	۲۷	۴/۳	۳۰/۶۹	۵۷/۲۱	۲۱:۳۷	۸۷/۳/۷
۵/۰۷	۸۶	۱۶/۹۵	۱۳	۴/۵	۳۰/۳۱	۵۷/۵۶	۰۵:۰۸	۸۷/۳/۱۵
۰/۳۸	۳۸/۹	۱۰۲	۱	۳/۷	۳۰/۹۹	۵۷/۱۳	۱۳:۰۹	۸۷/۳/۱۶

\* بزرگی زمین‌لرزه‌ها برگرفته از IRSC : مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (<http://irsc.ut.ac.ir>) است.  
 ۱ میدان استرین براساس فرمول دوپرولسکی ( $D=10^{0.43M}$ ) محاسبه شده است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

اصلاح داشته‌باشد، در ذهن تداعی می‌شود. با این حال برای این اقدام، به ثبت و بررسی داده‌های بیشتری نیاز است.

با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در محدوده‌های زمانی ۱۹ روزه (از تاریخ ۸۸/۲/۱۱ الی ۸۸/۲/۲۹) در ایستگاه پایش پیوسته گاز رادون واقع در چشمه آبگرم جوشان و قرار گرفتن میدان استرین زلزله‌های ۴/۹ ریشتری شهاداد در تاریخ ۸۸/۲/۲۱ و ۴/۳ ریشتری سیرچ در تاریخ ۸۸/۲/۲۲ که به ترتیب، در فاصله‌های رومرکزی ۲۱ و ۵ کیلومتری ایستگاه پیش‌گفته رخ داده‌اند، افزایش غلظت گاز رادون در تاریخ‌های ۸۸/۲/۱۵ و ۸۸/۲/۱۹ تا میزان حدوداً  $200 \text{ kBq/m}^3$ ، با تغییرات نسبی ۴۰ درصدی را می‌توان به منزله ناهنجاری ایجاد شده یا بروز بی‌هنجاری در نظر گرفت، که به ترتیب، پس از شش روز از مشاهده بی‌هنجاری‌های بروز داده شده در تاریخ ۸۸/۲/۱۵، زلزله شهاداد به بزرگی ۴/۹ ریشتر در تاریخ ۸۸/۲/۲۱ و بعد از سه روز از بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در تاریخ ۸۸/۲/۱۹، زلزله سیرچ به بزرگی ۴/۳ ریشتر در تاریخ ۸۸/۲/۲۲ رخ داده‌اند. داده‌های فوق نیز، همانند داده‌های دوره‌های پیشین، به خوبی نشان می‌دهد که بین تغییرات نسبی گاز رادون و رویداد زلزله در این منطقه، ارتباط وجود دارد. با توجه به شکل ۲ این مسئله که ممکن است فرمول دوپرولسکی برای این منطقه، نیاز به بررسی مجدد و

#### منابع

- شاهپسندزاده، م. و حیدری، م.، ۱۳۷۵، بررسی مقدماتی لرزه‌خیزی، لرزه‌زمین‌ساخت و خطر رویداد زمین‌لرزه - گسلش در پهنه استان کرمان، موسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- عباس‌نژاد، ا. و داستانبور، م.، ۱۳۷۸، زلزله‌ها و زلزله‌خیزی استان کرمان، انتشارات مرکز کرمان‌شناسی.
- Hedervari, P., 1977: Earthquake prediction. *Engineering Geology*; **11**(2), 149-151.
- Robert L, F., 1988: Radon in the environment—Opportunities and hazards. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **14**(4), 421-435.
- Thomas, D., 1988, Geochemical precursors to seismic activity. *Pure and Applied Geophysics*, **126**(2), 241-266.
- Virk, H. S. and Singh, B., 1993 Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena. *Tectonophysics*, **227**(1-4), 215-224.
- King, C. Y., Zhang, W. and King, B. S., 1993, Radon anomalies on three kinds of faults in California. *Pure and Applied Geophysics*, **141**(1), 111-124.

- Environmental Research, **101**(3), 323-333.
- Vinson, DS, Vengosh, A., Hirschfeld, D. and Dwyer, GS., 2009; Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA). *Chemical Geology*, **260**(3-4), 159-171.
- Borisov, VP. and Yakovleva, VS., 2005, Comparative analysis of radon sources' contribution into total radon indoor levels for Altai and Tomsk regions of Russian Federation. *Radiation Measurements*; **40**(2-6), 682-685.
- Oikawa, S., N., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., and Sato, K., et al., 2003, A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*; **65**(2), 203-213.
- Toutain, J. P. and Baubron, J. C., 1999, Gas geochemistry and seismotectonics: a review, *Tectonophysics J.*, **304**, 1-27.
- Negarestani, A., Setayeshi, S., Ghannadi-Maragheh, M. and Akashe, B., 2003, Estimation of the radon concentration in soil related to the environmental parameters by a modified Adaline neural network. *Applied Radiation and Isotopes*; **58**(2), 269-273.
- Berberian, M., Asudeh, I. and Arshadi, S., 1979, Surface rupture and mechanism of the Bob-Tangol (southeastern Iran) earthquake of 19 December 1977. *Earth and Planetary Science Letters*; **42**(3), 456-462.
- Moosavirad, SM., Janardhana, MR., Sethumadhav, MS., Moghadam, MR. and Shankara M., 2011, Geochemistry of lower Jurassic shales of the Shemshak Formation, Kerman Province, Central Iran: Provenance, source weathering and tectonic setting. *Chemie der Erde-Geochemistry*; **71**(3), 279-288.
- Ulomov, V. I. and Mavashev, B. Z., 1967, Forerunners of the Tashkent earthquake: *Izvestia Akadamiyi Nauk Uzbekistan SSR*, 188-200.
- Woith, H., Pekdeger, A. and Zschau, J., 1991, Groundwater radon anomalies in space and time: a contribution to the joint Turkish-German earthquake prediction project.
- Wyss, M., 1997, Second round of evaluations of proposed earthquake precursors: *Pure and Appl. Geophys J.*, **149**, 3-16.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B. E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T. J. and Baker, C., 2001, The 1998 March 14 Fandoqa earthquake ( $M_w$  6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone: *Geophys. J. Int.* **146**, 371-398.
- Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I. and Miachin, V. I., 1979, Estimation of the size of the earthquake preparation zones: *Pure and Applied Geophysics*, **117**, 1025-1044.
- Fleischer, R. L. and Magro-Campero, A., 1985, Association of subsurface radon changes in Alaska and the northeastern United States with earthquakes: *Geochemical et Cosmochemical Acta*, **49**, 1061-1071.
- King, C. Y., 1980, Episodic Radon changes in subsurface soil-gas along active faults and possible relation to earthquakes: *Journal of Geophysical Research*, **85**, 3065-3079.
- Popit, A., Vapotic, J. and Dolenc, T., 2005, Geochemical and Geophysical monitoring of thermal waters in Slovenia in relation to seismic activity: *Annals of Geophysics*, **48**(1), 73-83.
- Segovia, N., De la Cruz Reyna, S., Mena, M., Ramos, E., Monnin, M. and Seidel, J. L., 1989, Radon in soil anomaly observed at Los Azufres Geothermal field, Michoacan: a possible precursors of the 1985 Mexico earthquake ( $M_s=8.1$ ): *Natural Hazards*, **1**, 319-329.
- Shapiro, M. H., Melvin, J. D., Copping, N. A., Tombrell, T. A. and Withcombe, J. H., 1989, Automated radon- thoron monitoring for earthquake prediction research.
- Diyun, C., Xingbao Y. and Ruiying, H., 2005, Indoor radon survey in indoor environments in Zhuhai city, China. *Radiation Measurements*; **39**(2): 205-207.
- Zhuo, W., Guo, Q., Chen, B. and Cheng, G., 2008, Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China. *Journal of Environmental Radioactivity*; **99**(7), 1143-1148.
- Harris, SA, Billmeyer, ER. and Robinson, MA., 2006; Evaluation of repeated measurements of radon-222 concentrations in well water sampled from bedrock aquifers of the Piedmont near Richmond, Virginia, USA: Effects of lithology and well characteristics.