



## اثرهای زیست محیطی گاز رادون - ۲۲۲ و اهمیت توجه به آن در ایران

احمد عباس نژاد\*

بخش زمین شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صندوق پستی: ۱۳۳-۷۶۱۷۵، ایران - کرمان

**چکیده:** ارزیابی اثرهای گاز رادون طبیعی در بروز سرطان ریه، کاربرد رادون در پیش بینی زمین لرزه و اکتشاف اورانیوم، نفت و آبهای زیرزمینی در بسیاری از کشورهای پیشرفته مسائل شناخته شده و مهمی می باشد. اما به نظر می رسد در ایران تاکنون به این مسائل توجه کافی مبذول نشده است. در این مقاله، با بررسی منابع متعدد و جدید، نحوه ایجاد رادون در خاک و آب، ارتباط رادون با سرطان ریه و چگونگی کاستن خطر رادون مرور شده اند. همچنین، به جنبه های مثبت و کاربردی آن نیز اشاره شده است. با این امید که بتوان سطح دانش موجود در مورد رادون را بالا برد و اهمیت پژوهش در این زمینه را نشان داد.

**واژه های کلیدی:** رادون، سرطان ریه، پرتوزایی طبیعی، کیفیت فضای بسته، پیش بینی زمین لرزه

## Environmental Impacts and Implications of The Radon-222, and its Urgency Attention in Iran

A. Abbasnejhad\*

Geology Department, Shahid Bahonar University, P.O.Box: 76175-133, Kerman – Iran

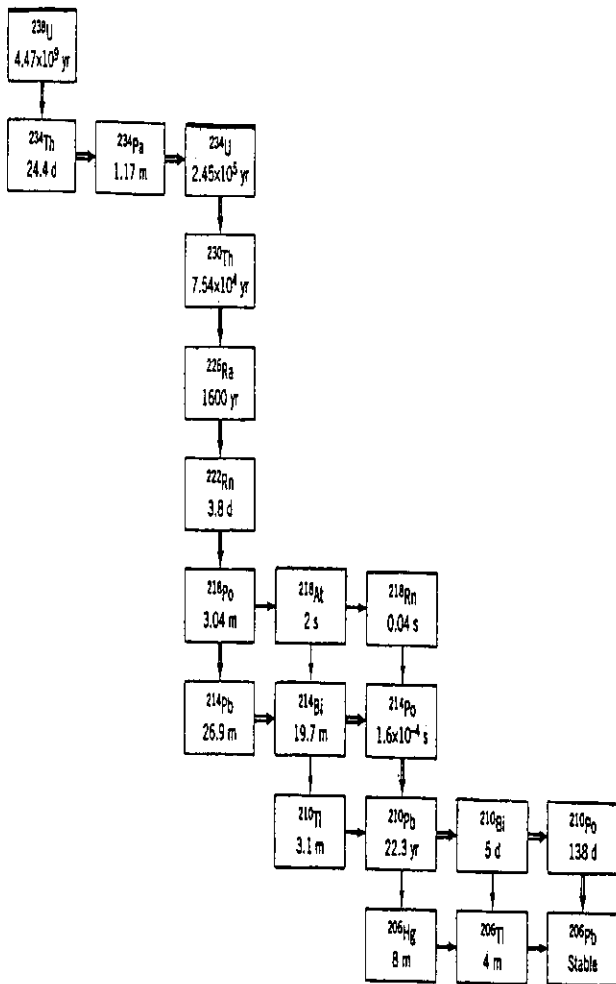
**Abstract:** Appraisal of the natural radon gas effects on lung cancer, and its applications for earthquake prediction and uranium, petroleum and ground water exploration are well known in many advanced countries, However, it has been almost neglected in Iran. So, radon production mechanisms in soils and rocks, radon and lung cancer, and radon hazard mitigation are reviewed. In addition, the noted positive and applied aspects of radon are discussed, hoping to show advantages of investigation in this field of study to be carried out in Iran.

**Keywords:** radon, lung cancer, natural radiogeny, indoor quality, earthquake prediction

\* email:aabasnejad@yahoo.com

۱- مقدمه

رادون تأمین شده باشند ناچیز است، ولی غلظت آن در آبهای که از چاهها استخراج می‌شوند، اغلب بالا است [۲۶]. اورانیوم موجود در خاک و سنگ منبع اصلی تولید رادون است. با توجه به اینکه غلظت متوسط آن در پوسته زمین ۲/۷ppm برآورده شده است [۲۲]، در خاک مزرعه‌ای به ضخامت ۱ متر و مساحت ۱۰۰ هکتار، حدود ۲/۸ تن اورانیوم وجود خواهد داشت که منبع تولید رادون موجود در خاک است. البته غلظت اورانیوم در بعضی از سنگها بیش از غلظت متوسط پیش گفته است. به عنوان مثال، مقدار متوسط آن در



شکل ۱- رشته واپاشی  $^{238}\text{U}$  و تبدیل آن به  $^{206}\text{Pb}$  پایدار. درون مستطیل‌ها علاوه بر نام هر عنصر نیمه عمر آن نیز درج شده است. واپاشی‌های آلفایی و بتایی به ترتیب با پیکان‌های عمودی و افقی نشان داده شده‌اند. بخش عمده واپاشی در مسیری صورت می‌گیرد که با پیکان دوگانه نشان داده شده است. علامت  $\text{m.d.yr}$  به ترتیب معرف سال، روز، دقیقه و ثانیه می‌باشند [۱۷].

رادون ( $^{222}\text{Rn}$ ) یک گاز پرتوزای طبیعی بدون رنگ و بو و مزه، با نقطه میعان  $-62$  درجه سانتیگراد و چگالی ۸ برابر هوا است. این گاز محصولی از سری واپاشی اورانیوم بوده و تقریباً در میان زنجیره‌ای از تغییرات پرتوزایی قرار گرفته است که با  $^{238}\text{U}$  شروع و به  $^{206}\text{Pb}$  ختم می‌شود (شکل ۱). نیمه عمر آن  $3/82$  روز است و از واپاشی آن ایزوتوپهای دیگری با نیمه عمرهای کوتاه‌تر تولید می‌شوند [۲۴]. رادون در سال ۱۹۰۰ میلادی توسط ارنست درن<sup>(۱)</sup> کشف شد و با توجه به اینکه در گروه گازهای بی‌اثر قرار می‌گیرد، میل ترکیبی آن ناچیز است.

عنصری که رادون نامیده می‌شود و عدد اتمی آن ۸۶ است ۲۷ ایزوتوپ دارد که از  $^{200}\text{Rn}$  شروع و به  $^{226}\text{Rn}$  ختم می‌شوند و همه آنها ناپایدارند. از این ایزوتوپها، تنها  $^{222}\text{Rn}$ ،  $^{220}\text{Rn}$ ،  $^{218}\text{Rn}$  در طبیعت تولید می‌شوند [۱۷]. نیمه عمر  $^{222}\text{Rn}$  که تورون نامیده می‌شود  $3/55$  ثانیه است و از واپاشی توریم ( $^{232}\text{Th}$ ) حاصل می‌گردد.  $^{218}\text{Rn}$ ، یا آکتینون، با نیمه عمر  $3/92$  ثانیه، محصول واپاشی  $^{235}\text{U}$  است، بنابراین، از بین این سه ایزوتوپ طبیعی رادون، تنها  $^{222}\text{Rn}$  که نیمه عمر آن  $3/82$  روز است و از واپاشی  $^{238}\text{U}$  تولید می‌شود فرصت رسیدن به سطح زمین و تجمع در ساختمان‌ها را دارد [۳۹]. نکته جالبتر اینکه محصولات واپاشی آن، یعنی  $^{218}\text{Po}$  با نیمه عمر  $3/05$  دقیقه،  $^{214}\text{Po}$  با نیمه عمر  $10^{-4} \times 1/6$  ثانیه،  $^{214}\text{Pb}$  با نیمه عمر  $26/8$  دقیقه و  $^{214}\text{Bi}$  با نیمه عمر  $19/7$  دقیقه همگی جامدند و با تنفس هوای محتوی  $^{222}\text{Rn}$  و واپاشی آن در ریه، تولید شده و به سطح نسوج آن می‌چسبند. ذرات آلفای ناشی از واپاشی آنها باعث آسیب رساندن، و احتمالاً بروز سرطان در افراد می‌شوند [۳۹]. خطر بالقوه  $^{218}\text{Po}$  و  $^{214}\text{Pb}$  حدود ۲۰ برابر بیش از خود رادون\* است.

اگر تولید رادون استمرار نداشته باشد، با توجه به کوتاه بودن نیمه عمر آن، مقدار ذخیره‌اش در هر محیط طی چند هفته تمام می‌شود، اما واپاشی  $^{226}\text{Ra}$  موجود در خاک و سنگ، که خود محصول واپاشی  $^{238}\text{U}$  است، باعث استمرار تولید آن در زیر سطح زمین می‌شود. به همین دلیل غلظت آن در آبهای شبکه آب مشروب شهرها، حتی اگر آنها از آبهای زیرزمینی نسبتاً غنی از

\* - خاطر نشان می‌سازد که از این پس هر جادر این مقاله به رادون اشاره شده منظور

یافت، ولی در رطوبتهای بالاتر از حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، به علت کاهش شدید سرعت انتشار رادون در آب درون خاک، غلظت آن در هوای درون خاک نیز کاهش خواهد یافت [۱۷].

غلظت رادون در هوای درون خاک حدود ۷۴۰ تا ۳۷۰۰۰۰۰ بکرل در متر مکعب گزارش شده است. ولی معمولاً در محدوده ۷۴۰۰ تا ۷۴۰۰۰ بکرل در متر مکعب نوسان می‌کند [۱۳] و تابع غلظت اورانیوم و رادیوم و میزان تخلخل و تهویه خاک است. اگر خاک به خوبی تهویه نشود غلظت رادون در آن افزایش می‌یابد. به همین جهت، در عرضهای جغرافیایی بالا، یخزدگی خاک مانع خروج رادون می‌شود و در روزهایی از سال که دمای محیط افزایش می‌یابد لایه یخزده ذوب شده و رادون زیادی از خاک خارج می‌گردد؛ این ایام را روزهای رادونی نامیده‌اند. با سنجش پرتوهای گاما به وسیله طیف‌سنج هوایی می‌توان مناطق خروج رادون را در روزهای رادونی مشخص کرد [۱۶].

غلظت رادون در آبهای زیرزمینی متأثر از شرایط هیدرودینامیکی، ساختار زمین شناختی (به ویژه شکل و وضعیت منافذ و شکاف سنگها)، کانی شناسی اورانیوم و رادیوم و غلظت آنها در خاک و سنگ بوده [۴] و اغلب در آبهایی که در سنگهای آذرین نفوذ می‌کنند بیشتر است [۴۸]. براساس مطالعات راجرز<sup>(۳)</sup> اگر سنگ تشکیل دهنده یک سفره آب زیر زمینی دارای ۱ میلی گرم اورانیوم در هر کیلوگرم باشد غلظت رادون در آب زیر زمینی درون سنگ به بیش از ۳۰۰۰۰ بکرل در متر مکعب خواهد رسید [۴۱]. مقدار آن در آبهای شور حوضه‌های نفتی بیش از آبهای زیرزمینی در اعماق کم است [۳۴]. علت آن عدم تهویه، و در نتیجه، عدم امکان خروج رادون از آن آبها است. به طور کلی، دامنه تغییرات رادون در آبهای زیرزمینی از ۳۷۰۰ تا  $111 \times 10^6$  بکرل در هر مترمکعب گزارش شده است [۱۳]. خاطر نشان می‌سازد که رادون موجود در آبهای زیرزمینی ممکن است ابتدا وارد هوای درون خاک و سپس وارد ساختمانها شود، و یا در صورتیکه آب یک چاه بلافاصله بعد از پمپاژ وارد ساختمانی شود، رادون از آن خارج شده و در ساختمان پخش گردد.

رادون در نفت و گاز طبیعی نیز وجود دارد. غلظت آن در نفت خام در حد ۳/۷ تا ۱۵ بکرل در کیلوگرم گزارش شده است [۳۴] که قسمت عمده آن در مرحله جداسازی گاز طبیعی از آن

گرانیت ppm ۴/۷ بوده و ممکن است به ppm ۲۰-۴۰ هم برسد [۱۷].

## ۲- غلظت گاز رادون در محیطهای مختلف

یکی از عوامل مهم در غلظت رادون، میزان اورانیوم موجود در خاک و سنگ است. عیار اورانیوم در سنگهای آذرین اسیدی، مانند گرانیت، بیش از انواع سنگهای بازی، مانند بازالت، است. مقدار آن در شیلهای تیره و سنگهای رسوبی غنی از فسفات قابل توجه است، ولی در سنگهای رسوبی دیگر معمولاً اندک است. مقدار اورانیوم در سنگهای دگرگونی تابع نوع سنگ، آذرین یا رسوبی اولیه است، ولی معمولاً گنایس و شیست از مرمر و کوارتزیت غنی‌ترند [۹، ۱۳، ۲۲].

فرآیندی که در جریان آن رادون از مواد جامد تشکیل دهنده خاک و سنگ به منافذ آنها انتقال می‌یابد "پس زدن آلفا"<sup>(۲)</sup> نام دارد [۱۷]؛ بدین ترتیب که در حین تجزیه رادیوم و تولید رادون، ذره آلفا از هسته آن به بیرون پرتاب می‌شود. در نتیجه اتم رادون حاصل از این واپاشی با نیرویی درحد  $10^4$  تا  $10^5$  برابر انرژی متوسط پیوندهای شیمیایی در خلاف جهت پرتاب ذره آلفا پس‌زده می‌شود. اتم رادون پس‌زده ممکن است حدود ۲۰ تا ۷۰ نانومتر درون ماده جامد (کانی) جابجا شود. اگر محل تولید رادون از سطح کانی بیش از ۲۰ تا ۷۰ نانومتر فاصله داشته باشد اتمهای رادون از کانی خارج نخواهند شد. در غیراینصورت، رادون خارج شده از کانی، یا به بلور مجاور برخورد کرده و درون آن متوقف می‌شود و یا در منافذ بین ذرات خاک و سنگ نفوذ کرده متوقف می‌گردد. نکته جالب این است که اگر در این منافذ هوا وجود داشته باشد مقدار جذب رادون در آنها کم بوده و احتمالاً پس از عبور از آنها به دانه‌های مجاور برخورد کرده و جذب آنها می‌شود. اما اگر در منافذ آب وجود داشته باشد، رادون جذب آن می‌شود. برای جذب رادون نفوذی وجود قشری از آب به ضخامت ۰/۱ میکرون در سطح ذرات خاک و سنگ کفایت می‌کند [۱۷].

چون میزان انتشار رادون در آب  $10^4$  مرتبه کمتر از هوا است، می‌توان نتیجه گرفت که اگر رطوبت خاک و سنگ در حد مناسب باشد، میزان جذب رادون در هوای مرطوب درون خلل و فرج خاک بالا رفته و به اندازه ۵۰ تا ۲۵۰ درصد افزایش خواهد

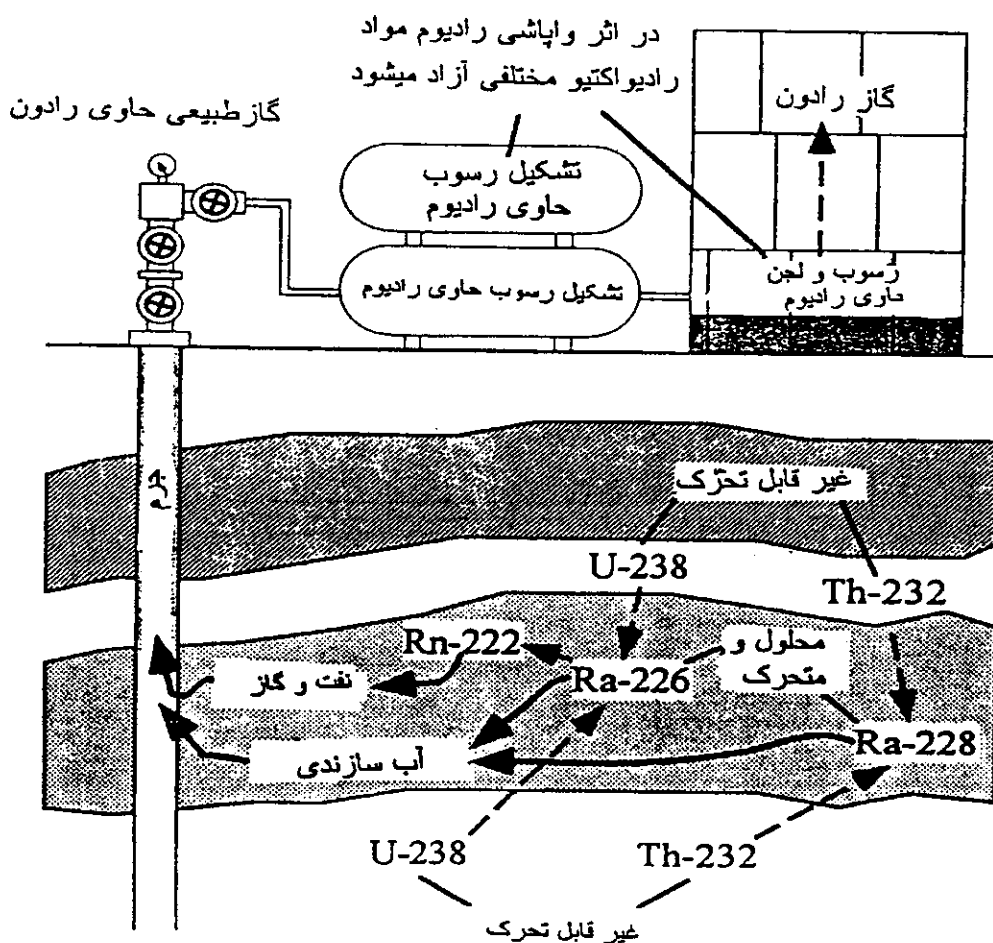


خاک و سنگ وارد ساختمان می‌شود، گرچه ممکن است آب زیر زمینی مورد مصرف در ساختمان و مصالح ساختمانی نیز در تولید آن مؤثر باشند [۲۴]. راههای ورود رادون به ساختمانها در شکل ۳ با جزئیات بیشتر نشان داده شده است.

با توجه به اینکه رادون موجود در منافذ خاک و سنگ منبع اصلی رادون درون ساختمانها است، نحوه ورود به ساختمان و عوامل مؤثر در آن اهمیت دارند. قبلاً اشاره شد که تنها قسمت اندکی از رادون حاصل از واپاشی  $^{226}\text{Ra}$  موجود در خاک و سنگ وارد منافذ خاک گردیده و جابجا می‌شود. سهم این قسمت را با ضریب متصاعد شدن<sup>(۴)</sup> می‌سنجند، که مقدارش تابع اندازه ذرات، ساختمان و مقدار آب خاک است [۲۹]. رادونی که وارد منافذ خاک می‌شود، به صورتهای انتشار و همرفت

جدا می‌شود. شکل ۲، پرتوزایی طبیعی را که رادون یکی از منابع آن است در نفت و گاز طبیعی نشان می‌دهد [۴۸]. چون معمولاً از مرحله خروج هیدروکربورها از چاه تا مصرف آنها در ساختمانها مدت نسبتاً طولانی سپری می‌شود، مقدار رادون در آنها بسیار کاهش یافته و تقریباً بی‌خطر می‌شوند.

غلظت رادون در هوای عادی (فضای آزاد) به علت حجم زیاد و حرکت مداوم آن معمولاً کمتر از ۱۵ بکرل در متر مکعب بوده [۱۷] و در این حالت تقریباً بی‌خطر است. ولی مقدار آن در فضای بسته (هوای داخل ساختمانها) به مراتب بالاتر بوده و در حدود ۳۷ تا ۱۱۱۰۰۰ بکرل در متر مکعب گزارش شده است. متوسط غلظت رادون در این فضاها معمولاً از ۳۷ تا ۷۴ بکرل در متر مکعب است [۱۳] و قسمت عمده آن از طریق منافذ



شکل ۲- راههای ورود عناصر پرتوزا (رادایوم و رادون) به منابع نفت و گاز [۴۸].



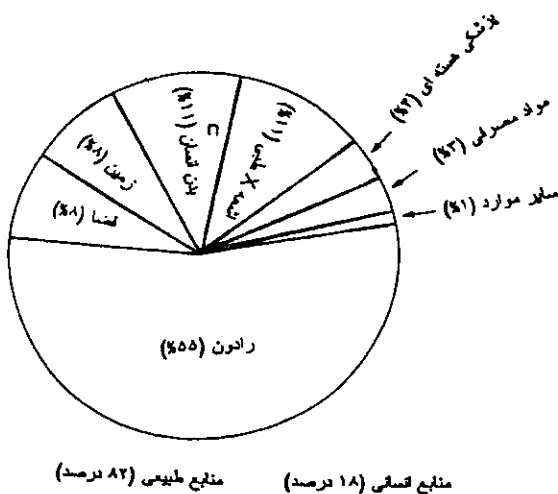
می‌یابد؛ علاوه بر این در روز به سبب باز و بسته شدن درها مقداری از آن تخلیه می‌شود [۳۹]. غلظت رادون در فصلهای مختلف سال نیز تغییرپذیر است: در تابستان که تبادل هوا از طریق پنجره‌ها و کولرها بخوبی انجام می‌شود غلظت آن کمتر خواهد بود [۱۳]. بطورکلی، هر اقدامی که باعث کاهش فشار هوا در داخل ساختمان شود به ورود رادون از خاک به ساختمان کمک خواهد کرد [۳۱].

### ۳- خطر گاز رادون

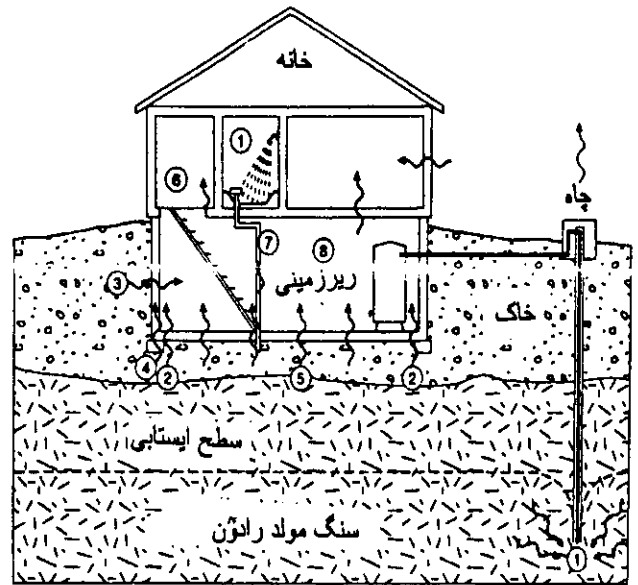
به منظور نشان دادن اهمیت خطر گاز رادون نسبت به سایر منابع پرتوزا، در شکل ۴ سهم منابع مختلف در میزان پرتوگیری هر فرد در آمریکا نشان داده شده است [۳۶]. با توجه به آن، رادون به تنهایی بیش از نیمی از تابش دریافتی هر فرد را تشکیل می‌دهد.

در جریان تنفس، به علت کوتاه بودن زمان توقف هوا در ریه‌ها، در اثر بازدم، ۷۵ تا ۸۰ درصد رادون موجود در هوا تقریباً بدون اینکه به بدن آسیبی برساند خارج می‌شود. ولی محصولات واپاشی  $^{210}\text{Po}$  تا  $^{214}\text{Po}$  و  $^{214}\text{Bi}$  عامل اصلی خطر می‌باشند، که در میان آنها  $^{210}\text{Po}$  و  $^{218}\text{Po}$  مهم‌ترند [۵].

این عناصر پرتوزا که همه آنها جامدند، هنگامی که در ریه تولید شوند به جدار آن می‌چسبند و ممکن است حتی وارد جریان خون شوند [۴۸]. ذرات آلفای ساطع شده از آنها، که



شکل ۴- سهم منابع مختلف در میزان پرتوگیری توسط هر فرد در آمریکا [۳۶]



شکل ۳- راههای ورود رادون به خانه‌ها. این راهها که در شکل با شماره مشخص شده‌اند عبارتند از: ۱- آب زیر زمینی مورد مصرف در خانه، ۲- درزهای موجود در محل اتصالها، ۳- درزهای موجود در دیوارها، ۴- حفره‌های درون دیوارها، ۵- شکستگیهای کف ساختمان، ۶- شکستگیهای کف طبقات بالا، ۷- لوله‌های آب و فاضلاب، ۸- رادون تمرکز یافته در زیرزمین‌ها [۳۹].

جایجا می‌گردد. انتشار باعث انتقال اتمهای این گاز از محیط غلیظ‌تر (هوای داخل خاک و سنگ) به محیط رقیق‌تر (هوای عادی) می‌شود، ولی سهم آن نسبت به همرفت ناچیز است. چنانچه فشار هوای درون خاک با فشار هوای بیرون، یا فشار هوا در نقاط مختلف داخل خاک، تفاوت داشته باشد، هوا از محیط با فشار بیشتر به محیط با فشار کمتر جابجا شده و همراه با خود (به صورت همرفت) گاز رادون را نیز انتقال می‌دهد [۲۹].

به طورکلی، مقدار رادون در فضاهای بسته بسیار متفاوت است و در صورت وجود ترک‌هایی در کف و دیوار ساختمانها افزایش می‌یابد. غلظت آن در زیرزمین‌ها بیشتر است [۱۳] و در طبقه همکف ساختمانها به طور متوسط ۵۰ درصد بیش از طبقه اول است [۳۵]. چون ساختمانهای جدید به منظور کاستن اتلاف انرژی گرمایی، نسبت به خروج هوای داخل بهتر عایق کاری می‌شوند و معمولاً تهویه آنها ضعیف‌تر است، میزان تجمع رادون در آنها اغلب اندکی بیشتر است [۳۷ و ۱۷].

مقدار گاز رادون داخل یک ساختمان در طول مدت شبانه روز تغییر می‌کند. به طورکلی در شب افزایش و در روز کاهش



در انگلستان مردم به طور متوسط ۲/۵ ساعت از شبانه روز را در خارج از ساختمانها بسر می‌برند؛ بنابراین ضریب اقامت برای آنها ۰/۹ است [۱۶].

دانشمندان به سه طریق تأثیر گاز رادون در بروز سرطان ریه را مورد بررسی قرار داده‌اند: یکی از این راهها بررسی تأثیر این گاز بر جانوران در شرایط آزمایشگاهی است. بررسیهایی که در این زمینه صورت گرفته حاکی از بروز سرطان ریه در جانوران بوده است. روش دیگر، تعیین میزان ابتلا به سرطان ریه در بین کارگرانی است که در معادن غنی از رادون، به ویژه در معادن اورانیوم، کار می‌کنند. بالا بودن میزان سرطان ریه در بین این نوع کارگران، در مقایسه با سایر افراد، امری ثابت شده است [۱۷]. با تعمیم نتایج حاصل از مقایسه غلظت رادون در معادن اورانیوم با میزان ابتلا به سرطان ریه، ارتباط غلظت رادون در خانه‌ها با خطر ابتلا به سرطان ریه را برآورد کرده‌اند. البته این روش خالی از اشکال نیست، زیرا سرعت تنفس کارگران معادن بیشتر از سایر افراد است و مواد معلق زیادتری استنشاق می‌کنند. مسأله مهم دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد این است که آیا برای بروز خطر رادون "آستانه غلظت" وجود دارد؟ بسیاری از دانشمندان خطر آنرا فاقد آستانه غلظت می‌دانند. در این صورت، برای هر مقدار دز دریافتی از آن، هر قدر هم اندک باشد، اثری وجود دارد. چنانچه برای بروز خطر "آستانه غلظت" در نظر گرفته شود کمتر از آن غلظت بی‌خطر محسوب می‌شود.

روش سومی که در باره ارزیابی تأثیر گاز رادون در بروز سرطان ریه بکار برده شده مقایسه تعداد مبتلایان به سرطان ریه در مناطق مختلف با غلظت گاز رادون در فضاهای بسته این مناطق است. نتایج حاصل از این روش تاکنون تا حدی متناقض بوده‌اند. به عنوان مثال، براساس آمار موجود، میزان ابتلا به سرطان ریه در بعضی از ایالات آمریکا در مقایسه با غلظت متوسط رادون در این ایالات رابطه معکوس نشان می‌دهد. به طوریکه در سه ایالت کلرادو، داکوتای شمالی و آیووا، که بالاترین سطح رادون در خانه‌های آنها دیده شده است (به ترتیب ۱۴۴، ۱۳۰ و ۱۲۲ بکرل در متر مکعب) آهنگ مرگ و میر ناشی از سرطان ریه ۴۱ در یکصد هزار بوده است؛ اما در سه ایالت دلاور، لویزیانا و کالیفرنیا، که متوسط غلظت رادون در خانه‌ها به ترتیب ۲۷/۷،

هسته هلیوم و دارای بار مثبت می‌باشند، به سرعت انرژی خود را از دست می‌دهند. بنابراین اگر در هوای آزاد تولید شوند نمی‌توانند از قسمت سطحی پوست بدن که از سلولهای مرده تشکیل شده بگذرند. ولی همین که این عوامل تابش ذرات آلفا در سطح بافت ریه قرار می‌گیرند انرژی ذرات آلفای ساطع شده در حجم کوچکی از نسوج متمرکز می‌شود و باعث شکستن پیوندهای شیمیایی، یونش، تشکیل بنیان‌های آزاد و آسیب رساندن به مولکولهای DNA می‌گردد. در هر حال، تغییراتی که در سلولهای پدیدار می‌شوند ممکن است برگشت‌پذیر (جبران‌شونده) و یا برگشت‌ناپذیر باشند. تغییرات برگشت‌ناپذیر ممکن است موجب بروز سرطان در ریه شوند [۳۵]. عناصر جامد ناشی از واپاشی رادون در هوا نیز ممکن است به ذرات غبار موجود در هوا بچسبند و هنگام تنفس، جذب شدن آنها در سطح مجاری تنفسی در بروز سرطان مؤثر باشد [۳۵].

لازم به ذکر است که بعضی از پژوهشگران ارتباط گاز رادون با بعضی از انواع سرطان، مانند ملانوما<sup>(۵)</sup> که نوعی سرطان پوست است و لوسمی (سرطان خون) را مطرح کرده‌اند ولی این ارتباط بخوبی به اثبات نرسیده است [۹].

بعضی از محققان در ایالات متحده و اسکانندیناوی، رادون را در بروز سرطان معده نیز مؤثر دانسته‌اند [۷]. با وجود این، خطر گاز رادون که به صورت محلول در آب آشامیدنی وارد بدن شود هنوز بخوبی مشخص نشده است [۲۱].

اندازه خطری که رادون در هر فرد ممکن است ایجاد کند به سه عامل بستگی دارد: غلظت این گاز در محیط زندگی (ساختمان)، مدت اقامت فرد در آن محیط و عادات شخصی. در مطالب پیش گفته به عوامل مؤثر بر غلظت این گاز اشاره شد. در مورد عادات شخصی، تحت شرایط یکسان خطر آن برای افراد سیگاری بیش از دیگران است، به طوریکه دو عامل غلظت رادون و مصرف سیگار با هم، خطر سرطان ریه را به میزان ۱۰ تا ۲۰ برابر افزایش می‌دهند [۹].

مدت متوسط اقامت افراد در فضاهای بسته تابع شرایط کار و نوع حرفه آنها بوده و در حدود ۱۰ تا ۲۰ ساعت در شبانه روز است. تأثیر این عامل در مقدار دز تابشی که هر فرد دریافت می‌کند با کمیتی به نام ضریب اقامت<sup>(۶)</sup> می‌سنجند. به عنوان مثال،



۳۵/۵ و ۳۵/۹ بکرل در متر مکعب بوده، میانگین آهنگ ابتلا به سرطان ریه ۶۶ در یکصد هزار اعلام شده است [۵۰]. در همین کشور نسبت آهنگ مرگ و میر ناشی از سرطان ریه به مرگ و میر ناشی از سایر انواع سرطان با متوسط غلظت گاز رادون در خانه‌ها ارتباط مستقیم نشان نمی‌دهد [۱۴]. این موضوع باعث شده است که مسأله خطر رادون موجود در هوای خانه‌ها دچار ابهام شود [۲۳]، در حالیکه در بعضی از کشورها، از جمله سوئد [۲۸]، ارتباط مستقیمی بین آهنگ ابتلا به سرطان ریه با غلظت رادون در خانه‌ها دیده شده است. به طور کلی اکنون نه تنها تأثیر رادون در بروز سرطان ریه پذیرفته شده، بلکه در کشورهای پیشرفته آهنگ مرگ و میر ناشی از آن نیز کمابیش تعیین شده است. به عنوان مثال، در امریکا تعداد مرگ و میر ناشی از سرطان ریه به طور متوسط سالانه حدود ۱۷۱۴۰۰ نفر برآورد شده است که ۱۴۰۰۰ نفر به علت تأثیر رادون و ۱۵۷۴۰۰ نفر دیگر به علت کشیدن سیگار تلف می‌شوند [۱۷]. در انگلستان نیز سهم تلفات ناشی از رادون را در حدود ۲۰۰۰ نفر (۵ درصد سرطانهای ریه) تخمین زده‌اند. در این کشور رابطه سرطان ریه و سرطان خون (لوسمی) با غلظت رادون در خانه‌ها مشاهده شده است [۳۹]. ذکر این نکته نیز ضروری است که رادون را در گروه A مواد سرطانزا قرار می‌دهند. شواهد کافی درباره سرطانزا بودن موادی که در این گروه قرار می‌گیرند وجود دارد، و در نتیجه، سرطانزا بودن آنها مسلم در نظر گرفته می‌شود [۲۶].

خطر ناشی از غلظتهای مختلف گاز رادون برای هر فرد براساس رابطه خطی اثر دز (بدون آستانه) محاسبه و با مقایسه با خطرهای ناشی از موارد دیگر در جدول ۱ درج شده است. در این رابطه حد اقدام<sup>(۷)</sup> و حد اقدام چاره ساز<sup>(۸)</sup> مورد توجه قرار گرفته است. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا وجود ۱۴۸ بکرل رادون در مترمکعب هوای خانه را به عنوان حد اقدام منظور داشته است، بطوریکه اگر غلظت رادون بیش از این رقم باشد باید برای کاهش آن در ساختمان اقدام شود. گرچه بسیاری از پژوهشگران معتقدند که خطر بروز سرطان ریه در پایین‌تر از حد اقدام نیز وجود دارد، ولی احتمال بروز خطر ناشی از آن اندک است [۱۷]. حد اقدام چاره ساز ۶۰۰ بکرل در مترمکعب در نظر گرفته می‌شود که در این وضعیت باید اقدام عاجل و همه جانبه‌ای برای کاهش

غلظت رادون در هوای ساختمان صورت گیرد. خاطر نشان می‌سازد که ارقام در نظر گرفته شده برای حد اقدام و حد اقدام چاره ساز در کشورهای مختلف اندکی تفاوت دارند. به عنوان مثال، در انگلستان حد اقدام را ۲۰۰ بکرل در متر مکعب در نظر گرفته‌اند [۳۵] و در کانادا، سوئد و نروژ مقدار ۷۴۰ بکرل در متر مکعب را به عنوان حد خطرناک (معادل حد اقدام چاره ساز) در نظر می‌گیرند [۳۰]. غلظت رادون در ۱۰ درصد خانه‌های آمریکا (حدود ۶ میلیون خانه) بالاتر از حد اقدام است [۴۰]. در انگلستان غلظت رادون در تقریباً ۱۰۰۰۰۰ خانه بالاتر از این حد است [۶].

### ۳-۱- خطر گاز رادون در معادن

آگریکولا (Agricola) در سال ۱۵۵۶ م. متذکر شده است که در بعضی از معادن اروپا کارگران در اثر تنفس هوای متعفن می‌میرند. در بازه زمانی ۱۸۷۷ - ۱۸۹۹ حدود ۷۵ درصد مرگ و میر کارگران در یک معدن واقع در Schneeberg آلمان ناشی از سرطان ریه بوده است [۱۶]. همچنین میانگین مدت ابتلای کارگران معدن Jachymov واقع در کشور چک و اسلواکی به سرطان ریه ۱۷ سال و حداقل آن ۱۳ سال اعلام شده است [۱۶]. بنابراین، بالا بودن میزان ابتلا به سرطان ریه در کارگران معادن غنی از اورانیوم یک واقعه پذیرفته شده است. غلظت رادون در سه معدن اورانیوم کلرادو، رزرواسیون ناواجو و یوتا در امریکا به ترتیب ۹۴۰۰۰، ۱۳۰۰۰ و ۱۹۰۰۰۰ بکرل در متر مکعب برآورد شده است [۱۲].

### ۳-۲- ابزارهای سنجش

برای تعیین مقدار گاز رادون در هوای عادی و هوای درون خاک دزیمترهای مختلفی ساخته شده است [۱۲، ۱۶، ۱۹، ۲۶، ۲۹، ۳۳]. در اینجا به یکی از این دزیمترها که در "گروه پژوهش و توسعه خدمات دزیمتری نوترون و ذرات باردار" امور حفاظت در برابر اشعه سازمان انرژی اتمی ایران ابداع شده و به تولید انبوه رسیده است اشاره می‌شود. این دزیمتر به نام دزیمتر پاسیو نفوذی گاز رادون نامیده شده و متشکل از یک اتاقک (لیوان) پلاستیکی، آشکار ساز ذرات آلفا از نوع پلی کربنات و در پوش



جدول ۱- خطرناشی از غلظت‌های مختلف گاز رادون و مقایسه آن با خطرهای دیگر [۱۳].

غلظت رادون (بکرل در مترمکعب)	سرطان ریه تخمینی (تعداد تلفات در ۱۰۰۰ نفر)	تابش‌گیری مقایسه‌ای	برآورد خطر مقایسه‌ای
۷۴۰۰	۴۴۰-۷۷۰	۱۰۰۰ برابر بیشتر از مقدار آن در بیرون از ساختمان	بیش از ۶۰ برابر خطر برای افراد غیرسیگاری
۳۷۰۰	۲۷۰-۶۳۰	۱۰۰ برابر متوسط رادون در ساختمان	معادل خطر برای شخصی که ۴ پاکت سیگار در روز بکشد یا ۲۰۰۰۰ عکس از ریه در سال بگیرد
۱۴۸۰	۱۲۰-۳۸۰	۱۰۰ برابر متوسط رادون در خارج از ساختمان	معادل خطر برای فردی که در روز ۲ پاکت سیگار بکشد
۷۴۰	۶۰-۲۱۰		
۳۷۰	۳۰-۱۲۰	۱۰ برابر متوسط غلظت رادون در ساختمان	معادل خطر برای فردی که در روز ۱ پاکت سیگار بکشد
۱۴۸	۱۳-۵۰	۱۰ برابر متوسط غلظت رادون در هوای آزاد	۵ برابر خطر برای افراد غیرسیگاری
۷۴	۷-۳۰		
۳۷	۳-۱۳	معادل متوسط غلظت رادون در ساختمان	معادل خطر سرطان ریه برای افراد غیرسیگاری
۷/۴	۱-۳	معادل متوسط غلظت رادون در هوای آزاد	معادل خطر ناشی از گرفتن ۲۰ عکس از ریه در سال

اقدام عاجل است، باید ابتدا اقدام سریع و موقتی، از جمله افزایش تهویه ساختمان و مسدود کردن درزها و شکافها بعمل آید [۱۷]، سپس با توجه به راههای ورود رادون، شرایط ساختمان و امکانات فنی و اقتصادی، راه‌حلهای دائمی انتخاب و اجرا شوند. اگر غلظت رادون در یک ساختمان خیلی بالا بوده و امکان انجام اقدامات کاهش دهنده نیز وجود نداشته باشد بهتر است که از سکونت در آن ساختمان خودداری شود [۲۴].

در ساختمانهایی که غلظت رادون بین حد اقدام و حد اقدام عاجل است چندان نیاز به اقدام سریع و موقتی نیست، اما در هر حال توصیه می‌شود که میزان گاز رادون کاهش داده شود. چنانچه اندازه‌گیریها مبین بالا بودن غلظت رادون باشند بهتر است کارشناس ورزیده بر طبق دستورکارهای تعیین شده توسط مؤسسه ذیصلاح، ساختمان را بازرسی کند، به ویژه کف زیرزمین و دیوارهای تمام واحدهایی را که از سطح عمومی زمین پایین‌ترند معاینه نماید تا مسیرها و شکافهای ورود گاز رادون مشخص و مسدود شوند [۱۳].

با افزایش تهویه ساختمان که به طریق خارج ساختن هوای داخل آن از پنجره‌ها و هواکش‌ها صورت می‌گیرد، می‌توان از تجمع رادون جلوگیری کرد [۱۳ و ۲۴]. میزان تهویه هر ساختمان را با معیاری به نام "میزان تغییر هوای خانه در ساعت" می‌سنجند که معمولاً مقدار آن ۰/۷ است. با توجه به خطر گاز رادون بهتر است مقدار آن در حد ۱ باشد [۱۶]. اما در صورت سرد یا گرم

حای صافی پشم شیشه‌ای (فایبرگلاس) باحفاظ توری آلومینیومی است. آشکارساز (فیلم) پلی کربنات در لیوان درپوش دار قرار داده شده است. با برداشتن درپوش دستگاه و ورود رادون به داخل آن، ذرات آلفای حاصل از واپاشی رادون و دختران آن به فیلم برخورد می‌کنند و ردهای میکروسکوپی از خود برجای می‌گذارند. این ردها به روش "نقش‌اندازی الکتروشیمیایی"<sup>(۹)</sup> بزرگ شده و با میکروسکوپ شمارش می‌شوند. تعداد آنها تابع مقدار رادون محیط و مدت قرارگرفتن دستگاه در معرض آن است که با معلوم بودن عامل دوم سهم عامل اول، یعنی میزان رادون محیط، تعیین می‌شود [۲].

#### ۴- مدیریت خطر

برای مقابله با خطر رادون، عوامل مؤثر بر نوع روش مدیریت تابع منابع ورود رادون (هوای درون خاک، آب و مصالح ساختمانی)، شرایط طبیعی محل (مانند مشخصات خاک و مقدار رادون در آن)، شرایط و مشخصات ساختمان و امکانات فنی و اقتصادی است.

روش مدیریت را می‌توان برای "اصلاح خانه‌های موجود" و "احداث ساختمانهای محفوظ در مقابل خطر رادون" بکار برد. چنانچه سنجشهای دقیق و متعدد، بر طبق توافق‌نامه‌های بین‌المللی مشخص سازند که مقدار گاز رادون در ساختمانی بالاتر از حد





در این موارد توجه به این نکته ضروری است که پس از انجام هر اقدام مدیریتی باید با نمونه برداری، آزمایش و بازمیابی در بازه‌های زمانی معین، کارایی و عملکرد روش مدیریتی را بیازماییم. در این رابطه توصیه شده که دست کم یک روز پس از نصب و راه اندازی سیستم، و در مدت ۲ تا ۷ روز، میزان رادون در ساختمان مورد نظر اندازه‌گیری شود. اگر مقدار آن بالاتر از حد اقدام بود، ابتدا باید مشخص گردد که آیا روش مدیریتی اعمال شده به گونه مطلوب عمل می‌کند؟ سپس، در صورت نیاز، روشهای کاهنده فعال بیشتری بکار برده شوند [۱۷].

#### ۴-۱- نقشه پهنه بندی خطر

به منظور اطلاع از مناطق خطرناک و در نتیجه، اجتناب از احداث ساختمان و یا حفاظت ساختمانها در برابر خطر رادون، بهتر است نقشه پهنه بندی خطر تهیه شود (شکل ۶). برای این منظور، در هر منطقه خاص کارشناسان بر اساس نوع و مشخصات مواد سطحی، زهکشی و میزان رطوبت خاک و سنجش‌هایی که انجام می‌دهند، خطر رادون را مورد بررسی قرار داده و نقشه پهنه بندی خطر را تهیه می‌کنند [۱۳]. در تهیه نقشه‌های پهنه بندی خطر باید به عوامل تشدید کننده آن نیز توجه شود. این عوامل عبارتند از وجود سنگهای غنی از اورانیوم، خاکها و رسوبهایی که نفوذپذیری زیاد دارند، خشک بودن خاکها، وجود شکستگی و گسل و غار در سنگها، کم بودن ضخامت خاک سطحی و سطوح پرشیب و بالای تپه‌ها [۱۳]. بررسیهای زمین شناختی در تکراس نشان می‌دهند که شرایط زمین شناختی نقش مهمی در غلظت گاز رادون در فضاهای بسته دارند [۲۲]. در ارتباط با خطر رادون، نفوذپذیری و میزان رطوبت خاک از جمله مهمترین مشخصه‌های فیزیکی اعلام شده‌اند [۲۰] و به همین دلیل امکان ورود رادون از طریق خاکهای درشت بافت شنی و ماسه‌ای بسیار بیشتر از خاکهای رسی است [۱۷].

#### ۵- فواید گاز رادون

گاز رادونی که در خاک و سنگ تولید می‌شود دارای جنبه‌های مثبت و مفید نیز می‌باشد و این جنبه‌ها ضرورت توجه بیشتر به آنرا ایجاب می‌کنند. یکی از این جنبه‌ها استفاده از آن

بودن هوای بیرون این روش به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. چنانچه بتوانیم با استفاده از هواکش، هوای بیرون را بداخل ساختمان بکشیم، بطوریکه فشار هوای داخل ساختمان نسبت به هوای درون خاک افزایش یابد، گاز رادون نمی‌تواند از خاک وارد ساختمان شود. برای این منظور توصیه شده است که فشار هوای داخل ساختمان دست کم ۲/۵ پاسکال افزایش داده شود [۱۷].

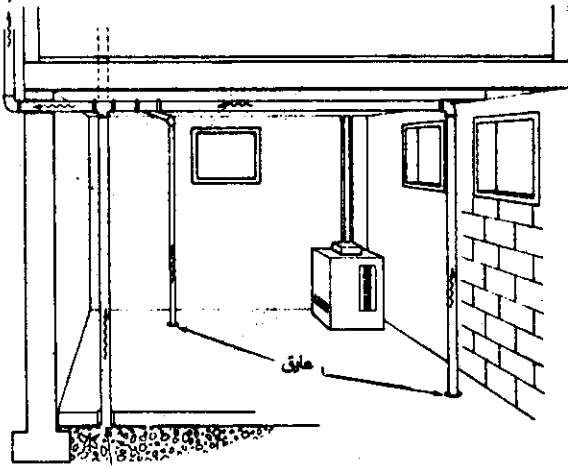
چنانچه غلظت گاز رادون در هوای ساختمان خیلی زیاد باشد، ممکن است این اقدامات جوابگو نباشند. در چنین حالتی توصیه شده است که حفره یا حفره‌هایی در زیر بنای ساختمان ایجاد و از آن محل درجهات مختلف کانالهایی در خاک بستر ساختمان به صورت انشعابی حفر شوند. با مکش هوای جمع شده در این حفره‌ها و هدایت آن به سمت بیرون از ساختمان، از ورود رادون به داخل ساختمان جلوگیری شود (شکل ۵). بهتر است این روش را که "سیستم کاهنده فعال خاک"<sup>(۱۰)</sup> ( با علامت اختصاری ASD ) نامیده می‌شود، به هنگام احداث ساختمان طراحی کرده و آنرا در مقابل خطر گاز رادون محفوظ بسازیم [۱۷ و ۲۷].

چون هزینه اصلاح ساختمانی که ساخته شده بیش از هزینه احداث ساختمان محفوظ در مقابل خطر رادون است، توصیه می‌شود چنانچه میزان رادون در هوای خاک منطقه‌ای که قصد ساختمان سازی در آن را داریم بالا بود، ساختمانها را با نصب سیستم ASD در مقابل رادون حفاظت کنیم. برای ارزیابی سطح رادون در منطقه مورد نظر بهتر است در چندین نقطه و چند بار غلظت رادون در خاک را اندازه‌گیری نماییم. سنجش نفوذپذیری خاک هم مهم است، زیرا بر میزان سهولت نفوذ رادون از خاک به ساختمان نقش دارد. بهتر است ساختمانی که روی خاک نفوذ پذیر سرشار از رادون ساخته می‌شود، علاوه بر سیستم ASD، دارای مشخصات زیر نیز باشد [۱۷].

- دیوارها و کف ساختمان نسبت به ورود رادون عایق‌بندی شوند.
- سیستم‌های تهویه، گرمایش و هوای مطبوع در آن بگونه‌ای طراحی شوند که فشار هوای داخل ساختمان را اندکی افزایش دهند.

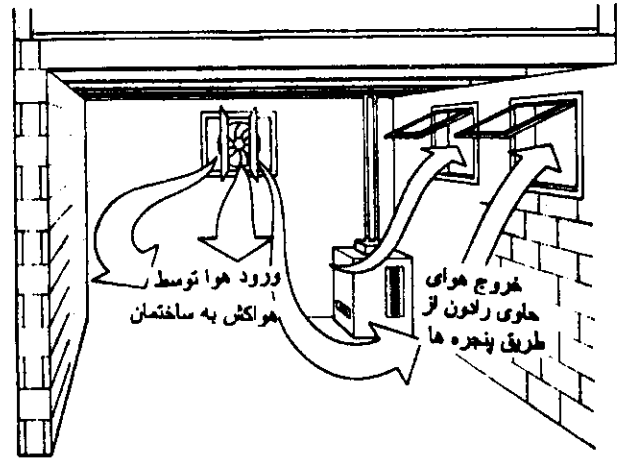


خروج رادون  
توسط هواکش



مجرای انتقال

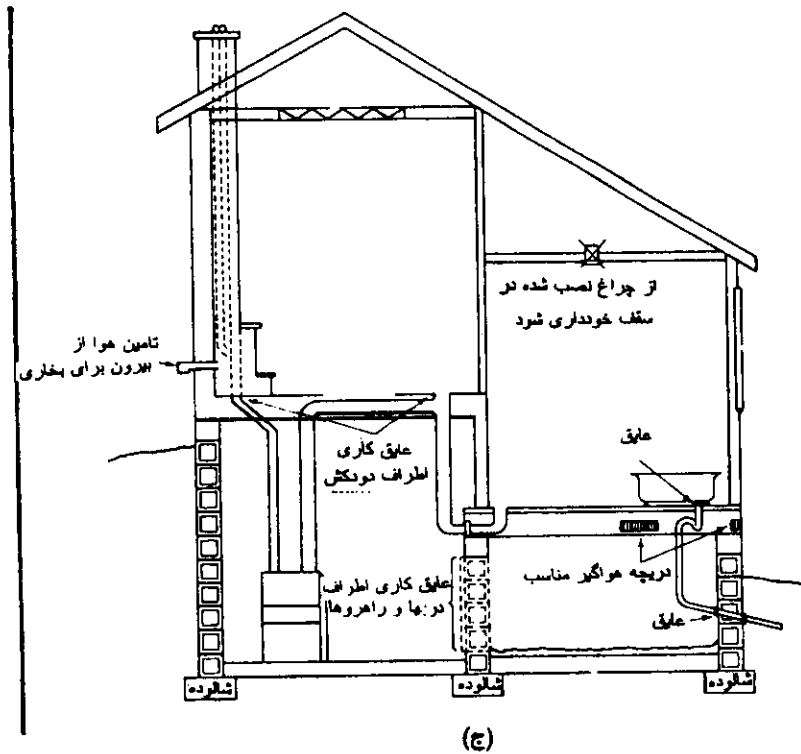
(ب)



ورود هوا توسط  
هواکش به ساختمان

خروج هوای  
حاوی رادون از  
طریق پنجره ها

(الف)



(ج)

شکل ۵- روشهای کاهش مقدار رادون در ساختمان ها: الف) تقویت میزان تهویه زیرزمین ها، ب) ایجاد مکش در زیر کف ساختمان، ج) کاهش تاثیر تقلیل فشار هوا در ساختمان [۲۷].



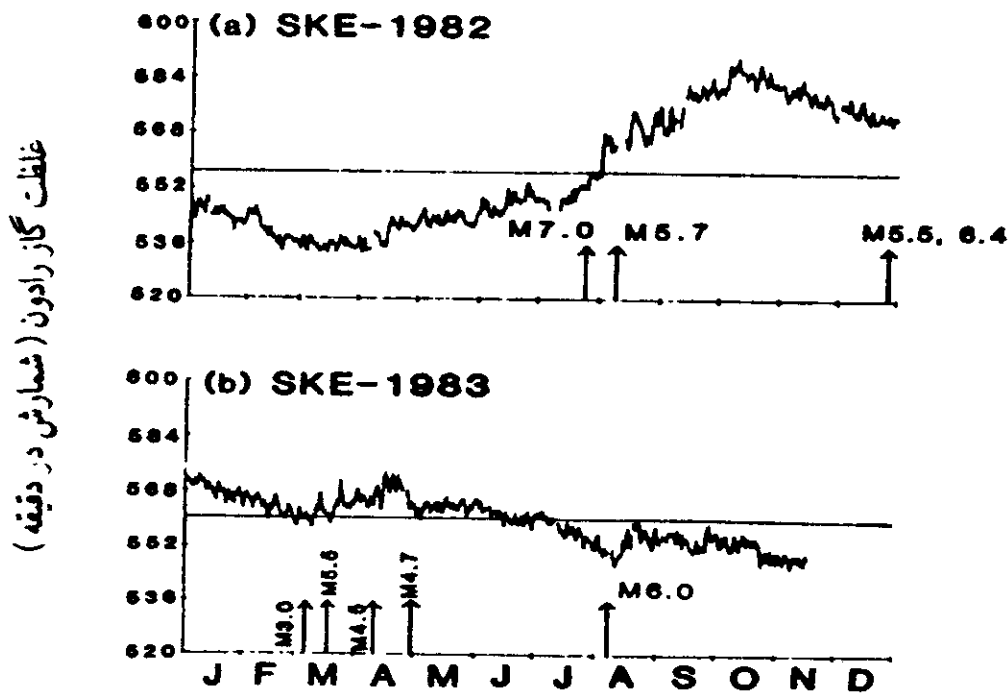
غلظت آن در محدوده گسل‌های فعال را می‌توان در ارزیابی زلزله‌خیزی منطقه مفید دانست.

واکیتا و همکاران [۴۹] در بررسی ارتباط تغییرات گاز رادون با وقوع زمین لرزه‌ها به منظور پیش بینی آنها، تغییرات زمانی این گاز را در ۲۵ محل در ژاپن اندازه گرفته‌اند. شکل ۷ تغییرات آن را که در سالهای ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳ ترسیم شده است نشان می‌دهد. تغییرات رادون، علاوه بر وقوع زلزله، متأثر از شرایط جوی، جزر و مد و پمپاژ آبهای زیرزمینی نیز بوده است. دانشمندان انستیتو تکنولوژی کالیفرنیا نیز میزان گاز رادون را در ۱۲ حلقه چاه در جنوب کالیفرنیا بررسی و مطالعه کرده‌اند. براساس مطالعات آنها، قبل از وقوع زمین لرزه‌های ۱۵ اکتبر ۱۹۷۹ در امپریال ولی<sup>(۱۱)</sup>، اول ژانویه ۱۹۷۹ در مالیبو<sup>(۱۲)</sup> و ۲۹ ژوئن ۱۹۷۹ در بیرلیک<sup>(۱۳)</sup> غلظت رادون افزایش یافته است [۴۰]. چی یو کینگ و همکاران [۱۱] نیز درباره غلظت رادون در هوا و آب در اثر وقوع زمین لرزه ارتباط‌هایی دیده‌اند. بولت [۸] نیز افزایش غلظت گاز رادون را یکی از معیارهای پیش بینی زمین لرزه در نظر گرفته و معتقد است که سنجش‌های انجام شده در این زمینه به حدی کم است که کاربرد آن در پیش بینی زمین لرزه مشکوک به نظر می‌رسد. بنابراین، تنوع در عوامل ایجاد تغییرات رادون در



شکل ۶- نمونه‌ای از نقشه بهنه بندی خطر گاز رادون [۱۳].

برای پیش بینی زمین لرزه است. در مواردی قبل از وقوع زمین لرزه غلظت رادون در هوا و آبهای زیرزمینی افزایش یافته است. علت آنرا تجمع نیروها در سنگها و ایجاد شکستگی‌ها دانسته‌اند. شکستگی‌ها سبب خروج گاز رادون می‌شوند [۳۶ و ۴۲]. بالا بودن



شکل ۷- نمودارهای تغییرات گاز رادون در منطقه توکایی و شبه جزیره ایزو در ژاپن طی سالهای ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳ (اعداد مقابل پیکانها بزرگی زمین زلزله‌های حادث شده را نشان می‌دهند) [۴۹].



مطالعات انجام شده در مناطقی از ایران، مانند رامسر [۲، ۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶]، تهران و گناباد [۴۵ و ۴۶] حاکی از این است که در بعضی از خانه‌ها، به ویژه در رامسر، مقدار گاز رادون بیش از حد مجاز بوده است. در این مورد، چشمه‌های معدنی رامسر بسیار معروفند.

آفتابی و عباس‌نژاد [۱] در جریان مطالعات خود در منطقه چاروک-آبترش (حوالی خنمان رفسنجان) متوجه زیاد بودن پرتوزایی بعضی از سنگهای منطقه شده‌اند. خاطر نشان می‌سازد که سنگهای منطقه مشتمل بر شیل‌های تیره ژوراسیک، سازندهای پالئوزئیک فسفات‌دار، توده‌های کوچک گرانیتی و کانی‌زایی گالن-باریت - فلوریت بنفش می‌باشند که در همه آنها عناصر پرتوزا وجود دارند. در سالهای گذشته بین اهالی منطقه شایعاتی در مورد بالا بودن میزان سرطان ریه و خون بوده است که توجه به میزان پرتوزایی و سنجش غلظت رادون در این منطقه را ایجاب می‌کند.

## ۶- نتیجه‌گیری

رادون از نظر زیست محیطی، هم به عنوان یک خطر و هم به عنوان پیش درآمدی برای پیش بینی وقوع زمین لرزه مطرح است. این گاز عمدتاً همراه با هوای درون خاک وارد ساختمان‌ها می‌شود، محصولات جامد ناشی از واپاشی آن که خود پرتوزا هستند در اثر تنفس وارد ریه شده به سطح نسوج داخلی آن می‌چسبند و احتمالاً باعث بروز سرطان ریه می‌شوند. با انجام دادن یک رشته اقدامات مدیریتی، از جمله تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر، اجتناب از احداث خانه در مناطق خطرناک، جلوگیری از ورود رادون بداخل ساختمانها و یا افزودن میزان تهویه ساختمانها می‌توان تأثیر آنرا کاهش داد. همچنین ممکن است با استفاده از دستگاه آشکارساز رادون، غلظت آن در چشمه‌ها و چاههای مجاور گسل‌های فعال را سنجید و از تغییرات آن برای پیش بینی وقوع زلزله و ارزیابی زلزله خیزی استفاده کرد. این گاز در اکتشاف اورانیوم، آبهای زیرزمینی و نفت و گاز طبیعی نیز کاربرد دارد.

در کشور ما، خطر بالا بودن غلظت رادون به ویژه در ساختمانهای بعضی از مناطق مطرح بوده و لازم است از این نظر مورد توجه قرار گیرد.

آبهای زیرزمینی و کم‌بودن سنجش‌های انجام شده، امکان استفاده از این گاز برای پیش‌بینی زمین‌لرزه را تا حدی زیر سؤال می‌برد. بنابراین ادامه پژوهش در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

در سال ۱۹۱۱ پزشکی به نام دکتر سبرمن<sup>(۱۴)</sup> اعلام کرد که رادون در رشد یاخته‌های سالم، درمان بی‌خوابی و چند بیماری دیگر مفید است [۲۸]. از اینرو چشمه‌های حاوی رادون در آمریکا و انگلستان به شدت مورد استفاده درمانی قرار گرفتند، بطوریکه تا اواسط قرن بیستم بیماران از استنشاق گازهای این چشمه‌ها برای درمان استفاده می‌کردند. اکنون هم چشمه‌های متعددی در نقاط مختلف جهان، به ویژه در اروپای مرکزی و شرقی و چین به سبب داشتن عناصر پرتوزا مورد استفاده درمانی قرار می‌گیرند [۲۸]. محصولات واپاشی رادون خاصیت از بین بردن یاخته‌های سرطانی داشته و در پزشکی برای درمان سرطان کاربرد دارند [۹].

غلظت گاز رادون در خاکهای پوشاننده گسلها و شکستگیهای موجود در سنگها معمولاً بیشتر است. با توجه به اینکه گسلها و شکستگیها در سنگهای سخت اغلب محل انباشته شدن آبهای زیرزمینی می‌باشند از سنجش رادون برای اکتشاف آبهای زیرزمینی نیز استفاده شده است [۴۳]. یکی از روشهای اکتشاف اورانیوم هم تعیین غلظت رادون در خاک و سنگ است [۴۷ و ۲۵].

## ۱-۵- اهمیت زیست محیطی رادون در ایران

عواملی نظیر کوهستانی بودن، سبک خانه سازی، نازک بودن لایه خاک و زیاد بودن عمق آبهای زیرزمینی، بویژه در مناطق خشک ایران مرکزی و شرق ایران، حاکی از این است که غلظت رادون در خانه‌های مناطق متعددی از ایران امکان دارد در سطحی بالاتر از حد اقدام قرار داشته باشد. به ویژه در خانه‌های روستایی مناطقی از ایران که سنگهای گرانیتی وسعت بیشتری دارند، از جمله در زنجان، آذربایجان و یزد باید مورد بررسی قرار گیرند. در نواحی دیگری، مانند بخشهایی از زاگرس و شمال استانهای خراسان و کرمان، خانه‌های احداث شده روی شیل‌های غنی از مواد آلی قابل توجه‌اند.



- ۱ - Ernest Dorn
- ۲ - alpha recoil
- ۳ - Rogers
- ۴ - emanation coefficient
- ۵ - melanoma
- ۶ - occupancy factor
- ۷ - action level

- ۸ - remedial action
- ۹ - electrochemical etching
- ۱۰ - active soil depressurization
- ۱۱ - Imperial Valley
- ۱۲ - Molibu
- ۱۳ - Bear lake
- ۱۴ - Suberman

### References:

۱. ع. آفتابی و ا. عباس‌نژاد، "زمین شناسی و پتانسیل مواد معدنی منطقه آبرش - چاروک (شمالشرق رفسنجان)"، مرکز پژوهش دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۶۹).
۲. م. سهرابی و ع. سلیمانیان، "بررسی ویژگی‌های دزیمتری پاسیو نفوذی گاز رادون جهت تعیین پرتوگیری مردم در خانه‌های مسکونی"، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران شماره ۹، ۱۸-۱ (۱۳۶۸).
۳. ه. میرزائی و م. بیت‌الهی، "تغییرات پرتوزائی رادیوم-۲۲۶ از چشمه‌های آبگرم رامسر"، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۱۱ و ۱۲، ۹۷-۱۰۲ (۱۳۷۲).
4. M. Albu, D. Banks and H. Nash, "Mineral and thermal ground water resources," Chapman and Hall, London (1997).
5. E. L. Alpen, "Radiation biophysics," Prentice-Hall International Editions, Englewood Cliffs, N.J. (1990).
6. J. E. Andrews, P. Brimblecombe, T. D. Jickells and P.S. Liss, "An introduction to environmental chemistry," Blackwell, Norwich (1997).
7. D. Banks, O. Royset, T. Strand and H. Skarphogen, "Radioelement (U, Th, Rn) concentrations in Norwegian bedrock groundwaters," Environmental Geology, Vol. 25, 165-180 (1995).
8. B. A. Bolt, "Earthquakes," W. H. Freeman and Company, New York (1993).
9. D. B. Botkin and E. A. Keller, "Environmental science," 3rd, ed. John Wiley and Sons, New York (2000).
10. B. B. Botkin and R. P. Gupta, "Applied hydrogology of fractured rocks," Kluwer Academic Publishers, London (1999).
11. Chi Yo King, O. Walkingstick and D. Basler, "Radon in soil gas along active faults in central California," U. S. Geological Survey Bulletin, 77-143 (1991).
12. K. D. Cliff, Radon, "Notes for postgraduate radiological protection course, National Radiological Protection Board," (1980).
13. N. K. Coch, "Geohazards, natural and human," Prentice-Hall, New Jercey (1995).
14. B. L. Cohen, "Questionnaire study of the lung cancer risk form radon in homes," Health Physics Vol. 72, No. 4, 615-622 (1997).
15. B. L. Cohen, "Problems in the radon vs lung cancer test of the linear no-threshold theory and a procedure for resolving them," Health Physics, Vol. 72, No. 4, 623-628 (1997).
16. E. M. Durrance, "Radioactivity in geology, Principles and Applications," Ellis Horwood Ltd, Chichester (1986).



17. T. M. Dyess, "Radon in buildings, in: Environmental analysis and remediation," ed., by R. A. Meyers, John Wiley and Sons, New York, 4018-4044 (1998).
18. R. L. Fleisher, and L. G. Turner, "Correlations of radon and carbon isotopic measurements with petroleum and natural gas at Cement," Oklahoma, Geophysics, Vol 49, 810-817 (1984).
19. R. C. Fortman, "Measurement methods and instrumentation, in: radon prevalence, measurements, health risks and control," ed. By: N. L. Nagda, ASTM PCN28 - 015094 -17, Philadelphia, Pa, Chapter 4, 46-66 (1994).
20. C. Geiger and K. B. Barnes, "Indoor radon hazard: a geographical assessment and case study," Applied Geography, Vol 14. 350-371 (1994).
21. J. D. Hem, "Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters," 3rd. ed., United States Geological Survey Water Supply Paper, 2254 (1989).
22. P. K. Hundak, "Distribution of indoor radon concentrations and uranium-bearing rocks in Texas, Environmental Geology," Vol. 28 No. 1, 29-33 (1996).
23. S. Hurlburt, "Radon: a real killer or just an unsolved mystery? water well," Journal, 34-41 (1989).
24. E. A. Keller, "Environmental Geology," Charles E. Merrill Rub. Co. Columbus (1990).
25. R. W. Klusman, "Soil gas and related methods for natural resources exploration," John Wiley and Sons, New York (1993).
26. E. O. Kuntson, and A. C. George, "Radon, thoron, and decay products, in: environmental analysis and remediation," ed. By: R. A. Meyers, John Wiley and Sons, New York, 4045-4068 (1998).
27. G. M. Masters, "Introduction to environmental engineering and science," Prentice - Hall International Editions Englewood, Cliff N. J. (1991).
28. M. McNulty, "The radium waters of Bath, in: Hot springs of Bath," ed. By: G. A. Kellaway, Bath City Council, 65-70 (1991).
29. F. Medici and L. Rybach, "Measurements of indoor radon concentrations and assessment of radiation exposure," Journal of Applied Geophysics, Vol 31, 153-163 (1994).
30. G. T. Miller, "Living in the environment," 10th ed. Wadsworth Pub. Co, Belmont (1998).
31. J. M. Miller and D. Ostle, "Radon measurements in uranium prospecting, in: uranium exploration methods," (conference volume), Vienna, International Atomic Energy Agency, 229-239 (1973).
32. J. G. Morse, M. H. Rana, and L. Morse, "Radon mapping as indicators of subsurface oil and gas," Oil and Gas Journal, Vol 80, No(19), 227-246 (1982).
33. W. W. Nazaroff, "Measurement techniques, in: radon and its decay products in indoor air," ed. By: W. W. Nazaroff and A. V. Nero, John Wiley and Sons, New York, 491-504 (1988).
34. F. K. North, "Petroleum geology," Unwin Hyman, London (1985).
35. P. O. Neill, "Environmental chemistry," 2nd ed., Chapman and Hall, London (1993).
36. C. Park, "The environment, principles and applications," Routledge, London (1997).
37. H. Pazvash, "A method of radon detection in new buildings in: graves. B (ed.), Radon, radium and other radioactivity in ground water, National water Association," Lewis Publishers, Boca Raton, 491-497 (1987).
38. G. Pershagen, G. Akerblom, O. Axelson, B. Clavensjo, L. Damber, G. Desai, A. Enflo, F. Lagarde, H. Mellander, M. Suartengren, G. A. Swedjemark, "Residential radon exposure and lung cancer in Sweden," New England Journal of Medicine, Vol 330, 159-164 (1994).
39. K. T. Pickering and L. A. Owen, "An introduction to global environmental issues,"



- 2nd, ed. Routledge, London (1997).
40. P. H. Rahn, "Engineering Geology, An environmental approach," 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey (1996).
  41. A. S. Rogers, "Physical behavior and geologic control of radon in mountain streams," U. S. Geological Survey Bulletin, 1052-E, 187-211 (1958).
  42. M. H. Shapiro, "Comparison of radon monitoring techniques, the effects of thermoelastic strains on subsurface radon, and the development of a computer-operated radon monitoring network for earthquake prediction," U. S. Geological Survey Open-File Report, 80-896 (1980).
  43. B. B. S. Singhal, and R. P. Gupta, "Applied hydrogeology of fractured rocks," Kluwer Academic Publishers, London (1999).
  44. Sohrabi, M. et al, "Determination of  $^{222}\text{Rn}$  levels in houses, schools, hotels of Ramsar by AEOI passive radon diffusion dosimeters," Proceedings of International Congress of High Level Natural Radiation, 365-374 (1990).
  45. M. Sohrabi, and A. R. Solaymanian, "Indoor radon level measurements in some regions of Iran," Nuclear Tracks and Radiation Measurements, Vol.15, No. (1-4) (1988).
  46. M. Sohrabi, and A. R. Solaymanian, "Indoor radon level measurements using the AEOI passive radon diffusion dosimeter," Proceedings of the 7th International Congress of the International Radiation Protection Association, Vol. 1, Sydney, Australia (1988).
  47. W. M. Telford, "Radon mapping in the search for uranium, in : developments in geophysical exploration methods," ed. By: A. A. Fitch, Vol. 4, Elsevier, Barking (1983).
  48. P. T. Underhill, "Naturally occurring radioactive material, principles and practices," St. Luke Press, Delray Beach (1996).
  49. H. Wakita, Y. Nakamura and Y. Sano, "Ground water radon variation reflecting changes in regional stress fields, in: practical approaches to earthquake prediction and warning," ed. By: C. Kisslinger and T. Rikitake, Reidel Pub. Co, Dordrecht (1985).
  50. R. S. Yalow, "Radioactivity and society," The Bent, 83, No.4, 156-167 (1992).