

فصل اول

مقدمه و سری‌های

واپاشی

۱-۱- مقدمه:

حدود ۷۰ درصد سطح زمین از آب پوشیده شده است اما تنها درصد کمی از آب‌های موجود برای تامین آب اجتماعات قابل استفاده می‌باشد. بیش از ۹۸ درصد آب، در اقیانوسها و دریا‌های آب‌شور وجود دارد که در حال حاضر استفاده از آن در سطح گسترده از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. این آب‌ها آلوده به مواد شیمیائی یا آلوده به گازهای رادیواکتیو می‌باشد که مصرف این آب‌ها برای مصارف شهری بسیار مخاطره‌آمیز می‌تواند باشد و روش‌ها و تدابیری برای حذف و کاهش این آلودگی‌های نامطلوب با استفاده از علم نوین و ابزار مناسب، باید به کار برد. اگرچه آب خالص در طبیعت یافت نمی‌شود. اما آب خالص مایعی بی‌رنگ، بی‌بو و بی‌مزه است که دارای نقطه انجماد صفر و نقطه جوش ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد فرمول شیمیائی آن H_2O که احتمالاً، حدود ۰/۳ درصد آب‌های موجود در طبیعت در بردارنده ایزوتوپ‌های دوتریم (D) آب سنگین D_2O ، و یا تریتم T_2O نیز می‌باشد. (کاظمیان، ۱۳۸۷)

آب در چرخه خود قادر است املاح و گازهای موجود در طبیعت را به صورت محلول درآورده و بسیاری از آلودگی‌ها را همراه خود به حرکت در آورد. آب‌باران ناخالصی‌های موجود در هوا نظیر ذرات، گازها، مواد رادیواکتیو و میکروبها را به سطح زمین آورده و در حین حرکت در زمین نیز آلاینده‌ها را با خود حمل می‌کند. محیطی که در تماس با مواد رادیواکتیو می‌باشد، تشعشعات آن می‌تواند آب‌های جاری و یا تماسی آن محیط را آلوده کند. به علاوه آب‌های جاری اغلب دریافت‌کننده فاضلاب و مواد رادیواکتیو ناشی از فعالیت زمینی و انسانی نیز باشد.

یکی از مشکلات بهداشتی کشورهای عقب‌مانده و در حال توسعه، عدم برخورداری از آب آشامیدنی سالم است. از آنجا که محور توسعه پایدار، انسان سالم است و سلامت انسان در گرو بهره‌مندی از آب آشامیدنی مطلوب می‌باشد بدون تامین آب سالم جایی برای سلامت و رفاه جامعه، وجود ندارد. آب از

دو بعد بهداشتی و اقتصادی حائز اهمیت است. از بعد اقتصادی به حرکت درآورنده چرخ صنعت و رونق بخش فعالیت کشاورزی است. از بعد بهداشتی آب با کیفیت، تضمین کننده سلامت انسان است.

علاوه بر ناخالصی‌ها و مواد رادیواکتیو و گازهای نامطلوب از جمله متان و اتان و گازهای دی‌اکسید کربن و گازهای رادیواکتیو رادون و تورون، موجودات ذره بینی گوناگونی نیز در آب یافت می‌شوند که بعضی از آن‌ها بیماری‌زا و سرطان‌زا بوده و در بروز بیماری‌های ریوی و عفونی خطرناکی نقش آفرینی می‌کنند. بهسازی آب رابطه مستقیمی با کاهش بیماری‌های سرطانی و عفونی دارد. بنابراین برنامه ریزی و هزینه در جهت تامین آب سالم، سرمایه‌گذاری قابل توجهی برای آینده خواهد بود. تهیه و تامین آب آشامیدنی سالم برای جامعه یکی از موثرترین و پایدارترین فناوری‌ها برای ارتقای سلامت جامعه است.

۱-۲- ناخالصی‌های آب:

ناخالصی‌های آب را عمدتاً به دو گروه طبقه بندی می‌کنند

۱- ناخالصی‌های معلق

۲- ناخالصی‌های محلول

۱-۲-۱- ناخالصی‌های معلق

این ناخالصی‌ها شامل ذرات زنده و غیرزنده می‌باشد که در آب به صورت معلق یافت می‌شود و این نوع ناخالصی‌ها را میتوان در سه گروه، تقسیم‌بندی کرد:

الف) ذرات معلق زنده مانند عوامل بیماری‌زای موجد وبا، حصبه، انواع اسهال‌ها، تخم انگل‌ها و ویروس‌ها منشا اصلی این دسته از ناخالصی‌ها، فاضلاب شهری و حضور حیوانات در مجاورت منابع آب می‌باشد.

ب) ذرات معلق غیرزنده غیربیماری‌زا مانند باکتری‌ها و اغلب جلبک‌ها و تک‌سلولی‌هایی که در طبیعت به وفور یافت می‌شوند.

ج) ذرات معلق غیرزنده مانند رس و آهک که ناشی از فرسایش سطح زمین و سطوح آبخیز می‌باشد.

۱-۲-۲- ناخالصی‌های محلول

این دسته شامل املاح معدنی، ترکیبات آلی و گازهای محلول و گازهای بی‌اثر و رادیواکتیو می‌باشد که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر دسته‌بندی کرد.

الف) املاح معدنی که اغلب به صورت املاح کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن، منگنز و... می‌باشد که برخی از آنها مصرف آب را محدود می‌کند.

ب) گازهای محلول مانند اکسیژن، کربن دی‌اکسید (CO_2)، سولفید هیدروژن (H_2S)، ازت و همچنین گازهای رادیواکتیو مانند گاز رادون و تورون می‌باشد و این ناخالصی‌ها نیز کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب را تحت تاثیر قرار داده و ممکن است باعث نامطلوب بودن آن شوند.

در این پروژه با توجه به اهمیت وجود مواد رادیواکتیو در آب‌های قابل شرب شهری و معدنی از دید هسته‌ای، روشهایی برای کنترل و حذف این گازها به صورت تجربی بررسی شده است.

(The world health report 2007. A safer future: global public health security in the 21st century)

پرتوزایی:

نوکلید (ویژه هسته) ها می‌توانند پایدار یا ناپایدار باشند. اگر نوع ناپایدار (که هسته ی پرتوزا یا رادیونوکلید نامیده می‌شود) به هسته ی پایدار یا ناپایدار دیگری با تراز جرم و انرژی کمتر تبدیل گردند که این فرآیند پرتوزایی نامیده می‌شود.

۱-۳- منابع پرتوزا در محیط

منابع پرتوزا در محیط به دو دسته منابع پرتوزای طبیعی و منابع پرتوزای مصنوعی تقسیم می‌شوند که میزان سهم درصد پرتوگیری از منابع مختلف را به صورت سالانه بررسی خواهیم کرد.

منابع پرتوزای طبیعی:

۱-۳-۱- منابع پرتوزای طبیعی به دو دسته ی هسته‌های پرتوزای اولیه و هسته‌های پرتوزای کیهانی

تقسیم می‌گردند.

۱-۳-۲- هسته‌های پرتوزای اولیه:

این دسته از مواد پرتوزا، خود به دو صورت هسته‌های پرتوزای زنجیره‌ای و منفرد طبقه بندی شده اند:

۱-۳-۳- هسته‌های پرتوزای منفرد:

مهمترین هسته‌های پرتوزای طبیعی منفرد که سهم قابل توجهی در پرتوگیری انسان دارند عبارتند از: ^{40}K ، ^{87}Rb ، ^{50}V ، که با یک مرحله واپاشی به هسته پایدار تبدیل می‌شوند و زنجیره واپاشی برای آنها نداریم. سایر هسته‌های پرتوزای منفرد در طبیعت بسیار ناچیز هستند و بدین لحاظ حائز اهمیت نمی‌باشند.

۱-۳-۴- هسته‌های پرتوزای زنجیره‌ای:

دو زنجیره واپاشی مهم هسته‌های پرتوزای اولیه و وابسته به تشکیل زمین عبارتند از: ^{238}U شکل ۱-۱ و ^{232}Th شکل ۱-۲ زنجیره‌ی سوم، ^{235}U یا سری اکتینوم شکل ۱-۳ می‌باشد که از درصد فراوانی ناچیزی برخوردار است. چهارمین زنجیره‌ی واپاشی، سری نپتونیم است که اعضای این سری به دلیل کوتاه بودن نیمه عمر آنها در مقایسه با عمر زمین، در طبیعت یافت نمی‌شوند. (روبرت و همکارانش، ۲۰۰۹)

Isotope	Particle(s) emitted	Half- life
^{238}U	α	4.5×10^9 yr
^{234}Th	β	24.101 days
^{234}Pa	β	1.175 min
^{234}U	α	2.475×10^5 yr
^{230}Th	α	8.0×10^4 yr
^{226}Ra	α	1622 yr
^{222}Rn	α	3.825 days
^{218}Po	α	3.05 min
^{214}Pb	β	26.8 min
^{214}Bi	β	19.72 min
^{214}Po	α	163.7 μsec
^{210}Tl	β	1.32 min
^{210}Pb	β	22.5 yr
^{210}Bi	β	4.989 days
^{210}Po	α	138.374 days
^{206}Pb		stable

شکل ۱-۱- زنجیره واپاشی ^{238}U با نیمه عمرهای ایزوتوپ آن

Isotope	Particle(s) emitted	Half-life
^{232}Th	α	1.39×10^{10} yr
^{228}Ra	β	6.7 yr
^{228}Ac	β	6.13 hr
^{228}Th	α	1.90 yr
^{224}Ra	α	3.64 days
^{220}Rn	α	54.53 sec
^{216}Po	α	0.158 sec
^{212}Pb	β	10.67 hr
^{212}Bi	β	60.48 min
^{212}Po	α	0.29 μ sec
^{208}Tl	β	3.1 min
^{208}Pb		stable

شکل ۱-۲- زنجیره واپاشی ^{232}Th با نیمه عمرهای ایزوتوپ آن

Isotope	Particle(s) emitted	Half-life
^{235}U	α	7.13×10^8 yr
^{231}Th	β	25.6 hr
^{231}Pa	α	3.43×10^4 yr
^{227}Ac	β	22.0 yr
^{227}Th	α	18.6 hr
^{223}Ra	α	11.2 days
^{219}Rn	α	3.917 sec
^{215}Po	α	1.83 msec
^{211}Pb	β	36.1 min
^{211}Bi	β	2.16 min
^{211}Po	α	0.52 sec
^{207}Tl	β	4.79 min
^{207}Pb		stable

شکل ۱-۳- زنجیره واپاشی ^{235}U با نیمه عمرهای ایزوتوپ آن

۱-۴- اکتیویته^۱:

اکتیویته یک نمونه‌ی رادیواکتیو برابر تعداد واپاشی‌های نمونه در واحد زمان است، و همچنین تعداد واپاشی در ثانیه (dps)^۲ یکای مناسبی برای اندازه‌گیری است. یکای دیگر اندازه‌گیری اکتیویته کوری^۳ است، که در ابتدا معادل پرتوزایی یک گرم رادیوم در نظر گرفته شده و در حال حاضر به‌صورت $10^7 \times 3.7$ واپاشی در ثانیه تعریف می‌شود. اغلب چشمه‌های رادیواکتیو که در آزمایشگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای اکتیویته‌ای در محدوده‌ی میکروکوری و میلی‌کوری هستند. یکای اکتیویته در SI بکرل^۴ نامیده می‌شود که یک واپاشی در ثانیه است. اکتیویته به نوع تابش و انرژی آن بستگی ندارد و برای بررسی اثرات تابش در سیستم زیست‌شناختی اکتیویته کمیت مفیدی نیست، زیرا تابش‌های مختلف ممکن است اثرات متفاوتی داشته باشند (نال، ۱۹۹۹).

¹ Activity

² Disintegration Per Second

³ Curie

⁴ Becquerel

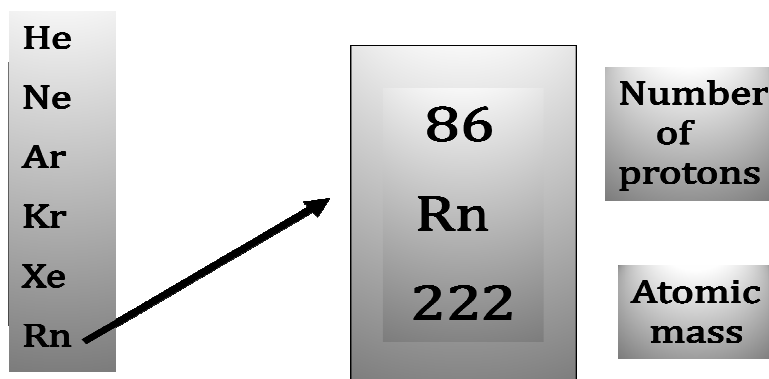
فصل دوم

معرفی گاز رادون

۱-۲- گاز رادون:

رادون ^{222}Rn یک گاز پرتوزای طبیعی بدون رنگ و بو و مزه، با نقطه میعان -۶۲ درجه سانتیگراد و چگالی ۸ برابر هوا است، شکل ۱-۲ این گاز محصولی از سری واپاشی اورانیوم بوده و تقریباً در میان زنجیره‌ای از تغییرات پرتوزایی قرار گرفته است که با ^{238}U شروع و به ^{206}Pb ختم می‌شود و از واپاشی آن ایزوتوپ‌های دیگری با نیمه‌عمرهای کوتاه‌تر تولید می‌شوند. رادون در سال ۱۹۰۰ میلادی توسط ارنست درن^۱ کشف شد و با توجه به این در گروه گازهای بی‌اثر قرار دارد. داره میل ترکیبی آن بسیار ناچیز می‌باشد. (کلر و همکارانش، ۱۹۹۰).

Nobel Gases



شکل ۱-۲- مشخصه گاز رادیواکتیو رادون

عنصری که رادون نامیده می‌شود و عدد اتمی آن ۸۶ می‌باشد دارای ۲۷ ایزوتوپ است که از ^{200}Rn شروع و به ^{226}Rn ختم می‌شوند و همه آن‌ها ناپایدارند. بعد از یک سری واپاشی‌ها با نیمه‌عمرهای مختلف می‌توانند به حالت پایدار تبدیل شوند. از همه این ایزوتوپ‌ها، تنها ^{219}Rn ، ^{220}Rn ، ^{222}Pb در طبیعت تولید می‌شوند (لبیدی و همکارانش، ۲۰۰۲).

¹ Ernst dorn

نیمه عمر ^{222}Rn که تورون نامیده می‌شود $55/3$ ثانیه است و از واپاشی توریوم ^{232}Th حاصل می‌شود ^{219}Rn یا آکتینون، با نیمه عمر $3/29$ ثانیه، محصول واپاشی ^{235}U است. بنابراین، از بین این سه ایزوتوپ طبیعی رادون تنها ^{222}Rn با نیمه عمر $3/82$ روز از واپاشی ^{238}U تولید می‌شود و فرصت رسیدن به سطح زمین و تجمع در ساختمان را دارد (پیکرینک و همکارانش، ۱۹۹۷). نکته جالب‌تر اینکه محصولات واپاشی آن، یعنی ^{218}Po با نیمه عمر $3/05$ دقیقه، ^{214}Po با نیمه عمر $1/6 \times 10^{-4}$ ثانیه ^{214}Pb با نیمه عمر $26/8$ دقیقه و ^{214}Bi با نیمه عمر $19/7$ دقیقه همگی جامدند و با تنفس هوای محتوی رادون و واپاشی آن در ریه، تولید شده و به سطح بافت^۱ آن می‌چسبند. ذرات آلفای ناشی از واپاشی آنها باعث آسیب رساندن، و احتمالاً بروز سرطان در افراد می‌شود. خطر بالقوه ^{218}Po و ^{214}Pb حدود ۲۰ برابر بیش از خود رادون ^{222}Rn است. (پیکرینک و همکارانش، ۱۹۹۷)

انرژی خانواده اورانیوم و توریوم که در انرژی‌های مختلف به ایزوتوپ‌های که حاصل واپاشی ذرات آلفا و بتا می‌باشد در جدول ۱-۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۱-۲- مد واپاشی ذرات آلفا و بتا برای دختران رادون با نیمه‌عمرهای متفاوت

ISOTOPE	HALF-LIFE	DECAY MODE, ENERGY	PARENT ISOTOPE
220Rn	55 seconds	α , 7.46 Mev	232Th
222Rn	3.825 days	α , 5.49 Mev	238U
223Rn	43 minutes	β^-	235U
224Rn	1.9 hours	β^-	232Th

اگر تولید رادون استمرار نداشته باشد، با توجه به کوتاه بودن نیمه‌عمر آن، مقدار باقیمانده‌اش در محیط طی حدوداً ۶ نیمه عمر آن تمام می‌شود، اما واپاشی ^{226}Ra موجود در خاک و سنگ، که خود محصول واپاشی ^{238}U است، باعث استمرار تولید آن در زیر سطح زمین می‌شود. به همین دلیل غلظت آن در آب‌های شبکه قابل شرب شهری، حتی اگر آن‌ها از آب‌های زیرزمینی نسبتاً غنی از رادون تامین شده باشند

¹ Tissue

ناچیز است، ولی غلظت آن در آب‌هایی که از چاه‌ها استخراج می‌شوند، اغلب بالاست (کونتسون و همکارانش، ۱۹۹۸).

اورانیوم موجود در خاک و سنگ منبع اصلی تولید رادون است. با توجه به اینکه غلظت متوسط آن در پوسته زمین $2/7 \text{ ppm}$ برآورد شده است، در خاک مزرعه ای به ضخامت ۱ متر و مساحت ۱۰۰ هکتار، حدود $2/8$ تن اورانیوم وجود خواهد داشت که منبع تولید رادون موجود در خاک است. (هانداک، ۱۹۹۶)

البته غلظت اورانیوم در بعضی از سنگها بیش از غلظت متوسط پیش گفته شده است. به عنوان مثال، مقدار متوسط آن در گرانیت $4/7 \text{ ppm}$ و ممکن است به $20-40 \text{ ppm}$ هم برسد (دایس، ۱۹۹۸).

۲-۲- غلظت گاز رادون در منابع و 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^۱ تیره و 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 (بوتکین و همکارانش، ۲۰۰۰).

فرایندی که در جریان آن رادون از مواد جامد تشکیل‌دهنده خاک و سنگ به منافذ آنها انتقال می‌یابد پس زدن آلفا نام دارد^۲. بدین ترتیب که در حین تجزیه اورانیوم و تولید رادون، ذره آلفا از هسته آن به بیرون پرتاب می‌شود. در نتیجه اتم رادون حاصل از این واپاشی با نیرویی در حد 10^4 تا 10^5 برابر انرژی متوسط پیوندهای شیمیایی در خلاف جهت پرتاب ذره آلفا پس زده می‌شود. اتم رادون پس زده ممکن است حدود ۲۰ تا ۷۰ نانومتر درون ماده جامد (کانی) جابه‌جا شود. اگر محیط تولید رادون از سطح کانی بیش از ۲۰ تا ۷۰ نانومتر فاصله داشته باشد اتم‌های رادون از کانی خارج نخواهند شد. در غیر اینصورت، 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

¹ Shale

² Alpha recoil

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. (دایس، ۱۹۹۸)

چون میزان انتشار رادون در آب 10^4 مرتبه کمتر از هوا است، می‌توان نتیجه گرفت 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 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 (دایس، ۱۹۹۸).

رادیواکتیویته رادون بر حسب واحد بکرل Bq یا واحد شمارش در دقیقه Cpm^1 محاسبه می‌شود. یک بکرل با فروپاشی (تجزیه) یک هسته اتم در زمان یک ثانیه متناسب می‌باشد. غلظت رادون در هوا با تعداد فروپاشی (تجزیه) در هر ثانیه در یک متر مکعب هوا Bq/m^3 برابر است. میانگین سطح رادون در هوای خارج از خانه بین ۵ تا $15 Bq/m^3$ متغیر است اما مقادیر بالاتر و پایین‌تر نیز مشاهده شده است.

براساس چند بررسی میانگین جهانی غلظت رادون در هوای داخلی منازل $39 Bq/m^3$ محاسبه می‌شود که این آمار توسط $UNSCEAP^2$ (کمیته محققان آثار تشعشع اتمی سازمان ملل متحد) با تفاوت‌های آشکار در بین کشورها گزارش شده است.

بیشترین غلظت رادون ($>1000 Bq/m^3$) در کشورهایی گزارش شده که منازلشان روی زمین‌های دارای اورانیوم با غلظت بالا و یا زمین‌های قابل نفوذ بنا شده‌اند. برای مثال در برخی کشورهای اروپایی رادون در آب‌های زیرزمینی به داخل سنگ‌های سطحی نفوذ کرده و وارد ساختمانها می‌شود. بهر حال در بعضی کشورهای جهان ممکن است هزاران خانه وجود داشته باشد که غلظت رادون در آنها بالاتر از حد مجاز است که اقداماتی جهت کنترل آنها باید اعمال گردد.

غلظت رادون در هوای درون خاک حدود $740 Bq/m^3$ تا 3700000 ، گزارش شده است. ولی معمولاً در محدوده $740 Bq/m^3$ تا 74000 نوسان می‌کند 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

¹ - Count Per Minuets

² -United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation

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 طیف سنج هوایی می‌توان خروج رادون را در روزهای رادونی مشخص کرد (دورنس، ۱۹۸۶).

غلظت رادون در آب‌های زیرزمینی متأثر از شرایط هیدرودینامیکی، ساختار زمین‌شناختی (به ویژه شکل و وضعیت منافذ و شکل سنگها)، کانی‌شناسی اورانیوم و رادیوم و غلظت آنها در خاک و سنگ بوده (آلبو و همکارانش، ۱۹۹۷) و اغلب در آب‌هایی که در سنگ‌های آذرین نفوذ می‌کنند بیشتر است (آندر هیل، ۱۹۹۶). بر اساس مطالعات راجرز اگر سنگ تشکیل‌دهنده یک سفره آب زیرزمینی دارای ۱ میلی گرم اورانیوم در هر کیلوگرم باشد غلظت رادون در آب زیرزمینی درون سنگ به بیش از ۳۰۰۰۰ بکرل در متر مکعب خواهد رسید (روگرس، ۱۹۵۸). مقدار آن در آب‌های شور حوضه های نفتی بیش از آب‌های زیرزمینی در اعماق کم عمق است (نورس، ۱۹۸۵). علت آن عدم تهویه و هوادهی و در نتیجه، عدم امکان خروج رادون از آن آب‌ها است. به طور کلی، دامنه تغییرات رادون در آب‌های زیرزمینی یا معدنی از ۳۷۰۰ تا $10^6 \times 111$ بکرل در هر متر مکعب گزارش شده است (گچ، ۱۹۹۵).

خاطرنشان می‌سازد که رادون موجود در آب‌های زیرزمینی و معدنی 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 علاوه بر آب‌های معدنی و منابع چاه و هوا و خاک در نفت و گازهای طبیعی نیز وجود دارد. غلظت آن در نفت خام در حد ۳/۷ تا ۱۵ بکرل در کیلوگرم گزارش شده است که قسمت عمده آن در مرحله جداسازی گاز طبیعی از آن جدا می‌شود. پرتوژیایی طبیعی را که رادون یکی از منابع آن است در نفت و گاز طبیعی یافت می‌شود، چون از مرحله خروج هیدروکربنها از چاه تا مصرف آنها در ساختمانها مدت نسبتاً طولانی سپری می‌شود، مقدار رادون در آنها بسیار کاهش یافته و تقریباً بی‌خطر می‌شوند. (نورس، ۱۹۸۵)

غلظت رادون در هوای عادی (فضای آزاد) به علت حجم زیاد و حرارت مداوم آن معمولاً کمتر از ۱۵ بکرل در متر مکعب بوده 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 111000 Bq/m^3 گزارش شده است. متوسط

غلظت رادون در این فضاها معمولا از ۳۷ تا ۷۴ Bq/m^3 است و قسمت عمده آن از طریق منافذ خاک و سنگ وارد ساختمان می‌شود، گرچه ممکن است آب زیرزمینی مورد مصرف در ساختمان نیز در تولید آن موثر باشند (کلرو همکارانش، ۱۹۹۰). راههای ورود رادون به خانه‌ها از طریق آب‌های زیرزمینی و یا معدنی مورد مصرف در خانه‌ها می‌توان به درزهای موجود در محل اتصالات، درزهای موجود در دیوارها، حفره‌های درون دیوارها، شکستگیهای کف ساختمان و طبقات بالا، لوله های آب و فاضلاب، و بالاخره رادون متمرکز شده در زیرزمین‌ها را می‌توان اشاره کرد (پیکرینک . همکارانش، ۱۹۹۷). شکل ۲-۲

باتوجه به اینکه رادون موجود در منافذ خاک و سنگ منبع اصلی رادون درون ساختمانها است، نحوه ورود به ساختمان و عوامل موثر در تشدید و یا کاهش غلظت این گاز موثر می‌باشد. قبلا اشاره شد که تنها قسمت اندکی از رادون حاصل از واپاشی ^{226}Ra موجود در خاک و سنگ وارد منافذ خاک گردیده و جابجا می‌شود. سهم این قسمت را با ضریب متصاعدشدن^۱ می‌سنجند، که مقدارش تابع اندازه ذرات، ساختمان و مقدار آب خاک است. رادونی که وارد منافذ خاک می‌شوند، به صورتهای انتشار و همرفت جابه جا 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 فشار کمتر جابه‌جا شده و همراه با خود (به صورت همرفت) گاز رادون را نیز انتقال می‌دهد (مدیچی و همکارانش، ۱۹۹۴).

۲-۳- مواجهه با رادون در اماکن مسکونی:

مقادیر رادون در هوای داخل اماکن مسکونی را می‌توان به روشهای متعدد فیزیکی (۴ روش زیر)

پایین آورد:

۱- بهبود تهویه منازل و بخصوص افزایش تهویه در سطوح پایین ساختمانها (که به زمین نزدیکترند)

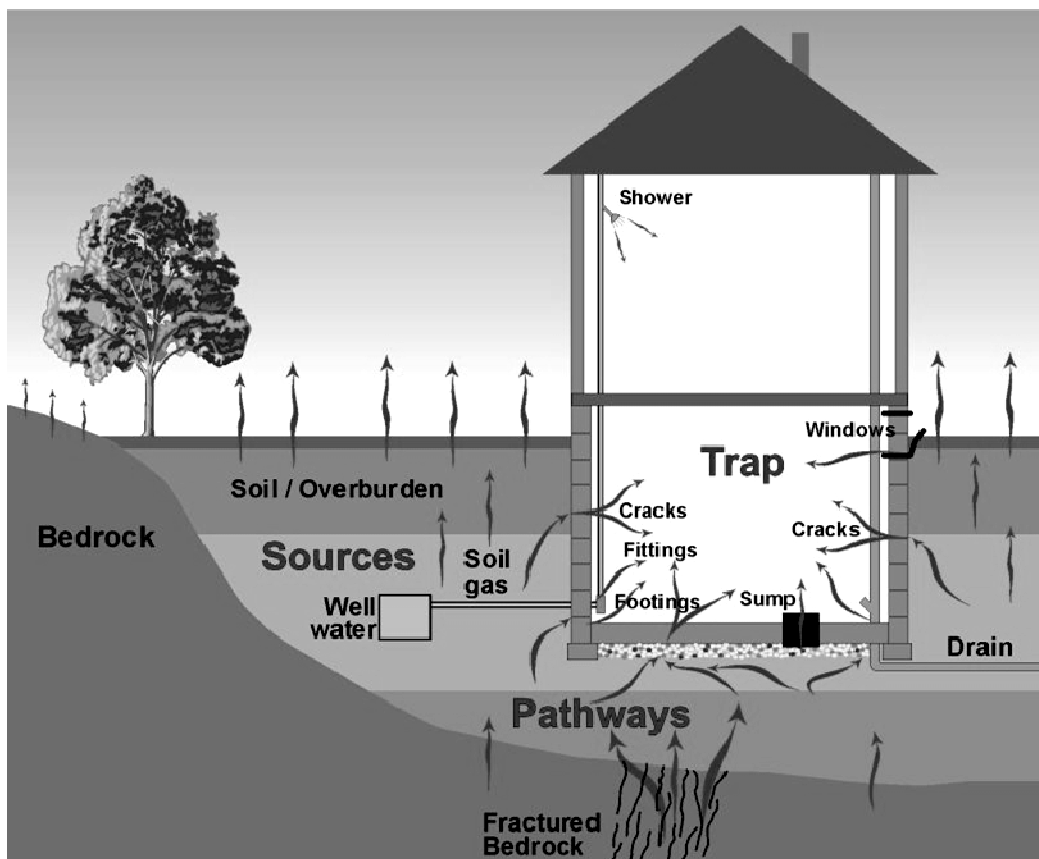
۲- جلوگیری از نفوذ رادون سطح زیرین ساختمانها به اطاقهای درون

۳- بکارگیری سیستم تهویه مثبت^۲

۴- بکارگیری سیستم چاه انبار رادونی^۱

¹ Emanation Coefficient

² Air condition



شکل ۲-۲- راههای نفوذ و ورود گاز رادون از خاک به درون آبهای معدنی و منازل

جهت ایمنی در مقابل رادون نباید برای ساخت خانه های جدید تدابیری در نظر گرفته شود. (بویژه در مناطقی که غلظت گاز رادون بالا می باشد) در این خصوص با توجه به ارتباط رادون بالا و خطرات آن، در اروپا و ایالات متحده اندازه گیری های محتاطانه به منظور مداخله در ساخت وسازهای جدید به صورت یک رویه متعادل درآمده است.

به طور کلی، مقدار رادون در فضای بسته بسیار متفاوت است و در صورت وجود ترک ها و شکاف هایی در کف و دیوار ساختمانها، افزایش می یابد و غلظت این گاز در زیرزمین ها و معادن بیشتر است (کچ، ۱۹۹۵) و در طبقه همکف ساختمانها به طور متوسط ۵۰ درصد بیش از طبقه اول است (نیل و همکارانش، ۱۹۹۳) چون ساختمانهای جدید به منظور کاهش اتلاف انرژی گرمایی، نسبت به خروج هوای داخل، بهتر عایق کاری می شوند و معمولا تهویه آنها ضعیف تر است، میزان تجمع رادون در آنها اغلب اندکی بیشتر است (پازوش، ۱۹۸۷).

¹ Radon sump system

مقدار گاز رادون داخل یک ساختمان در طول مدت شبانه روز تغییر می کند. به طور کلی در شب افزایش و در روز کاهش می یابد، علاوه بر این در روز به سبب باز ویسته شدن درها مقداری از آن تخلیه می شود (پیکرینگ، ۱۹۹۷). غلظت رادون در فصلهای مختلف سال نیز تغییرپذیر است در تابستان که تبادل هوا از طریق پنجره ها و کولرها بخوبی انجام می شود غلظت آن کمتر خواهد بود. به طور کلی، هر اقدامی که باعث کاهش فشار هوا در داخل ساختمان شود به ورود رادون از خاک به ساختمان کمک خواهد کرد (میلر و همکارانش، ۱۹۷۳).

۲-۴- سری ترازهای انرژی گاز رادون:

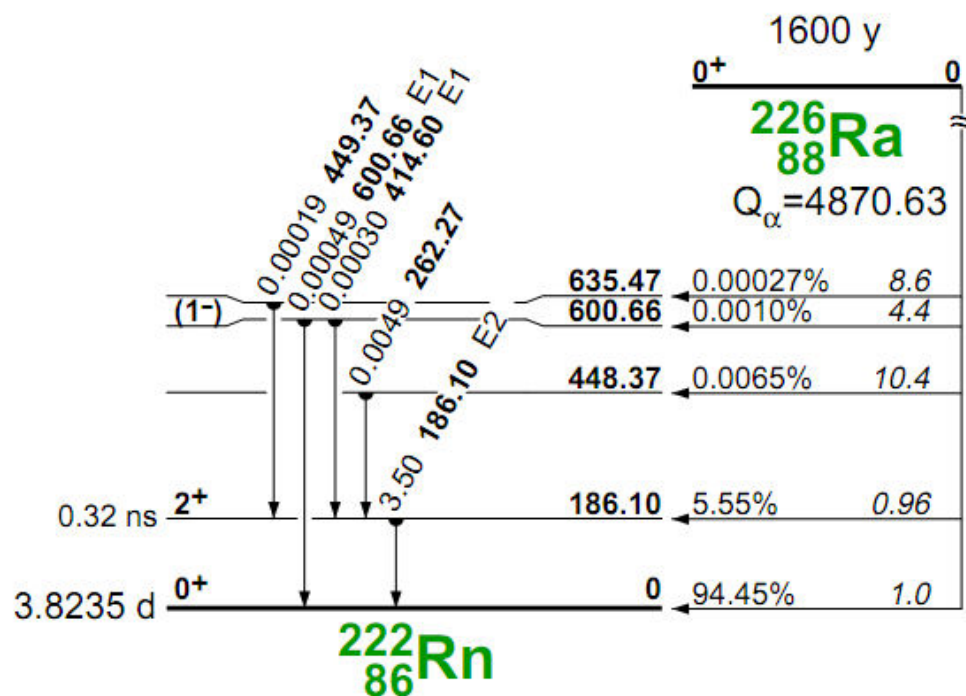
گاز رادون یکی از مهمترین عناصر رادیواکتیو است که از واپاشی اورانیم و رادیوم طبیعی موجود در زمین متصاعد می شود و به طور طبیعی در خاک، هوا و آب یافت می شود. غلظت رادون موجود در آب چشمه ها ارتباط تنگاتنگی با منشاء ژئوترمال آن ها دارد. وجود این گاز در آب های معدنی علاوه بر فواید که در فصل بعد به آن اشاره خواهد شد خطراتی را نیز برای سلامتی انسان ایجاد می کند. در طبیعت سه سری رادیواکتیو وجود دارد: سری اورانیم، توریم و اکتینیم. محصول نهایی هر سری ایزوتوپ پایدار از سرب است.

در هر متر مکعب از کره زمین بیش از یک میلیون اتم اورانیم موجود است که در هر ثانیه واپاشیده می شود در نتیجه واپاشی اورانیم و رسیدن به عنصر پایدار سرب، یک زنجیره واپاشی بوجود می آید. در میان این زنجیره واپاشی عنصر رادون تنها گازی است که گسیل می شود. لذا این گاز را اصطلاحاً گاز نادر رادیواکتیو می نامند. این گاز می تواند بدون هیچ پیوند شیمیائی و یا گیرافتادن در میان شبکه های بلوری از زمین فرار کند. گاز رادون در هوا، آب و صخره ها و خاک موجود می باشد. یکی از منابع اصلی گاز رادون، آب های زیر زمینی است. طی واکنش زیر رادون وارد آب زیر زمینی شده و از آنجا می تواند وارد هوای محیط شود.

اورانیم ۲۳۸ (نیمه عمر ۴/۴ بیلیون سال) ← رادیوم ۲۲۶ (نیمه عمر ۱۶۲۰ سال) ← رادون ۲۲۲ (نیمه عمر ۳/۸۲ روز).

گاز رادون یکی از عناصر پرتوزای طبیعی بی‌رنگ و بی‌بویی است که از واپاشی اورانیم و رادیم و توریم طبیعی موجود در زمین ایجاد می‌شود. پایدارترین ایزوتوپ این عنصر ^{222}Rn است که دارای نیمه عمر ۳/۸۲ روز و از واپاشی اورانیم (^{238}U) حاصل می‌شود و در پرتودرمانی از آن استفاده می‌کنند (لبیدی و همکارانش، ۲۰۰۲).

سری واپاشی و ترازهای انرژی تبدیل رادیوم به رادون توسط شکل ۲-۳ و طیف‌های واپاشی با نیمه عمرهای مختلف نشان داده شده است. (ریچارد، ۱۹۹۶)



شکل ۲-۳- نمودار ترازهای انرژی از تبدیل رادیوم به رادون

عنصر رادیواکتیو رادون به طور طبیعی به دو صورت گاز موجود در هوا یا رادون موجود در آب یافت می‌شود و از آنجا که تحت شرایط فشار و دمای محیط حلالیت فوق‌العاده زیادی دارد، بنابراین در کلیه منابع آبی موجود بر روی کره زمین از جمله رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها و در داخل آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ها، حتی نزولات جوی همچون باران، برف و تگرگ یافت می‌شود. تحقیقات نشان داده است که آب‌های معدنی به دلیل عبور از بین سنگ‌ها و رسوباتی با ترکیباتی متفاوت دارای املاح مختلفی از رادیم و توریم به صورت محلول هستند که در اثر استحاله و تجزیه، تبدیل به گازهای رادون و

تورون می‌شوند. اما به علت نیم‌عمر کوتاه عنصر تورون بخش مهم گازهای پرتوزای موجود در آب‌های معدنی را رادون تشکیل می‌دهد. (مصباح، ۱۳۸۷)

اگرچه وجود رادون در آب‌ها کمک بزرگی به بشریت جهت شناسائی و پیش‌بینی زمان وقوع زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی، جابجائی گسل‌ها و تحقیقات علم هیدرولوژی بوده اما اثرات زیست محیطی مهلکی نیز فراهم آورده است. همانطوری که رادون به خوبی در آب حل می‌شود به همان راحتی هم از محیط آبی آزاد شده و وارد محیط پیرامون آب می‌گردد، به طوری که یکی از منابع عمده انتشار گاز رادون در محیط زیست بعد از خاک، منابع آبی به ویژه آب‌های معدنی به حساب می‌آید. (بردلی، ۱۹۹۳)

حدود ۵۰٪ دز جذبی مؤثر گاز رادون از طریق تنفس و آشامیدن آب به ویژه به هنگام استحمام کردن و شستشو وارد بدن انسان می‌شود. بالا بودن میزان تمرکز گاز رادون در هوای اطراف چشمه‌ها سبب می‌شود که این گاز از طریق تنفس وارد ریه شود. از آنجا که رادون نسبت به زمان‌های تنفس دارای نیمه عمری بیشتری است، در داخل ریه باقی مانده و بعداً واپاشی کرده و به دختران خود که به صورت جامد بوده تبدیل می‌شود. این دختران از طریق جذب ذرات آلفا به ریه‌ها آسیب رسانده و می‌تواند سلامت افراد را به خطر اندازد. (مولوی و همکارانش، ۱۳۸۸)

منابع پرتوزای طبیعی عامل اصلی در پرتوگیری بشر و موجودات زنده محسوب می‌شوند. این منابع به طور مستمر بر دز دریافتی انسان تأثیر گذاشته و بسته به غلظت هسته‌های پرتوزای طبیعی و نحوه پرتوگیری از آن‌ها، زیان‌هایی را به همراه دارند. تجمع گاز رادون در مکان‌های بسته به ویژه منازل مسکونی و محیط‌های کار و اثرات بیولوژیکی آن یکی از مسائلی است که در بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان مورد ارزیابی منظم و مداوم قرار می‌گیرد. (بوچی چیو، بودانسکی، سردی، ۲۰۰۵، ۱۹۸۷، ۲۰۰۳)

۲-۵- غلظت گاز رادون در آب :

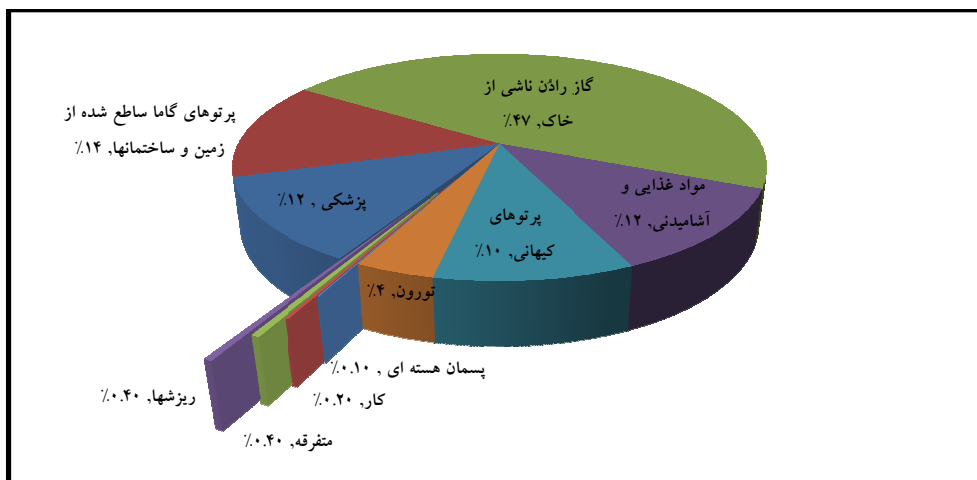
غلظت گاز رادون در آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ها به نوع و سن سنگ‌های طبقه آبدسته بستگی دارد، ساختار زمین‌شناسی سنگ‌های طبقه آبدسته به دو گروه عمده تقسیم می‌شود:

۲-۵-۱: طبقات آبدسته متشکل از سنگ‌های آذرین و دگرگونی که غلظت گاز رادون در چشمه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی این نوع طبقات آبدسته تابع غلظت اورانیم موجود در سنگ‌های آن طبقه و راندمان انتقال گاز رادون از فاز جامد به فاز مایع است (سهرابی، ۱۹۹۹). آب با داشتن خاصیت فوق‌اشباعی توانایی انبساط سریع گاز رادون را داراست، به ویژه در شرایطی که تلاطم و بهم‌خوردگی کافی ایجاد گردد، یعنی زمانی که آب‌های زیرزمینی از طبقات آبدسته غنی از اورانیم می‌گذرد، تولید و انتقال گاز رادون در فاز جامد، مایع و گاز صورت می‌گیرد (ویوانیتیکیت، ۲۰۰۹).

۲-۵-۲: طبقات آبدسته با ساختار زمین‌شناسی از نوع رسوبی (لایه‌ای، کربناته) که انتقال گاز رادون حاصل از واپاشی عناصر رادیواکتیو در آن‌ها منوط به درصد تخلخل و میزان حفرات موجود در آن‌ها است که خود در ارتباط با ضخامت و سن رسوبات می‌باشد. (بابایی و همکارانش، ۱۳۸۸)

۲-۶- درصد دز دریافتی:

مقدار دز دریافتی از تشعشعات و مواد رادیواکتیو به صورت سالانه توسط شکل ۲-۴ زیر به صورت درصد دریافتی از منابع مختلف که به صورت سالانه به ازای هر فرد به بدن آن وارد می‌شود، نشان داده شده است. با توجه به شکل زیر رادون به تنهایی بیش از نیمی از تابش دریافتی هر فرد را در مقایسه با تشعشعات دیگر که سالانه دریافت می‌کند، به طور قابل ملاحظه‌ای بسیار محسوس می‌باشد و ما را ملزوم به اقدامات لازم و پیگیری جهت راهکارهایی برای کاهش دز دریافتی آن می‌دارد. (NCRP Report, 2009)



شکل ۲-۴- درصد دز دریافتی سالیانه از چشمه های مختلف

۲-۷- خطر گاز رادون:

در جریان تنفس، به علت کوتاه بودن زمان توقف هوا در ریه ها، در اثر بازدم، ۷۵ تا ۸۰ درصد رادون موجود در هوا تقریباً بدون اینکه به بدن آسیبی برساند خارج می شود. ولی محصولات واپاشی ۲۰ تا ۲۵ درصد دیگر آن، یعنی ^{218}Po ، ^{214}Po ، ^{214}Pb و ^{214}Bi که محصول پایدار واپاشی زنجیردار به صورت رسوب حالت جامد، عامل اصلی خطر می باشند، که در میان آنها ^{214}Po و ^{218}Po مهم ترند (آلپن، ۱۹۹۰). این عناصر پرتوزا که همه آنها جامدند، هنگامی که در ریه تولید شوند به جدار آن می چسبند و ممکن است حتی وارد جریان خون شوند (آندرهیل، ۱۹۹۶). ذرات آلفای ساطع شده از آنها، که هسته هلیوم دارای بار مثبت می باشند، به سرعت انرژی خود را از دست می دهند. بنابراین اگر در هوای آزاد تولید شوند نمی توانند 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 می گیرند انرژی ذرات آلفای ساطع شده در حجم کوچکی از بافت متمرکز می شوند و باعث شکستن پیوندهای شیمیایی، یونش، تشکیل بنیان های آزاد و آسیب رساندن به مولکولهای DNA می گردد. در هر حال تغییراتی که در سلولها پدیدار می شوند ممکن است برگشت پذیر (جبران شونده) یا برگشت ناپذیر باشند. تغییرات برگشت ناپذیر ممکن است موجب بروز سرطان در ریه شوند. عناصر جامد ناشی از واپاشی رادون در هوا نیز ممکن است به ذرات غبار