

ارزیابی پرتوگیری مردم از پرتوهای طبیعی زمینه گاما و رادن در شهر کاشان

منصور جعفری زاده^{۱*}، مصطفی زاهدی فر^۲، مهران طاهری^۳، سمانه برادران^۴ و فلامرز ترکزاده^۱

^۱ پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

^۲ گروه فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

^۳ امور حفاظت در برابر اشعه کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

^۴ تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، امور حفاظت در برابر اشعه کشور، کدپستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵

پست الکترونیک: mjafarizadeh@aeoi.org.ir

چکیده

در این پژوهش، پرتوگیری مردم کاشان از پرتوهای طبیعی گاما و رادن ارزیابی شده است. میانگین دز مؤثر سالانه مردم ناشی از تنفس گاز رادن $0.22 \pm 0.07 \text{ mSv}$ و میانگین پرتوگیری خارجی مردم ناشی از پرتوهای گامای محیطی حدود $0.97 \pm 0.05 \text{ mSv}$ در سال و در مجموع، میانگین پرتوگیری سالانه مردم از پرتوهای گاما و رادن $3.74 \pm 0.22 \text{ mSv}$ ارزیابی شده است. برای اندازه‌گیری پرتوهای گاما از دزنسج ترمولومینسانس LiF:Mg,Cu,P و برای اندازه‌گیری رادن از فیلم پلی‌کربنات (lexan) استفاده شده است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، شهر کاشان جزء مناطق با پرتوژیایی طبیعی زمینه عادی قرار می‌گیرد.

کلیدواژگان: رادن، غلظت رادن، پرتوگاما، پرتو طبیعی، کاشان.

۱. مقدمه

انسان‌ها از ابتدای پیدایش زمین به‌طور پیوسته در معرض تابش‌های یونیزان طبیعی بوده و از این تابش‌ها که تابش طبیعی زمینه یا تابش محیطی نامیده می‌شوند، پرتوگیری کرده‌اند. تابش‌های محیطی دو دسته‌اند: تابش‌های کیهانی و تابش‌های زمینی. ذرات پرانرژی که از ستارگان و خارج از اتمسفر زمین انتشار می‌یابند، وقتی وارد اتمسفر زمین می‌شوند، با هسته‌های عناصر تشکیل‌دهنده آن برخوردهای آبخاری نموده و محصولات ثانویه به وجود می‌آورند که در نهایت، پرتوهای کیهانی را تشکیل می‌دهند. شدت این پرتوها به تدریج تا به سطح زمین برسند، کاهش می‌یابد. در اثر این برخوردها برخی هسته‌های پرتوزا با منشأ کیهانی مانند ^3H ، ^{14}C و ^{22}Na تولید می‌شوند. هسته‌های پرتوزای با منشأ کیهانی، سهم کمی در پرتوگیری مردم دارند، به‌طوری‌که دز مؤثر سالانه ناشی از آن‌ها به ترتیب ۱۲

میکروسیورت برای ^{14}C ، 0.15 میکروسیورت برای ^{22}Na و 0.01 میکروسیورت برای ^3H ارزیابی شده است [۱ و ۲]. تابش‌های زمینی از هسته‌های پرتوزای موجود در پوسته زمین انتشار می‌یابند و با غلظت‌های مختلف در محیط‌های طبیعی شامل آب، خاک و هوا و همچنین در بدن انسان وجود دارند. برخی از هسته‌های پرتوزای موجود در پوسته زمین، هنگام پیدایش زمین تولید شده‌اند؛ مانند هسته‌های موجود در سری واپاشی اورانیم و توریم، همچنین هسته‌های پتاسیم-۴۰ و روبیدوم-۸۷ و برخی دیگر ساخته دست بشرند؛ مانند سزیم-۱۳۷ و استرانسیم-۹۰ که به دلیل آزمایش‌های هسته‌ای که از سال ۱۹۴۵ میلادی شروع شد، روی زمین نهشت یافتند. سهم قابل توجهی از پرتوگیری خارجی انسان ناشی از پرتوهای گاما است که از هسته‌های پرتوزای موجود در سری واپاشی ^{238}U ، سری واپاشی ^{232}Th و ^{40}K انتشار می‌یابند. این هسته‌ها

همچنین از طریق مواد غذایی می توانند به داخل بدن انسان منتقل شوند و اندام های مختلف بدن را به وسیله ذرات آلفا و بتا و پرتوهای گاما پرتودهی کرده و باعث پرتوگیری داخلی انسان شوند. برخی هسته های پرتوزای دیگر نیز در طبیعت وجود دارند؛ مانند محصولات واپاشی در سری ^{238}U ، هسته های پرتوزای ^{87}Rb ، ^{138}La ، ^{147}Sm و ^{176}Lu ، اما مقدار آن ها خیلی کم است و سهم ناچیزی در پرتوگیری انسان دارند.

هر دوی تابش های کیهانی و زمینی منجر به پرتوگیری خارجی مردم می شوند، درحالی که برخی از هسته های پرتوزای موجود در پوسته زمین، از طریق مواد غذایی و تنفس وارد بدن شده و منجر به پرتوگیری داخلی می شوند. رادن و محصولات واپاشی کوتاه عمر آن (دختران رادن) مهم ترین و بیشترین سهم را در پرتوگیری داخلی انسان ها از منابع طبیعی پرتوزا دارند. رادن یک گاز پرتوزای بی رنگ، بی بو و بی اثر (^{222}Rn) از محصولات واپاشی هسته پرتوزای ^{226}Ra در سری ^{238}U است. رادن با نیمه عمر ۳/۸ روز به طور پیوسته از خاک و صخره ها انتشار می یابد. گاز رادن در فضای آزاد، به سرعت رقیق شده و خطری متوجه انسان ها نمی نماید. در صورتی که این گاز از لایه های زمین زیر ساختمان ها انتشار یابد، به داخل فضای ساختمان ها نفوذ کرده و به تدریج، غلظت آن در داخل ساختمان بالا می رود و از طریق تنفس وارد ریه انسان ها شده و در درازمدت می تواند باعث بروز سرطان ریه شود. طبق گزارش های مراکز بین المللی و کشوری نظیر کمیته علمی اثرات پرتوهای اتمی سازمان ملل متحد ($^{1}\text{UNSCEAR}$)، سازمان بهداشت جهانی (^{2}WHO) و آژانس حفاظت محیطی آمریکا (^{3}EPA) تنفس گاز پرتوزای رادن خطر ابتلا به سرطان ریه را افزایش می دهد و بعد از سیگار، دومین عامل ابتلا به سرطان ریه و مرگ ناشی از آن است [۱، ۳، ۴ و ۵].

براساس گزارش $^{1}\text{UNSCEAR}$ در مناطق با پرتوهای زمینه عادی، میانگین جهانی دز مؤثر مردم از پرتوهای طبیعی ۲/۴ میلی سیورت است و ۱/۲ میلی سیورت آن ناشی از گاز رادن و

دختران آن است [۱]. از این رو در سال های اخیر، پژوهش های گسترده ای در سطح بین المللی در زمینه ارزیابی پرتوگیری مردم از پرتوهای طبیعی و به خصوص رادن صورت پذیرفته و همچنان ادامه دارد. اندازه گیری پرتوزای طبیعی در محیط زندگی مردم و ارزیابی پرتوگیری آن ها می تواند اطلاعات مفیدی برای مطالعات اپیدمیولوژیکی و تعیین راهکارهای مناسب برای کاهش پرتوگیری مردم از این منابع در اختیار واحدهای قانونی کشورها قرار دهد. در این پژوهش، پرتوهای گاما و رادن در ۱۰۰ واحد مسکونی در طبقات مختلف از زیرزمین تا طبقه دوم اندازه گیری شده اند. برای بررسی اثر مصالح ساختمانی در پرتوزایی زمینه، ساختمان های قدیمی ساخته شده از خشت و گل و ساختمان های جدید ساخته شده از آجر و سیمان انتخاب شده اند.

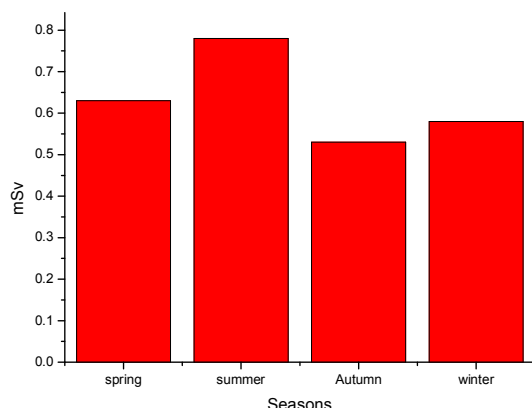
۲. اندازه گیری پرتوهای گاما

برای اندازه گیری پرتوهای گاما قرص های دزسنج ترمولومینسانس از نوع LiF:Mg,Cu,P (GR-200) به قطر ۴/۵ میلی متر و ضخامت ۰/۹ میلی متر استفاده شده اند. به منظور آماده سازی و پاک کردن پرتوگیری قبلی، دزسنج ها ابتدا در کوره آزمایشگاهی در دمای 240°C به مدت ۱۰ دقیقه حرارت دهی شدند. سپس در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته ای کرج در میدان پرتوگامای سزیم-۱۳۷ با مقدار معین پرتودهی شدند. پس از پرتودهی، به منظور حذف قله های کم دما و حذف محوشدگی گرمایی در دمای 100°C به مدت ۱۰ دقیقه پیش گرمادهی شدند. پس از این مرحله، دزسنج ها تا دمای 240°C با آهنگ گرمادهی 10°C/s با استفاده از دستگاه خوانشگر دزسنج ترمولومینسانس در گاز نیتروژن خلوص بالا خوانده شدند. با استفاده از خوانش تصحیح شده دزسنج ها و رابطه های زیر، فاکتور ضریب حساسیت برای هر قرص دزسنج محاسبه شد.

$$TL_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(TL_i - TL_{\text{BKG}})] \quad (1)$$

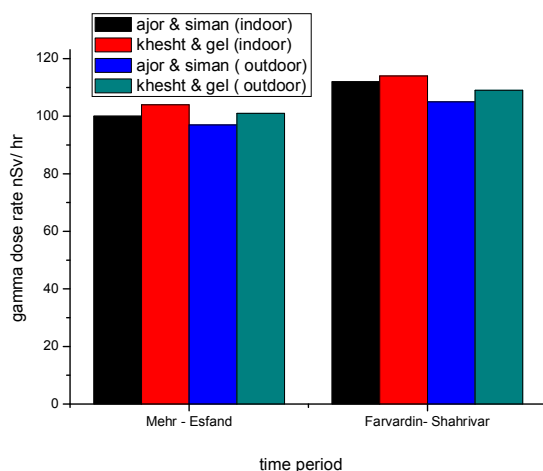
$$S_i = \frac{TL_{\text{mean}}}{TL_i - TL_{\text{BKG}}} \quad (2)$$

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
2. World Health Organization
3. Environmental Protection Agency



شکل ۱: پرتوزایی گاما در داخل ساختمان‌ها در فصل‌های مختلف اندازه‌گیری شده به وسیله دزنسج LiF:Mg,Cu,P

برای بررسی اثر مواد ساختمانی در پرتوزایی گاما، ساختمان‌های قدیمی ساخته شده از خشت و گل و ساختمان‌های جدید ساخته شده از آجر و سیمان، در نظر گرفته شد و پرتوزایی گاما در داخل و خارج از ساختمان، در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه دیوارهای ساختمان در برابر پرتوهای کیهانی مانند حفاظ عمل کرده و میزان پرتوهای کیهانی را در داخل ساختمان کاهش می‌دهند، انتظار می‌رود پرتوزایی گاما داخل ساختمان نسبت به بیرون آن کمتر باشد. در صورتی که همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، مقدار این پرتوها را در داخل ساختمان، به میزان پنج درصد بیشتر نسبت به خارج ساختمان نشان می‌دهد. این ویژگی نشان‌دهنده پرتوزایی گاما ناشی از هسته‌های پرتوزای موجود در مواد ساختمانی است.



شکل ۲: آهنگ دز گاما (nSv/hr) در داخل و خارج ساختمان‌ها با دو

نوع مصالح اندازه‌گیری شده به وسیله دزنسج LiF (Mg,Cu, P)

در رابطه‌های بالا، TL_{mean} میانگین خوانش دزنسج‌ها، TL_{BKG} خوانش دزنسج زمینه (در تمام فرایندهای دزنسجی، تعدادی از دزنسج‌ها به عنوان دزنسج زمینه انتخاب می‌شوند و پرتودهی نمی‌شوند. خوانش آن‌ها برای تصحیح خوانش دزنسج میدان استفاده می‌شود)، TL_i خوانش هریک از دزنسج‌ها و S_i ضریب حساسیت هر دزنسج است که به وزن و سابقه پرتوگیری دزنسج بستگی دارد. تعدادی از دزنسج‌های هم حساسیت (دارای ضریب حساسیت نزدیک به یک) پس از آماده‌سازی در میدان پرتوهای گاما سزیم-۱۳۷ با مقدار معین پرتودهی شدند و پس از اعمال پیش گرمادهی خوانده شدند. با قرار دادن مقدار خوانش دزنسج‌ها و مقدار پرتودهی در رابطه زیر، ضریب کالیبراسیون دزنسج‌ها محاسبه شد.

$$C.F^{-1} : Dose (mSv) / TL(nc) \quad (3)$$

دزنسج‌های TLD در قاب نگه‌دارنده مخصوص قرار گرفته و به همراه دزنسج رادن در بازه زمانی ۳ ماهه (فصلی) در ساختمان‌های مسکونی در فاصله یک متری از سطح زمین و دور از دیوارها و منابع گرمازا نصب شدند. در پایان هر فصل، دزنسج‌ها جمع‌آوری و در آزمایشگاه خوانده شدند. با قرار دادن خوانش دزنسج‌ها در رابطه زیر، دز محیطی گاما محاسبه شد.

$$Dose (mSv) = TL_{net} \times C.F \times S_i \times (RL_0 / RL) \quad (4)$$

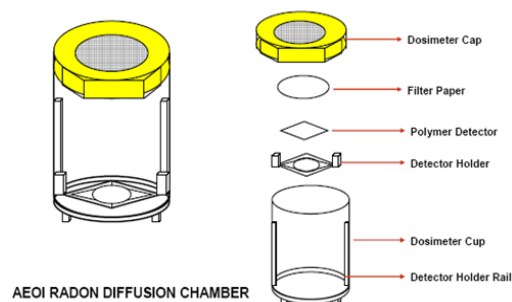
در رابطه بالا RL_0 نور مرجع خوانشگر TLD در زمان کالیبراسیون دزنسج‌ها، RL نور مرجع در زمان خوانش دزنسج میدان و TL_{net} خوانش تصحیح شده دزنسج نسبت به خوانش دزنسج زمینه است. در رابطه بالا، ضریب تصحیح انرژی و ضریب تصحیح فوق خطی شدن دزنسج در نظر گرفته نشده، زیرا آهنگ دز گامای محیط کم است. در اندازه‌گیری دز محیط در بازه‌های زمانی فصلی، خوانش دزنسج پیش‌گفته خطی نشده و به تصحیح انرژی پرتو نیز نیاز نیست [۶]. در شکل (۱)، دز فصلی گامای محیط در داخل ساختمان‌ها نشان داده است.

1. Calibration factor

۳. اندازه گیری غلظت گاز رادن

در این پژوهش، اندازه گیری رادن در ۱۰۰ واحد مسکونی بر مبنای وزن دهی جمعیت انجام شده است [۷]. واحدهای مسکونی به صورت تصادفی در طبقات مختلف، از زیرزمین تا طبقه دوم انتخاب شده اند. برخی از ساختمان های انتخاب شده برای اندازه گیری قدیمی و ساخته شده از خشت و گل و برخی نوساز و ساخته شده از آجر و سیمان بوده اند.

اتاقک نفوذی گاز رادن حاوی آشکارساز پلی کربنات (lexan) برای اندازه گیری رادن مورد استفاده قرار گرفته است. اتاقک مورد استفاده یک ظرف استوانه ای پلاستیکی با قطر داخلی ۶۴/۶ mm، ارتفاع ۸۶/۳ mm و حجم داخلی ۲۴۹ cm³ است. هوا از طریق درب اتاقک که دارای سوراخ های ریز به صورت شبکه است، به داخل آن جریان می یابد. یک فیلتر فایبرگلاس که زیر قسمت شبکه درب اتاقک قرار می گیرد، از نفوذ دختران رادن و تورون به داخل اتاقک جلوگیری می کند. آشکارساز پلی کربنات داخل اتاقک روی یک نگه دارنده پلاستیکی قرار می گیرد که توسط آن می توان آشکارساز را تا ارتفاع حداکثر ۴ cm بالاتر از کف اتاقک قرار داد. اتاقک و اجزای تشکیل دهنده آن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: اتاقک نفوذی رادن و اجزای آن

به دلیل اینکه رد پای ذرات آلفا ایجاد شده روی آشکارساز با چشم عادی قابل دیدن نیستند، روی فیلم ها فرایند خورش الکتروشیمیایی (ECE^۱) اعمال و سپس توسط میکروسکوپ نوری شمارش شدند. شرایط بهینه ترکیب محلول خورش PEW^۲ در فرایند ECE، دارای درصد جرمی ۴۵٪ H₂O +

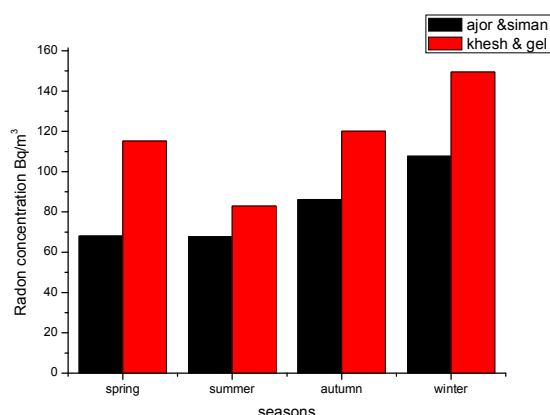
1. Electro Chemical Etching

2. P: KOH, E: C₂H₅OH, W: H₂O

۲ و دمای ۲۵ °C است. اطلاعات بیشتر درباره مشخصات اتاقک نفوذی رادن و فرایند خورش الکتروشیمیایی در سایر مقالات ارائه شده است [۸ و ۹]. کالیبراسیون اتاقک در محفظه حاوی غلظت معینی از رادن حدود ۲۹/۴ Bq.m⁻³ انجام شده است. به منظور پرتو دهی اتاقک در مقادیر مختلف غلظت رادن، زمان های پرتو دهی مختلف انتخاب شد و در زمان پرتو دهی، غلظت رادن درون محفظه با استفاده از دستگاه فعال اندازه گیری رادن اتاقک اندازه گیری و کنترل شده است. میانگین حساسیت به دست آمده اتاقک نفوذی رادن برابر با مقدار زیر است:

$$S = 15.1 \pm 0.6 \frac{\text{track cm}^2}{\text{Bq.m}^{-3} \cdot \text{day}} \quad (5)$$

پس از انجام فرایند کالیبراسیون، تعداد ۱۰۰ اتاقک برای نصب در ساختمان های مسکونی آماده سازی شدند. اندازه گیری در فصل های مختلف سال انجام شد. همچنین اندازه گیری ها در طبقه زیرزمین، اول و دوم ساختمان ها انجام شده است. محل نصب اتاقک نفوذی رادن دور از دیوار و منابع گرما بوده است. در شکل های (۴) و (۵) نتایج اندازه گیری غلظت رادن در فصل های مختلف و ساختمان های با مصالح ساختمانی خشت و گل و آجر و سیمان نشان داده شده است.



شکل ۴: تغییرات فصلی میانگین غلظت گاز رادن در ساختمان های مسکونی با مصالح ساختمانی مختلف در شهر کاشان اندازه گیری شده به روش غیرفعال

ناشی از تنفس رادن با غلظت معین در محیط باز (outdoor) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Dose}_{\text{out}} (\text{mSv}) = C_{\text{out}} \text{Rn} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}) \times 0.6(\text{EEC}) \times 0.2(\text{Occupancy Factor}) \times 8760 \text{ hy}^{-1} \times 9 \text{ nSv} (\text{Bq} \cdot \text{hm}^{-3})^{-1} \quad (6)$$

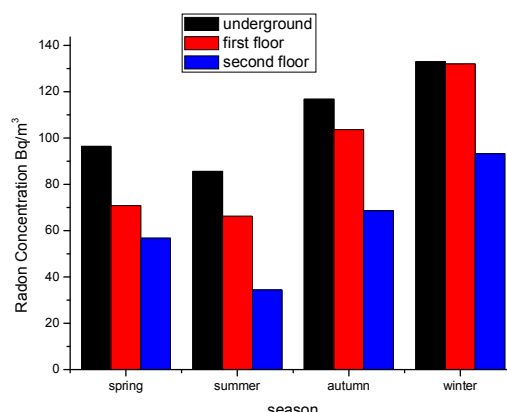
و دز ناشی از تنفس رادن با غلظت معین در محیط داخل ساختمان (indoor) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Dose}_{\text{in}} (\text{mSv}) = C_{\text{in}} \text{Rn} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}) \times 0.4(\text{EEC}) \times 0.8(\text{Occupancy Factor}) \times 8760 \text{ hy}^{-1} \times 9 \text{ nSv} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})^{-1} \quad (7)$$

در رابطه‌های (۶) و (۷)، فاکتور تبدیل غلظت رادن به دز معادل برابر با $9 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ برای $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ در محیط‌های باز و بسته است و 1 EEC معادل غلظت تعادلی رادن است که برای محیط‌های باز $0.6/0.4$ و برای محیط‌های بسته $0.4/0.6$ است. C_{in} و C_{out} به ترتیب برابر با غلظت گاز رادن در خارج و داخل ساختمان بر حسب $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ است. ضریب اشغال (Occupancy factor) برای محیط‌های باز 0.2 و برای محیط‌های بسته داخل ساختمان، 0.8 در نظر گرفته شده است. میانگین غلظت گاز رادن در داخل ساختمان‌های انتخاب شده در شهر کاشان، اعم از جدید و قدیمی، با روش غیرفعال حدود $8 \pm 100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ و خارج از ساختمان در هوای آزاد $2 \pm 27 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ اندازه‌گیری شده است. اطلاعات بیشتر پرتوای رادن در خانه‌های مسکونی قدیمی ساخته شده از خشت و گل و ساختمان‌های جدید ساخته شده از آجر و سیمان در مقاله دیگر ارائه شده است [۱۲]. با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷) میانگین دز مؤثر سالانه مردم از رادن $0.22 \pm 0.77 \text{ mSv}$ برآورد شده است.

۲.۴. ارزیابی پرتوگیری خارجی

نتایج اندازه‌گیری فصلی پرتوای گامای زمینه در داخل



شکل ۵: تغییرات فصلی میانگین غلظت گاز رادن طبقه‌های مختلف ساختمان‌های مسکونی کاشان اندازه‌گیری شده به روش غیرفعال

۴. محاسبه پرتوگیری مردم از پرتوهای رادن و گاما

محصولات واپاشی رادن و نیمه‌عمر آن‌ها در تعیین سهم آن‌ها در پرتودهی سلول‌ها و مجاری هوا در ریه بسیار مهم‌اند. نیمه‌عمر رادن 3.82 روز است. محصولات واپاشی رادن و نیمه‌عمر آن‌ها عبارت‌اند از: پلونیوم-۲۱۸ (^{218}Po ، 3.105 دقیقه)، سرب-۲۱۴ (^{214}Pb ، 26.8 دقیقه)، بیسموت-۲۱۴ (^{214}Bi ، 19.9 دقیقه) و پلونیوم-۲۱۴ (^{214}Po ، 164 میکروثانیه). هردو ایزوتوپ پلونیوم انتشاردهنده آلفا هستند. به‌طور کلی، پژوهشگران بر این باورند که ذرات آلفا انتشاریافته از رادن و محصولات واپاشی آن، بیشترین سهم را در پرتودهی سلول‌های ریه دارند که می‌تواند منجر به سرطان ریه شود [۱ و ۱۰]. مردم از دو مسیر اصلی پرتوگیری می‌کنند: پرتوگیری خارجی ناشی از پرتوهای انتشاریافته از مواد پرتوزای موجود در پوسته زمین و پرتوهای کیهانی و پرتوگیری داخلی که از طریق مصرف مواد غذایی حاوی مواد پرتوزا و تنفس گاز رادن رخ می‌دهد [۱]. در این پژوهش، تنها پرتوگیری داخلی ناشی از تنفس گاز رادن بررسی شده است.

۱.۴. ارزیابی پرتوگیری داخلی ناشی از تنفس گاز رادن

برای محاسبه پرتوگیری داخلی مردم ناشی از تنفس گاز رادن از رابطه‌های ارائه شده در UNSCEAR استفاده می‌شود [۱۱] که دز

ساختمان‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. میانگین آهنگ دز گاما در داخل ساختمان‌های مسکونی، اعم از ساختمان‌های جدید و قدیمی، با روش غیرفعال با استفاده از دزیترهای ترمولومینسانس $\text{LiF}:(\text{Mg,Cu,P})$ حدود 111 ± 7 (nGy/hr) و خارج از ساختمان حدود 106 ± 6 (nGy/hr) اندازه‌گیری شده است. آهنگ دز داخل ساختمان حدود ۵ درصد بیشتر از خارج ساختمان است که افزایش آهنگ دز در داخل ساختمان، ناشی از پرتوهای گامای انتشاریافته از هسته‌های پرتوزای موجود در مصالح ساختمانی است.

۳.۴. ارزیابی پرتوگیری سالانه مردم ناشی از پرتوگیری

خارجی و پرتوگیری داخلی از رادن

میانگین پرتوگیری خارجی (دز مؤثر) سالانه مردم از پرتوهای طبیعی گاما با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۹) [۱۱] خارج و داخل ساختمان به ترتیب، 0.19 ± 0.01 mSv و 0.05 mSv ± 0.78 محاسبه شده است. در مجموع، میانگین پرتوگیری خارجی مردم ناشی از پرتوهای گامای محیطی حدود 0.05 ± 0.97 در سال برآورد شده است.

$$\text{Dose}_{\square} (\mu\text{Sv/y})_{\text{outdoor}} = D(\text{nGy/h}) \times 0.2(\text{Occupancy Factor}) \times 8760 \text{ hy}^{-1} \times 0.7 (\text{Sv/Gy}) \times 10^{-3} \quad (8)$$

$$\text{Dose}_{\square} (\mu\text{Sv/y})_{\text{indoor}} = D(\text{nGy/h}) \times 0.8(\text{Occupancy Factor}) \times 8760 \text{ hy}^{-1} \times 0.7 (\text{Sv/Gy}) \times 10^{-3} \quad (9)$$

در رابطه‌های (۸) و (۹)، ضریب اشغال برای محیط‌های باز، 0.2 و برای محیط‌های بسته، 0.8 در نظر گرفته شده است. 0.7×10^{-3} ضریب تبدیل Gy به Sv است.

$D(\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1})$ آهنگ دز گامای محیطی است. با استفاده از مقادیر میانگین پرتوگیری داخلی ناشی از تنفس گاز رادن 22 ± 0.77 mSv و میانگین پرتوگیری خارجی ناشی از پرتو گاما زمینه 0.05 ± 0.97 mSv، میانگین پرتوگیری سالانه

22 ± 0.77 mSv ارزیابی شده است. در این ارزیابی، پرتوگیری داخلی ناشی از ورود مواد پرتوزا به بدن، از طریق مواد غذایی در نظر گرفته نشده است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام‌شده، میانگین غلظت رادن در داخل ساختمان‌های مسکونی شهر کاشان، 100 ± 8 Bq/m³ و در هوای آزاد، 27 ± 2 Bq/m³ با روش غیرفعال اندازه‌گیری شده است. همچنین میانگین پرتوزایی گامای زمینه با استفاده از روش غیرفعال در داخل ساختمان‌ها 111 ± 7 (nGy/hr) و خارج ساختمان‌ها در هوای آزاد 106 ± 6 (nGy/hr) اندازه‌گیری شده است. با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده، میانگین پرتوگیری سالانه مردم کاشان از رادن و گامای زمینه 22 ± 0.77 mSv ارزیابی شده است که در مقایسه با میانگین جهانی پرتوگیری مردم از پرتوهای طبیعی، 2.4 mSv [۱] حدود ۵۰٪ بیشتر است. این مقدار با توجه به بستگی مقدار پرتوهای طبیعی زمینه به طول و عرض جغرافیایی، ساختار زمین‌شناسی و موجودی مواد پرتوزا در ساختار پوسته زمین منطقه، موجودی مواد پرتوزا در مصالح ساختمانی و همچنین طبقه ساختمان مسکونی، دور از انتظار نیست. به‌خصوص اینکه برخی مواد به‌کاررفته در ساختمان‌ها خشت و گل بوده است. همچنین برخی واحدهای ساختمانی در زیر زمین واقع شده‌اند که غلظت رادن در آن‌ها بیشتر بوده است. چنانچه با توجه به شکل (۴)، میزان تغییرات غلظت گاز رادن در منازل با مصالح خشت و گل نسبت به آجر و سیمان، حدود ۴۰٪-۲۰٪ بیشتر است. همچنین با توجه به شکل (۵) میزان غلظت گاز رادن با افزایش طبقه کاهش می‌یابد، ضمن آنکه در زمستان به دلیل بسته بودن در و پنجره ساختمان‌ها و نبود گردش هوا، رادن در ساختمان تجمع یافته و روند تغییرات غلظت گاز رادن مشابه فصل تابستان نیست. با در نظر گرفتن نتایج به‌دست‌آمده، شهر

خارجی) اندازه‌گیری رادن و گامای زمینه در دو بازه زمانی فصل گرم و سرد انجام شود. ضمن آنکه باید سهم پرتوگیری مردم از مواد خوراکی حاوی مواد پرتوزا نیز تعیین شود.

کاشان جزء مناطق با پرتوزایی طبیعی عادی قرار می‌گیرد. پیشنهاد می‌شود با توجه به تغییرات در نوع مصالح مورد استفاده در ساختمان‌سازی و ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه ضروری است جهت برآورد دقیق‌تر پرتوگیری مردم (داخلی و

۶. مراجع

- [1] UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionization Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, (2000).
 - [2] UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, (1993).
 - [3] WHO/HSE/RAD/07.01, International radon project, (2007). www.who.org.
 - [4] EPA, A Citizen's Guide to Radon, www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html.
 - [5] L. Eldridge, Lung Cancer Statistics, Health's Disease and Condition content is reviewed by the Medical Review Board; September 12, (2012).
 - [6] M. Oberhofer, and A. Sharmann, Applied thermoluminescence dosimetry, Adam Hilger Ltd, Bristol, (1981).
 - [7] IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33, National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings, (2013).
 - [8] M. Sohrabi, A.R. Solaymanian, Some characteristics of AEOI passive radon diffusion dosimeter, Nuclear Tracks and Radiation Measurements, Vol. 15, Nos. 1-4, p.605, (1988a).
 - [9] M. Taheri, S. Hosseini Toudeshki. Characteristic studies for fast detection of a wide energy range of alpha particles in polycarbonate detectors," Radiation Measurements, vol. 40, no. 2-6, pp. 307-310, (2005).
 - [10] P. Hopke, B. Jensen, C.S. Li et al. Assessment of the exposure to and dose from radon decay products in normally occupied homes. Environ. Sci. Technol. 29: 1359-1364 (1995).
 - [11] UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionization Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, (2006).
- [۱۲] جعفری‌زاده، منصور، زاهدی‌فر، مصطفی، طاهری، مهران، برادران، سمانه. «اندازه‌گیری غلظت رادن در برخی ساختمان‌های مسکونی شهر کاشان»، مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۲، شماره ۲، بهار (۱۳۹۳).