

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

منصور جعفری زاده<sup>۱\*</sup>، مصطفی زاهدی فر<sup>۲</sup>، مهران طاهری<sup>۳</sup>، سمانه برادران<sup>۴</sup> و فلامرز ترکزاده<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup>گروه فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

<sup>۳</sup>امور حفاظت در برابر اشعه کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

<sup>۴</sup>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  $0.22 \pm 0.077 \text{ mSv}$  و میانگین پرتوگیری خارجی مردم ناشی از پرتوهای گامای محیطی حدود  $0.05 \pm 0.097 \text{ mSv}$  در سال و در مجموع، میانگین پرتوگیری سالانه مردم از پرتوهای گاما و رادن  $0.27 \pm 0.037 \text{ mSv}$  ارزیابی شده است. برای اندازه‌گیری پرتوهای گاما از دزنسج ترمولومینسانس  $\text{LiF:Mg,Cu,P}$  و برای اندازه‌گیری رادن از فیلم پلی‌کربنات (lexan) استفاده شده است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، شهر کاشان جزء مناطق با پرتوگیری طبیعی زمینه عادی قرار می‌گیرد.

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

### ۱. مقدمه

میکروسیورت برای  $^{14}\text{C}$ ،  $0.15$  میکروسیورت برای  $^{23}\text{Na}$  و  $0.01$  میکروسیورت برای  $^3\text{H}$  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 روبیدیوم-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  $^{238}\text{U}$ ، سری واپاشی  $^{232}\text{Th}$  و  $^{40}\text{K}$  انتشار می‌یابند. این هسته‌ها

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 به‌تدریج تا به سطح زمین برسند، کاهش می‌یابد. در اثر این برخوردها برخی هسته‌های پرتوزا با منشأ کیهانی مانند  $^3\text{H}$ ،  $^{14}\text{C}$  و  $^{23}\text{Na}$  تولید می‌شوند. هسته‌های پرتوزای با منشأ کیهانی، سهم کمی در پرتوگیری مردم دارند، به‌طوری‌که دز مؤثر سالانه ناشی از آن‌ها به‌ترتیب ۱۲

دختران آن است [۱]. از این رو در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در سطح بین‌المللی در زمینه ارزیابی پرتوگیری مردم از پرتوهای طبیعی و به‌خصوص رادن صورت پذیرفته و همچنان ادامه دارد. اندازه‌گیری پرتوزای طبیعی در محیط زندگی مردم و ارزیابی پرتوگیری آن‌ها می‌تواند 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 اندازه‌گیری شده‌اند. برای بررسی اثر مصالح ساختمانی در پرتوزایی زمینه، ساختمان‌های قدیمی ساخته‌شده از خشت و گل و ساختمان‌های جدید ساخته‌شده از آجر و سیمان انتخاب شده‌اند.

## ۲. اندازه‌گیری پرتوهای گاما

برای اندازه‌گیری پرتوهای گاما قرص‌های دزسنج ترمولومینسانس از نوع LiF:Mg,Cu,P (GR-200) به قطر ۴/۵ میلی‌متر و ضخامت ۰/۹ میلی‌متر استفاده شده‌اند. به‌منظور آماده‌سازی و پاک‌کردن پرتوگیری قبلی، دزسنج‌ها ابتدا در کوره آزمایشگاهی در دمای  $240^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه حرارت‌دهی شدند. سپس در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج در میدان پرتوگامای سزیم-۱۳۷ با مقدار معین پرتودهی شدند. پس از پرتودهی، به‌منظور حذف قله‌های کم‌دما و حذف محوشدگی گرمایی در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه پیش‌گرمادهی شدند. پس از این مرحله، دزسنج‌ها تا دمای  $240^{\circ}\text{C}$  با آهنگ گرمادهی  $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$  با استفاده از دستگاه خوانشگر دزسنج ترمولومینسانس در گاز نیتروژن خلوص بالا خوانده شدند. با استفاده از خوانش تصحیح‌شده دزسنج‌ها و رابطه‌های زیر، فاکتور ضریب حساسیت برای هر قرص دزسنج محاسبه شد.

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

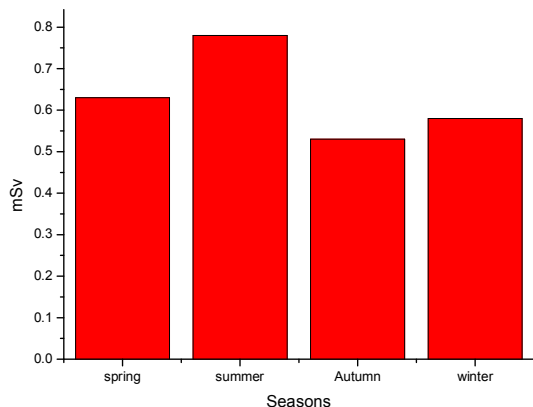
$$S_i = \frac{TL_{\text{mean}}}{TL_i - TL_{\text{BKG}}} \quad (2)$$

همچنین از طریق مواد غذایی می‌توانند به داخل بدن انسان منتقل شوند و اندام‌های مختلف بدن را به‌وسیله ذرات آلفا و بتا و پرتوهای گاما پرتودهی کرده و باعث پرتوگیری داخلی انسان شوند. برخی هسته‌های پرتوزای دیگر نیز در طبیعت وجود دارند؛ مانند محصولات واپاشی در سری  $^{238}\text{U}$ ، هسته‌های پرتوزای  $^{87}\text{Rb}$ ،  $^{138}\text{La}$ ،  $^{147}\text{Sm}$  و  $^{176}\text{Lu}$ ، اما مقدار آن‌ها خیلی کم است و سهم ناچیزی در پرتوگیری انسان دارند.

هر دوی تابش‌های کیهانی و زمینی منجر به پرتوگیری خارجی مردم می‌شوند، درحالی‌که برخی از هسته‌های پرتوزای موجود در پوسته زمین، از طریق مواد غذایی و تنفس وارد بدن شده و منجر به پرتوگیری داخلی می‌شوند. رادن و محصولات واپاشی کوتاه عمر آن (دختران رادن) مهم‌ترین و بیشترین سهم را در پرتوگیری داخلی انسان‌ها از منابع طبیعی پرتوزا دارند. رادن یک گاز پرتوزای بی‌رنگ، بی‌بو و بی‌اثر ( $^{222}\text{Rn}$ ) از محصولات واپاشی هسته پرتوزای  $^{226}\text{Ra}$  در سری  $^{238}\text{U}$  است. رادن با نیمه‌عمر ۳/۸ روز به‌طور پیوسته از خاک و صخره‌ها انتشار می‌یابد. گاز رادن در فضای آزاد، به‌سرعت رقیق شده و خطری متوجه انسان‌ها نمی‌نماید. در صورتی‌که این گاز از لایه‌های زمین زیر ساختمان‌ها انتشار یابد، به داخل فضای ساختمان‌ها نفوذ کرده و به‌تدریج، غلظت آن در داخل ساختمان بالا می‌رود و از طریق تنفس وارد ریه انسان‌ها شده و در درازمدت می‌تواند باعث بروز سرطان ریه شود. طبق گزارش‌های مراکز بین‌المللی و کشوری نظیر کمیته علمی اثرات پرتوهای اتمی سازمان ملل متحد ( $^1\text{UNSCEAR}$ )، سازمان بهداشت جهانی ( $^2\text{WHO}$ ) و آژانس حفاظت محیطی آمریکا ( $^3\text{EPA}$ ) تنفس گاز پرتوزای رادن خطر ابتلا به سرطان ریه را افزایش می‌دهد و بعد از سیگار، دومین عامل ابتلا به سرطان ریه و مرگ ناشی از آن است [۱، ۳، ۴ و ۵].

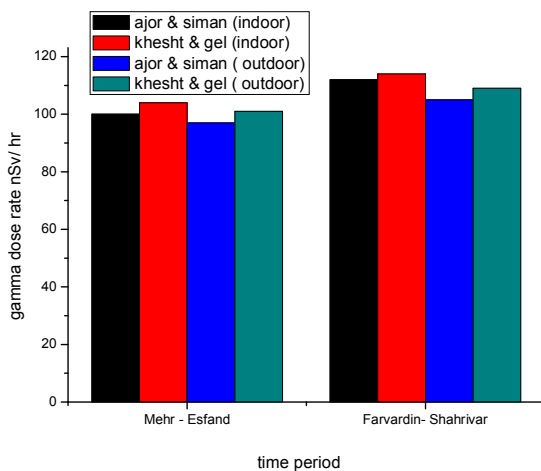
براساس گزارش  $^1\text{UNSCEAR}$  در مناطق با پرتوهای زمینه عادی، میانگین جهانی دز مؤثر مردم از پرتوهای طبیعی ۲/۴ میلی‌سیورت است و ۱/۲ میلی‌سیورت آن ناشی از گاز رادن و

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 به‌عنوان 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 پیش‌گرمادهی 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 به‌همراه 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.

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

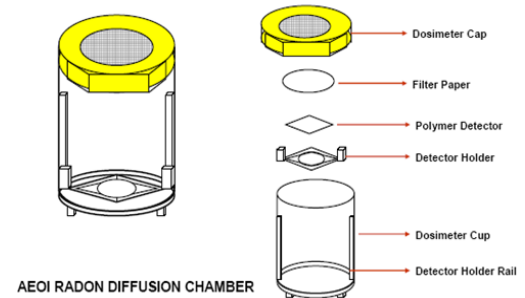
در رابطه بالا  $RL_0$  نور مرجع خوانشگر TLD در زمان کالیبراسیون دزنسج‌ها،  $RL$  نور مرجع در زمان خوانش دزنسج میدان و  $TL_{net}$  خوانش تصحیح‌شده دزنسج نسبت به خوانش دزنسج زمینه است. در رابطه بالا، ضریب تصحیح انرژی و ضریب تصحیح فوق خطی شدن دزنسج در نظر گرفته نشده، زیرا آهنگ دز گامای محیط کم است. در 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. اندازه‌گیری غلظت گاز رادن

در این پژوهش، اندازه‌گیری رادن در ۱۰۰ واحد مسکونی بر مبنای وزن‌دهی جمعیت انجام شده است [۷]. واحدهای مسکونی به صورت تصادفی در طبقات مختلف، از زیرزمین تا طبقه دوم انتخاب شده‌اند. برخی از ساختمان‌های انتخاب شده برای اندازه‌گیری قدیمی و ساخته شده از خشت و گل و برخی نوساز و ساخته شده از آجر و سیمان بوده‌اند.

اتاقک نفوذی گاز رادن حاوی آشکارساز پلی‌کربنات (lexan) برای اندازه‌گیری رادن مورد استفاده قرار گرفته است. اتاقک مورد استفاده یک ظرف استوانه‌ای پلاستیکی با قطر داخلی ۶۴/۶ mm، ارتفاع ۸۶/۳ mm و حجم داخلی ۲۴۹ cm<sup>3</sup> است. هوا از طریق درب اتاقک که دارای سوراخ‌های ریز به صورت شبکه است، به داخل آن جریان می‌یابد. یک فیلتر فایبرگلاس که زیر قسمت شبکه درب اتاقک قرار می‌گیرد، از نفوذ دختران رادن و تورون به داخل اتاقک جلوگیری می‌کند. آشکارساز پلی‌کربنات داخل اتاقک روی یک نگه‌دارنده پلاستیکی قرار می‌گیرد که توسط آن می‌توان 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.



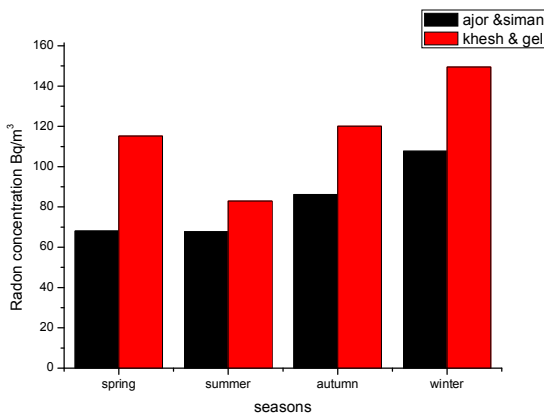
شکل ۳: اتاقک نفوذی رادن و اجزای آن

به دلیل اینکه رد پای ذرات آلفا ایجاد شده روی آشکارساز با چشم عادی قابل دیدن نیستند، روی فیلم‌ها فرایند خورش الکتروشیمیایی (ECE<sup>1</sup>) اعمال و سپس توسط میکروسکوپ نوری شمارش شدند. شرایط بهینه ترکیب محلول خورش PEW<sup>۲</sup> در فرایند ECE، دارای درصد جرمی ۴۵٪ H<sub>2</sub>O +

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<sup>-3</sup> انجام شده است. به منظور پرتودهی اتاقک در مقادیر مختلف غلظت رادن، زمان‌های پرتودهی مختلف انتخاب شد و در زمان پرتودهی، غلظت رادن درون محفظه با استفاده از دستگاه فعال اندازه‌گیری رادن اتاقک اندازه‌گیری 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 ساختمان‌های مسکونی آماده‌سازی شدند. اندازه‌گیری در فصل‌های مختلف سال انجام شد. همچنین اندازه‌گیری‌ها در طبقه زیرزمین، اول و دوم ساختمان‌ها انجام شده است. محل نصب اتاقک نفوذی رادن دور از دیوار و منابع گرما بوده است. در شکل‌های (۴) و (۵) نتایج اندازه‌گیری غلظت رادن در فصل‌های مختلف و ساختمان‌های با مصالح ساختمانی خشت و گل و آجر و سیمان نشان داده شده است.



شکل ۴: تغییرات فصلی میانگین غلظت گاز رادن در ساختمان‌های مسکونی با مصالح ساختمانی مختلف در شهر کاشان اندازه‌گیری شده به روش غیرفعال

1. Electro Chemical Etching
2. P: KOH, E: C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, W: H<sub>2</sub>O

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

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

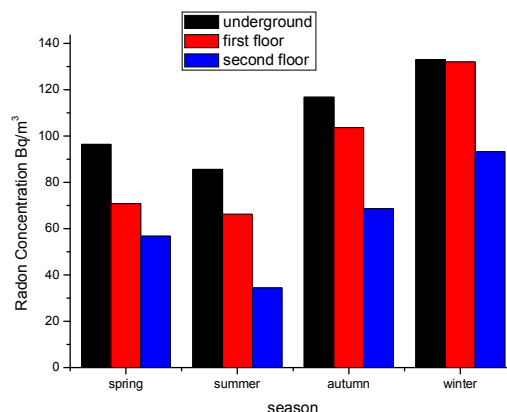
و دز ناشی از تنفس رادن با غلظت معین در محیط داخل ساختمان (indoor) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

در رابطه‌های (۶) و (۷)، فاکتور تبدیل غلظت رادن به دز معادل برابر با  $9 \text{nSv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  برای  $1 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  در محیط‌های باز و بسته است و  $EEC^1$  معادل غلظت تعادلی رادن است که برای محیط‌های باز  $0.6/0.4$  و برای محیط‌های بسته  $0.4/0.6$  است.  $C_{\text{in}}$  و  $C_{\text{out}}$  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 پرتوگیری 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 پرتوگیری گامای زمین 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 ( $^{218}\text{Po}$ ،  $3/05$  دقیقه)، سرب-۲۱۴ ( $^{214}\text{Pb}$ ،  $26/8$  دقیقه)، بیسموت-۲۱۴ ( $^{214}\text{Bi}$ ،  $19/9$  دقیقه) و پلونیوم-۲۱۴ ( $^{214}\text{Po}$ ،  $164$  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

۳/۷۴±۰/۲۲mSv 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 نتیجه گیری

در پژوهش انجام شده، میانگین غلظت رادن در داخل ساختمان‌های مسکونی شهر کاشان،  $100 \pm 8 \text{ Bq/m}^3$  و در هوای آزاد،  $27 \pm 2 \text{ Bq/m}^3$  با روش غیرفعال اندازه‌گیری شده است. همچنین میانگین پرتوزایی گامای زمینه با استفاده از روش غیرفعال در داخل ساختمان‌ها  $7 \pm 111 \text{ (nGy/hr)}$  و خارج ساختمان‌ها در هوای آزاد  $6 \pm 106 \text{ (nGy/hr)}$  اندازه‌گیری شده است. با استفاده از اطلاعات به دست آمده، میانگین پرتوگیری سالانه مردم کاشان از رادن و گامای زمینه  $3/74 \pm 0/22 \text{ mSv}$  ارزیابی شده است که در مقایسه با میانگین جهانی پرتوگیری مردم از پرتوهای طبیعی،  $2/4 \text{ mSv}$  [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. به خصوص اینکه برخی مواد به کار رفته 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 به دست آمده، شهر

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 دزیمترهای ترمولومینسانس  $\text{LiF:(Mg,Cu,P)}$  حدود  $7 \pm 111 \text{ (nGy/hr)}$  و خارج از ساختمان حدود  $6 \pm 106 \text{ (nGy/hr)}$  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 انتشار یافته 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،  $0/19 \pm 0/01 \text{ mSv}$  و  $0/05 \text{ mSv}$  ± ۰/۷۸ محاسبه شده است. در مجموع، میانگین پرتوگیری خارجی مردم ناشی از پرتوهای گامای محیطی حدود  $0/97 \pm 0/05 \text{ mSv}$  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، ۰/۲ و برای محیط‌های بسته، ۰/۸ در نظر گرفته شده است.  $0.7 \times 10^{-3}$  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  $2/77 \pm 0/22 \text{ mSv}$  و میانگین پرتوگیری خارجی ناشی از پرتو گاما زمینه  $0/97 \pm 0/05 \text{ mSv}$ ، میانگین پرتوگیری سالانه

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 پرتوژایی 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](http://www.who.org).
- [4] EPA, A Citizen's Guide to Radon, [www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html](http://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).