



## برآورد دز جذبی الکترون گسیلیده از دختران رادون-۲۲۲ با به کارگیری روش‌های کاهش واریانس در فانتوم ORNL

شילה بناری بهنمیری\*<sup>۱</sup>، سیدهاشم میری حکیم‌آباد<sup>۲</sup>، رضا ایزدی نجف‌آبادی<sup>۲</sup>

۱. مؤسسه آموزش عالی طبری، صندوق پستی: ۸۶۳-۴۷۱۳۵، بابل - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی: ۹۱۷۳۵-۱۳۴، مشهد - ایران

**چکیده:** بخش عمده‌ای از پرتوگیری بشر از محیط زندگی ناشی از گاز رادون است. مطالعات نشان داده که رادون دومین علت ابتلا به سرطان ریه بعد از سیگار است. منبع اصلی رادون-۲۲۲، اورانیم-۲۳۸ (با نیم-عمر  $4.5 \times 10^9$  سال) است و به همین دلیل تولید آن در طبیعت با وجود نیم-عمر کوتاهش استمرار دارد. رادون در خاک، هوا، معادن، آب‌های زیرزمینی، نفت، گاز طبیعی و مصالح ساختمانی وجود دارد که از راه استنشاق وارد مجاری سیستم تنفسی انسان می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است با وجود این که بسیاری از خانه‌های مناطق کشور ما ایران بر روی بسترهایی از سنگ‌های گرانیات احداث شده است، پژوهش و بررسی‌های جدی در این زمینه انجام نشده است. لذا انجام محاسبات دقیق دز جذبی ناشی از تابش دختران رادون در عضوهای بدن انسان به منظور برآورد خطر، ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله محاسبات دزیمتری عضوهای بدن برای تابش بتا و الکترون تبدیل داخلی گسیلیده از رادون-۲۲۲ و دخترانش به روش مونت کارلو، با استفاده از کد محاسباتی MCNPX2.4.0 و فانتوم تصحیح شده‌ی انسان بالغ ORNL و با به کارگیری روش‌های کاهش واریانس انجام شده و دز مؤثر تمام بدن برای این تابش‌ها  $5.93 \mu\text{SvWLM}^{-1}$  به دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** دختران رادون-۲۲۲، روش کاهش واریانس، فانتوم ORNL، دز جذبی الکترون

## Estimated Dose of Electrons Emitted from Radon-222 Progenies Applying Variance Reduction Methods in ORNL Phantom

Sh. Banari Bahnamiri<sup>1</sup>\*, S.H. Miri Hakimabad<sup>2</sup>, R. Izadi Najafabadi<sup>2</sup>

1. Tabari Institute of Higher Education, P.O.Box: 47135-863, Babol - Iran

2. Physics Department, School of Science, Ferdowsi University of Mashhad, P.O.Box: 91735-134, Mashhad - Iran

**Abstract:** Radon is the main source of radioactivity in the environment. Scientific investigations revealed that after the smoking, radon ranked as the second cause of lung cancer. Despite the short half life of Radon-222, it is produced continuously in nature, as its main source is the decay of uranium-238 with the half life time of  $4.5 \times 10^9$  years. Radon exists in air, mines, oil, natural gas, building materials and groundwater; therefore it may easily enter the lung through the inspiratory system and emits alpha, beta, gamma, X-ray and conversion electron. These particles and radiations which can deposit their energies in different organs are considered to be very harmful for the human health. Although, many houses have been built on a bed of granite rock, the exact assessment for the amount of radon in the residential houses has not yet been carried out. In this regard, a serious analysis is needed to be made in this field, in particular, for calculation of different organs' absorbed dose of Radon and its progenies. In this study, Monte Carlo calculations have been made using MCNPX2.4.0 code and the variance reduction methods were applied for the calculations of the absorbed dose due to beta particle and the conversion electron from decay of Radon and its progenies. An effective dose rate of  $5.93 \mu\text{SvWLM}^{-1}$  in this respect has been evaluated for the human body.

**Keywords:** 222-Radon Progeny, Variance Raduction Method, ORNL Phantom, Dose of Electrons

\*email: shila\_banari@yahoo.com

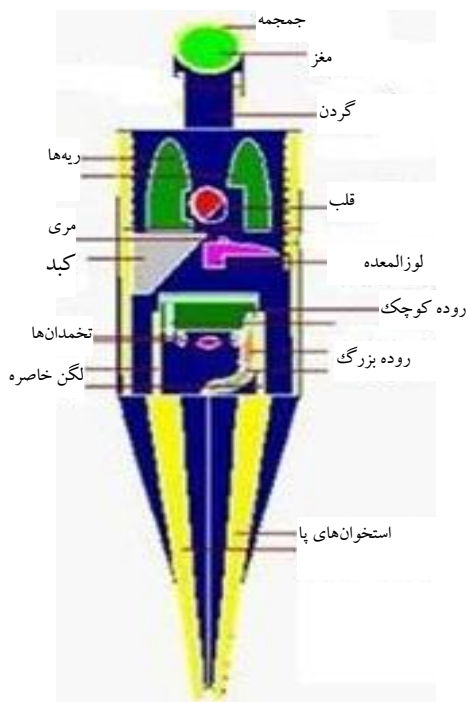
## ۱. مقدمه

طبق گزارش کار گروه علمی سازمان ملل در خصوص اثرهای تابش اتمی<sup>(۱)</sup> در سال ۲۰۰۰ میلادی مقدار متوسط پرتوگیری سالیانه‌ی انسان از تمام منابع پرتوزای طبیعی در مناطق با پرتوژایی زمینه،  $2.4 \text{ mSv}$  در سال برآورد شد که در حدود ۵۲٪ یعنی بیش از نیمی از این پرتوگیری ناشی از استنشاق گاز رادون و مابقی مربوط به دیگر منابع پرتوزای طبیعی است [۱]. رادون، گازی بی‌رنگ، بی‌بو، بی‌مزه، خنثی، پرتوزا با نیم-عمر ۳٫۸ روز است [۲]. از بین سه ایزوتوپ طبیعی رادون یعنی،  $^{222}\text{Rn}$ ،  $^{220}\text{Rn}$  و  $^{219}\text{Rn}$  تنها  $^{222}\text{Rn}$  (با نیم-عمر ۳٫۸ روز) فرصت رسیدن به سطح زمین را دارد و از طریق شکاف‌ها، ترک‌ها، مصالح ساختمانی، نقاط اتصال، فضای خالی اطراف لوله، اتصالات در دیوار، کف و آب‌های زیرزمینی وارد ساختمان می‌شود [۳]. چون رادون یک گاز خنثی است، تقریباً تمام رادونی که استنشاق می‌شود در فرایند بازدم خارج می‌شود. ولی محصولات واپاشی آن به مولکول‌های آب و گازهای اتمسفر و هم‌چنین ذرات معلق موجود در هوا می‌چسبند و در طی فرایند تنفس، هم بخش چسبیده و هم بخش نچسبیده به ذرات، وارد مجاری سیستم تنفسی می‌شوند. این ذرات در سطوح مجاری تنفسی ته‌نشین می‌شوند و با توجه به نیم-عمر کم‌تر از نیم ساعت‌شان در همان جا واپاشی می‌کنند [۴]. از بین دختران کوتاه-عمر رادون-۲۲۲، دو ایزوتوپ  $^{218}\text{Po}$  و  $^{214}\text{Po}$  آلفا گسیل‌اند. ذرات آلفا به علت برد کوتاه‌شان در ریه باقی‌مانده و به بافت حساس آن آسیب می‌رسانند. ضمناً دو ایزوتوپ  $^{214}\text{Bi}$  و  $^{214}\text{Pb}$  بتاگسیل‌اند. اگرچه آسیب ناشی از ذره‌ی آلفا بسیار بیش‌تر از فوتون و الکترون است، ولی چون الکترون‌ها و فوتون‌ها قابلیت نفوذ بالاتری نسبت به ذرات آلفا دارند، از ریه خارج شده و در دیگر عضوهای بدن انرژی به جا گذاشته و به بافت‌ها آسیب می‌رسانند. به همین علت دزیمتری الکترون و فوتون مهم تلقی می‌شوند، به ویژه وقتی که قرارگیری در معرض تابش رادون با غلظت‌های بالا طولانی مدت باشد. این وضعیت برای کارگران معادن اورانیمی که مدت طولانی در معرض تابش رادون با غلظت‌های بالا قرار می‌گیرند، پیش می‌آید.

در این پژوهش دزیمتری الکترون برای تابش‌های بتا و الکترون تبدیل داخلی گسیلیده از دو دختر بتاگسیل رادون-۲۲۲ با استفاده از فانتوم تصحیح شده‌ی ORNL و با به کارگیری روش‌های کاهش واریانس به وسیله‌ی کد محاسباتی MCNPX2.4.0 انجام شد.

## ۲. روش انجام محاسبات

دز رسیده به عضوهای بدن به واسطه‌ی واپاشی دختران رادون را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد؛ چرا که لازمی این امر قرار دادن دزیمتر در درون عضوهای بدن موجود زنده است که در عمل امکان‌پذیر نیست. لذا لازم است از روش‌های محاسباتی استفاده شود. در این پژوهش با استفاده از فانتوم ریاضی تصحیح شده‌ی ORNL که در آن عضوهای بدن انسان مطابق با واقعیت با استفاده از فرمول‌های ریاضی شبیه‌سازی شد، محاسبات دزیمتری انجام شد. این فانتوم، فانتوم کامل کریستی<sup>(۲)</sup> و اکرمین<sup>(۳)</sup> است که در آن مدل تیروئید یونالوفسکی<sup>(۴)</sup> به خاطر دقت بالای آن نسبت به مدل تیروئید اکرمین و کریستی جای‌گزین آن شد. گردن نیز از مدل ریمان<sup>(۵)</sup> به فانتوم اضافه شد. هم‌چنین خطاهای هم‌پوشانی که در بعضی قسمت‌ها وجود داشت برطرف شد. نواحی اصلی فانتوم تصحیح شده‌ی ORNL، (۱) یک استوانه‌ی بیضی‌وار نشان‌دهنده‌ی تنه و دست‌ها، (۲) دو مخروط مایل ناقص نشان‌دهنده‌ی دو پا، (۳) یک استوانه‌ی بیضی‌وار به علاوه‌ی یک نیم‌بیضی‌وار معرف سروصورت، (۴) یک استوانه‌ی بیضی‌وار نماینده‌ی گردن، و (۵) برشی از استوانه و قسمتی از دو بیضی‌وار نشان‌دهنده‌ی تیروئید است [۵]. شکل ۱ برش عرضی این فانتوم را نشان می‌دهد. تمام عضوهای فانتوم مرد و زن بالغ مشابه هم هستند و فقط در بعضی از اعضا تفاوت وجود دارد که در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص شده است.



شکل ۱. برش عرضی فانتوم مرد بزرگ سال.

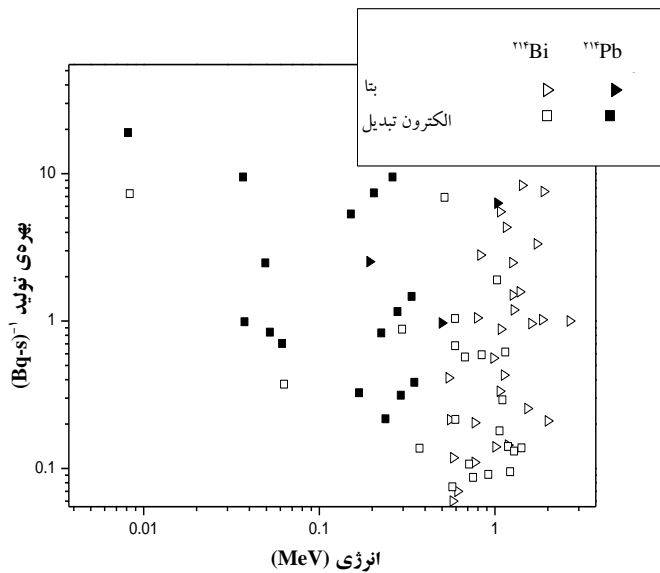


**جدول ۱.** نتایج محاسبات دز جذبی تابش بتای دختران  $^{214}\text{Pb}$  و  $^{214}\text{Bi}$  ( $\mu\text{GyWLM}^{-1}$ ) در اندام‌های مختلف بدن

| خطای نسبی (%)<br>$^{214}\text{Bi}$ | دز جذبی بتای<br>$^{214}\text{Bi}$ | خطای نسبی (%)<br>$^{214}\text{Pb}$ | دز جذبی بتای<br>$^{214}\text{Pb}$ | عضو              | جنسیت          |
|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|----------------|
| ۱٫۸۵                               | $۱٫۴۳۲ \times 10^{-۵}$            | ۱٫۵۱                               | $۲٫۶۰۲ \times 10^{-۵}$            | کلیه‌ها          |                |
| ۱٫۶۷                               | $۴٫۱۲۷ \times 10^{-۴}$            | ۱٫۴۷                               | $۷٫۷۰۹ \times 10^{-۵}$            | لوزالمعده        |                |
| ۶٫۲۱                               | $۵٫۹۷۵ \times 10^{-۵}$            | ۲٫۰۱                               | $۴٫۴۷۰ \times 10^{-۶}$            | روده‌ی کوچک      |                |
| ۰٫۳۸۲                              | $۱٫۲۲۲ \times 10^{-۳}$            | ۲٫۷۶                               | $۲٫۵۱۲ \times 10^{-۴}$            | آدرنال‌ها        |                |
| ۴٫۰۲                               | $۴٫۱۱۵ \times 10^{-۴}$            | ۴٫۱۲                               | $۳٫۶۸۰ \times 10^{-۵}$            | کیسه‌ی صفرا      |                |
| ۰٫۷۴                               | $۵٫۵۱۹ \times 10^{-۳}$            | ۰٫۴۴                               | $۲٫۴۹۱ \times 10^{-۴}$            | قلب              |                |
| ۰٫۶۶                               | $۳٫۶۸۱ \times 10^{-۴}$            | ۰٫۵۲                               | $۲٫۷۵۵ \times 10^{-۵}$            | پوست             |                |
| ۳٫۸۷                               | $۲٫۴۲۸ \times 10^{-۳}$            | ۲٫۲۶                               | $۴٫۲۰۶ \times 10^{-۵}$            | تیروئید          |                |
| ۲٫۴۱                               | $۳٫۴۹۱ \times 10^{-۳}$            | ۱٫۵۶                               | $۸٫۸۵۱ \times 10^{-۵}$            | معده             |                |
| ۰٫۲۷                               | $۲٫۳۶۰ \times 10^{-۳}$            | ۰٫۱۶                               | $۱٫۲۱۸ \times 10^{-۴}$            | سطوح استخوانی    | عضوهای مشترک   |
| ۰٫۰۰                               | $۳٫۲۵۵ \times 10^{-۱}$            | ۰٫۰۰                               | ۸٫۷۴۸                             | ریه              |                |
| ۱٫۲۸                               | $۴٫۰۱۳ \times 10^{-۳}$            | ۱٫۱۹                               | $۲٫۵۶۵ \times 10^{-۵}$            | مری              |                |
| ۳٫۰۱                               | $۵٫۶۸۰ \times 10^{-۵}$            | ۶٫۱۳                               | $۳٫۲۶۳ \times 10^{-۷}$            | مثانه            |                |
| ۲٫۴۵                               | $۲٫۰۶۲ \times 10^{-۴}$            | ۲٫۳۳                               | $۳٫۶۶۵ \times 10^{-۴}$            | تیموس‌ها         |                |
| ۰٫۴۲                               | $۸٫۴۴۸ \times 10^{-۳}$            | ۰٫۲۷                               | $۱٫۴۴۸ \times 10^{-۴}$            | کبد              |                |
| ۳٫۳۳                               | $۲٫۰۹۰ \times 10^{-۵}$            | ۳٫۳۰                               | $۲٫۴۵۱ \times 10^{-۶}$            | مغز              |                |
| ۲٫۴۲                               | $۹٫۴۸۵ \times 10^{-۵}$            | ۳٫۵۲                               | $۴٫۲۲۰ \times 10^{-۶}$            | روده‌ی بزرگ      |                |
| ۰٫۳۵                               | $۴٫۱۹۰ \times 10^{-۴}$            | ۰٫۲۲                               | $۲٫۰۸۵ \times 10^{-۴}$            | مغز قرمز استخوان |                |
| ۰٫۰۵                               | $۷٫۰۷۲ \times 10^{-۲}$            | ۰٫۰۸                               | $۴٫۰۸۷ \times 10^{-۳}$            | ماهیچه           |                |
| ۱٫۳۲                               | $۱٫۱۷۸ \times 10^{-۳}$            | ۱٫۰۱                               | $۸٫۶۹۹ \times 10^{-۵}$            | طحال             |                |
| ۰٫۷۸                               | $۱٫۵۰۰ \times 10^{-۴}$            | ۰٫۶۳                               | $۱٫۲۴۲ \times 10^{-۴}$            | سینه             | عضوهای زن بالغ |
| ۲٫۵۱                               | $۱٫۸۴۲ \times 10^{-۴}$            | ۳٫۱۲                               | $۱٫۴۵۷ \times 10^{-۶}$            | رحم              |                |
| ۵٫۶۱                               | $۱٫۰۴۲ \times 10^{-۴}$            | ۸٫۵۲                               | $۱٫۹۵۷ \times 10^{-۴}$            | تخمدان‌ها        |                |
| ۷٫۵۴                               | $۸٫۸۶۵ \times 10^{-۵}$            | ۱۰٫۸۴                              | $۵٫۸۷۱ \times 10^{-۵}$            | بیضه‌ها          | عضو مرد بالغ   |

**جدول ۲.** نتایج محاسبات دز جذبی تابش الکترون تبدیل داخلی دختران  $^{214}\text{Bi}$  و  $^{214}\text{Pb}$  ( $\mu\text{GyWLM}^{-1}$ ) در اندام‌های مختلف بدن

| خطای نسبی (%)<br>$^{214}\text{Bi}$ | دز جذبی الکترون تبدیل<br>$^{214}\text{Bi}$ | خطای نسبی (%)<br>$^{214}\text{Pb}$ | دز جذبی الکترون تبدیل<br>$^{214}\text{Pb}$ | عضو              | جنسیت          |
|------------------------------------|--|------------------------------------|--|------------------|----------------|
| ۱٫۲۷                               | $۴٫۵۲۵ \times 10^{-۵}$                     | ۲٫۳۹                               | $۵٫۲۰۸ \times 10^{-۶}$                     | کلیه‌ها          |                |
| ۱٫۲۸                               | $۱٫۲۳۲ \times 10^{-۴}$                     | ۲٫۲۷                               | $۱٫۷۱۷ \times 10^{-۵}$                     | لوزالمعده        |                |
| ۱٫۵۸                               | $۹٫۳۸۶ \times 10^{-۶}$                     | ۳٫۴۷                               | $۷٫۹۲۵ \times 10^{-۷}$                     | روده‌ی کوچک      |                |
| ۲٫۴۵                               | $۱٫۷۳۱ \times 10^{-۴}$                     | ۴٫۳۹                               | $۲٫۴۶۵ \times 10^{-۵}$                     | آدرنال‌ها        |                |
| ۵٫۴۵                               | $۵٫۳۷۷ \times 10^{-۵}$                     | ۵٫۴۶                               | $۶٫۱۳۵ \times 10^{-۶}$                     | کیسه‌ی صفرا      |                |
| ۰٫۴۱                               | $۳٫۵۶۱ \times 10^{-۴}$                     | ۰٫۶۶                               | $۵٫۹۴۶ \times 10^{-۵}$                     | قلب              |                |
| ۰٫۴۷                               | $۲٫۹۸۶ \times 10^{-۵}$                     | ۰٫۷۹                               | $۳٫۹۰۰ \times 10^{-۶}$                     | پوست             |                |
| ۳٫۴۷                               | $۶٫۹۵۱ \times 10^{-۵}$                     | ۴٫۲۲                               | $۸٫۰۶۹ \times 10^{-۶}$                     | تیروئید          |                |
| ۱٫۱۴                               | $۸٫۸۶۱ \times 10^{-۵}$                     | ۱٫۹۸                               | $۱٫۲۸۶ \times 10^{-۵}$                     | معده             |                |
| ۰٫۱۷                               | $۱٫۱۱۲ \times 10^{-۴}$                     | ۰٫۲۳                               | $۱٫۹۰۹ \times 10^{-۵}$                     | سطوح استخوانی    | عضوهای مشترک   |
| ۰٫۰                                | ۵٫۲۹۸                                      | ۰٫۰۰                               | ۲٫۷۱۳                                      | ریه              |                |
| ۱٫۰۸                               | $۳٫۲۸۹ \times 10^{-۴}$                     | ۱٫۸۲                               | $۴٫۹۷۹ \times 10^{-۵}$                     | مری              |                |
| ۲٫۹۴                               | $۱٫۲۶۵ \times 10^{-۶}$                     | ۵٫۰۲                               | $۱٫۷۹۵ \times 10^{-۷}$                     | مثانه            |                |
| ۲٫۰۱                               | $۲٫۱۰۳ \times 10^{-۴}$                     | ۳٫۴۴                               | $۳٫۲۹۷ \times 10^{-۵}$                     | تیموس‌ها         |                |
| ۰٫۲۸                               | $۱٫۶۵۹ \times 10^{-۴}$                     | ۰٫۴۳                               | $۲٫۷۰۱ \times 10^{-۵}$                     | کبد              |                |
| ۲٫۵۸                               | $۳٫۸۳۸ \times 10^{-۶}$                     | ۵٫۶۹                               | $۲٫۶۳۲ \times 10^{-۷}$                     | مغز              |                |
| ۲٫۸۶                               | $۷٫۹۹۷ \times 10^{-۶}$                     | ۶٫۹۱                               | $۶٫۷۰۳ \times 10^{-۷}$                     | روده‌ی بزرگ      |                |
| ۰٫۰۹                               | $۲٫۳۱۶ \times 10^{-۴}$                     | ۰٫۱۹                               | $۳٫۸۶۴ \times 10^{-۵}$                     | مغز قرمز استخوان |                |
| ۰٫۰۷                               | $۷٫۷۸۷ \times 10^{-۳}$                     | ۰٫۰۴                               | $۶٫۹۳۶ \times 10^{-۴}$                     | ماهیچه           |                |
| ۰٫۹۲                               | $۱٫۲۸۰ \times 10^{-۴}$                     | ۱٫۵۳                               | $۱٫۹۴۰ \times 10^{-۵}$                     | طحال             |                |
| ۰٫۶۰                               | $۱٫۸۲۳ \times 10^{-۴}$                     | ۰٫۹۵                               | $۲٫۷۳۰ \times 10^{-۵}$                     | سینه             | عضوهای زن بالغ |
| ۱٫۰۴                               | $۳٫۰۲۲ \times 10^{-۶}$                     | ۲٫۹۸                               | $۲٫۹۲۵ \times 10^{-۷}$                     | رحم              |                |
| ۵٫۸۲                               | $۳٫۴۲۳ \times 10^{-۶}$                     | ۳٫۲۴                               | $۲٫۶۶۹ \times 10^{-۷}$                     | تخمدان‌ها        |                |
| ۶٫۷۷                               | $۷٫۵۷۵ \times 10^{-۷}$                     | -                                  | -  | بیضه‌ها          | عضو مرد بالغ   |



شکل ۲. رابطه‌ی بین شدت بتا و الکترون تبدیل داخلی دختر- هسته‌ی  $^{214}\text{Bi}$  و  $^{214}\text{Pb}$  و انرژی.

## ۲.۲ دزیمتری بتا و الکترون تبدیل داخلی

دختران رادون از راه استنشاق وارد دستگاه تنفسی شده و با نیم- عمر نسبتاً کوتاه‌شان واپاشیده می‌شوند. ریه‌ی انسان شامل تعداد زیادی لوله‌های هوایی با قطرهای متفاوت است که در سرتاسر حجم آن توزیع یافته‌اند. در واقع ذرات، بعد از استنشاق، وارد این لوله‌های هوایی می‌شوند. ذرات آلفای گسیلیده از این دختران، کوتاه برد بوده و از لوله‌های هوایی خارج نمی‌شوند و انرژی‌شان را تقریباً در جایی که ته‌نشین شده‌اند از دست می‌دهند. اما همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود به علت چگالی پایین ( $0.296 \text{ gr/cm}^3$ ) بافت ریه، برد الکترون در آن از مرتبه‌ی سانتی‌متر است که این مقدار از اندازه‌ی قطر لوله‌های هوایی بزرگ‌تر است. به خصوص برای ایزوتوپ  $^{214}\text{Bi}$  (که دارای ذرات با انرژی حدود  $3 \text{ MeV}$  است) این برد به چند سانتی‌متر هم می‌رسد. بنابراین می‌توان با تقریب خوبی (که توسط مارکوویچ و همکارانش در ۲۰۰۹ پیشنهاد شد) ریه‌ی انسان را به عنوان چشمه‌ی یکنواخت الکترون گسیل در نظر گرفت [۶].

محاسبات دزیمتری الکترون شامل دو مرحله‌ی اساسی است: مرحله‌ی اول تعیین طیف انرژی الکترون تبدیل داخلی و بتای گسیلیده از دو دختر بتاگسیل و مرحله‌ی دوم انجام محاسبات دزیمتری با استفاده از کد محاسباتی MCNPX2.4.0.

۱.۲ محاسبه‌ی طیف انرژی بتای محصولات واپاشی رادون-۲۲۲ برای تعریف چشمه‌ی واپاشی بتا در فایل ورودی کد MCNPX لازم بود طیف پیوسته‌ی بتای گسیلیده از دو دختر بتاگسیل محاسبه شود. شکل ۲ تغییرات شدت بتاها و الکترون تبدیل داخلی دو دختر رادون-۲۲۲ را نشان می‌دهد. ایزوتوپ  $^{214}\text{Bi}$ ، ۴۸ ذره‌ی بتا در محدوده‌ی انرژی  $9.0 \times 10^{-2}$  تا  $3.274 \text{ MeV}$  و ایزوتوپ  $^{214}\text{Pb}$  ذرات بتا با انرژی‌های  $1.032$ ،  $0.737 \times 10^{-1}$ ،  $6.8 \times 10^{-1}$ ،  $4.98 \times 10^{-1}$  و  $1.93 \times 10^{-1} \text{ MeV}$  گسیل می‌کند. هر کدام از این ذرات بتا خود دارای یک طیف پیوسته‌ی انرژی از صفر تا انرژی بیشینه‌ی بتا است [۲]

$$N(p) = C^{\nu} p(Q-T_e)^{\nu} F(Z_D, p) \quad (1)$$

که در آن  $F(Z_D, p)$  تابع فرمی و برابر است با

$$F(Z_D, p) = \frac{2\pi\eta}{1 - e^{-2\pi\eta}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Ze^{\nu}}{4\pi\epsilon_0 \hbar v_e}$$

با توجه به این که در محاسبات کد MCNP تابع فرمی به یک بهنجار می‌شود، ضرب طیف بتایی که باید در کد تعریف شود، در ضریب ثابتی مثل  $C$  در رابطه‌ی (۱) تأثیری در خروجی برنامه ندارد. از این رو می‌توان شکل طیف بتا را با سه ضریب اصلی موجود در رابطه‌ی (۱) به دست آورد. رابطه‌ی (۱) با استفاده از قاعده‌ی طلایی فرمی در واپاشی بتایی به دست می‌آید. در رابطه‌های (۱) و (۲)،  $v_e$ ،  $p$  و  $T_e$ ، به ترتیب، سرعت، تکانه و انرژی جنبشی الکترون است.  $Z_D$  عدد اتمی دختر هسته،  $Q$  انرژی واپاشی،  $F(Z_D, p)$  تابع فرمی و  $N(p)$  فراوانی است.

طیف پیوسته‌ی بتا محاسبه و برای انجام محاسبات دزیمتری در کارت SDEF چشمه در فایل ورودی کد، در دو برنامه‌ی جداگانه برای  $^{214}\text{Bi}$  و  $^{214}\text{Pb}$  تعریف شد. طیف انرژی گسیله‌ی الکترون تبدیل داخلی در دو برنامه‌ی جداگانه برای دو ایزوتوپ بتاگسیل در فایل ورودی کد تعریف شد.



غیره در نظر گرفته شد. محاسبه با نرم افزار LUNGDOS.F90 انجام شد. در واقع در ریه بعد از مدتی تعادل حاصل می شود. به عبارت دیگر، نرخ تنفس و نرخ تجمع و فرایندهای زیست شناختی و فیزیکی نظیر پاک سازی و ... در تعیین مقدار فعالیت  $A_n$  نقش دارند. این فرایندها به صورتی عمل می کنند که همیشه یک مقدار ثابت فعالیت تابش برای الکترون وجود دارد. مارکوویچ و همکاران حالت مرجعی در نظر گرفتند که در آن پارامترها در فایل ورودی کد تعریف شدند. از جمله این پارامترها می توان به نرخ تنفس استاندارد برابر با  $0.78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  و ضریب تعادل استاندارد برابر با ۰.۳۹۵ اشاره کرد [۶].

دز جذبی الکترون (بتا و تبدیل داخلی) به ازای ۱WLM از رابطه زیر محاسبه شد

$${}_{T}D_R^n = \overline{{}_{T}D_R^n} \cdot A_n \cdot \text{YIELD}_R^n \quad (3)$$

که در آن  $A_n$  فعالیت کل هر یک از دو دختر بتاگسیل  ${}^{222}\text{Rn}$  به ازای ۱WLM در کل نواحی سیستم تنفسی انسان است که مقدار آن توسط مارکوویچ<sup>(۶)</sup> برابر  $406/8 \text{ Bq/WL}$  برای  ${}^{214}\text{Pb}$  و  $578/4 \text{ Bq/WL}$  برای  ${}^{214}\text{Bi}$  محاسبه شد. شدت بتا به ازای یک واپاشی ( $\text{YEILD}_R^n$ ) برای  ${}^{214}\text{Pb}$  و  ${}^{214}\text{Bi}$  حدود ۱ و همچنین شدت الکترون تبدیل داخلی برابر با  $0.226$  برای  ${}^{214}\text{Bi}$  و  $0.604$  برای  ${}^{214}\text{Pb}$  در نظر گرفته شد [۷].  ${}_{T}D_R^n$  میزان دز جذبی عضوهای بدن برحسب  $\mu\text{GyWLM}^{-1}$  است [۶].

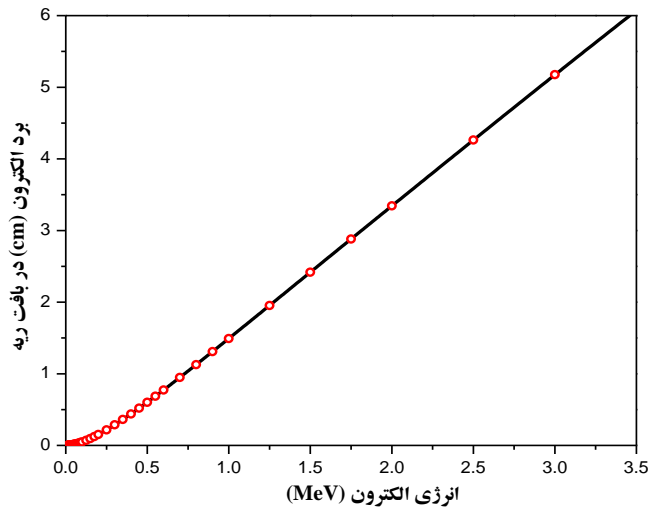
مقدار دز مؤثر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد

$$H_T = \sum_n \sum_{\beta, e} W_R \cdot {}_{T}D_R^n$$

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (4)$$

که در آن  $W_R$  ضریب وزنی تابش و  $W_T$  ضریب وزنی حساسیت بافت است که از داده های ICRP103 به دست می آید،  $H_T$  دز معادل و  $E$  دز مؤثر هستند.

در رابطه ی (۴) فرض می شود که میزان پرتوگیری از رادون در طول زمان ثابت بوده و بدن پیوسته در معرض استنشاق غلظت ثابتی از رادون است.



شکل ۳. برد الکترون در ریه به صورت تابعی از انرژی آن.

هدف محاسبات برآورد دز در عضوهای بدن شخصی بود که در معرض غلظت های بالای رادون برحسب WLM قرار می گیرد. WLM یکای اندازه گیری غلظت رادون در محیط است که به تراز کار ماهیانه معروف بوده و برابر با  $3/5$  میلی ژول انرژی بر ساعت و بر مترمکعب است. به عبارت دیگر  $WLM = 170 \text{ h} \times WL$ ، که عبارت است از دز دریافتی از رادون به غلظت ۱WL در مدت یک ماه (۱۷۰ ساعت).

با استفاده از کد محاسباتی MCNPX مقدار دز جذبی  ${}_{T}D_R^n$  برحسب (MeV/gr) از تابش (R) دو ایزوتوپ دختر بتاگسیل (n) در عضوهای فانتوم شبیه سازی شده (T) برای مرد بالغ به دست آمد. تالی مورد استفاده در این برنامه F6+ بود که دز جذبی عضوهای بدن را برحسب (MeV/gr) محاسبه می کند. همچنین از آنجایی که مغز قرمز استخوان در حالت واقعی به صورت نایکخواخت و ناهمگن است و شبیه سازی واقعی آن امکان پذیر نیست، لذا لازم است از ضرایب تبدیل شار فوتون به دز جذبی استفاده شود. زیرا این ضرایب شرایطی را ایجاد می کند که استخوان همگن به حالت واقعی استخوان ناهمگن یعنی حالتی که استخوان و مغز استخوان جدا از هم هستند، تبدیل می شود. از این رو، برای تعیین مغز قرمز استخوان از تالی F4 استفاده شد.

اساس انجام محاسبات دز بر پایه ی مدل دستگاه تنفسی ICRP66 بوده و تمام پارامترهای مربوط به نرخ تنفس، نرخ تجمع، ضریب تعادل، پارامترهای زیست شناختی و فیزیکی بدن و

### ۳.۲ استفاده از روش‌های کاهش واریانس

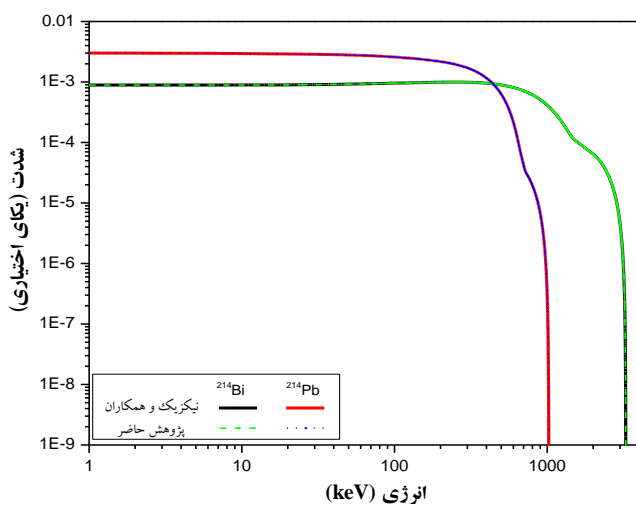
از بین روش‌های تعریف شده برای کاهش واریانس در MCNP تنها دو روش تقسیم هندسه<sup>(۷)</sup> و پیش‌قدردار کردن چشمه<sup>(۸)</sup> برای ترابرد الکترون قابل اجرا بود. برای به کارگیری روش تقسیم هندسه به این صورت عمل شد که فانتومی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، شامل سه نوع بافت اصلی نرم، استخوانی و بافت ریه بود که تنها بافت نرم مرزبندی شد. برای کاهش واریانس باید احتمال عبور الکترون بین چشمه (ریه) و بافت هدف (چهار عضو دارای خطای بالا) زیاد شود تا خطا کاهش یابد. به عنوان نمونه اگر اهمیت عضوی مثل کبد که در مسیر حرکت الکترون‌ها قرار دارد زیاد می‌شود، در این صورت عضو (کبد) درگیر محاسبات شده و زمان اجرای برنامه طولانی می‌شد و اگر اهمیت عضو (کبد) کم در نظر گرفته می‌شد، چون در مسیر حرکت الکترون‌ها بود باز هم دچار مشکل می‌شدیم. پس باید اهمیت عبور ذرات در این مسیر زیاد باشد. برای حل این مشکل مرزهای بافت‌های نرم حذف شد و فقط چهار عضو مهم که در پایین ریه‌ها قرار داشتند و دارای خطای بالا بودند بدون تغییر باقی ماندند. مسیری که ریه‌ها را به چهار عضو مرتبط می‌کرد به صورت باریکه‌ای با  $imp=4$  مرزبندی شد و به چهار عضو اصلی،  $imp=6$  و به سایر اعضا  $imp=1$  نسبت داده شد. اساس تعیین این مقادیر اهمیت ( $imp$ ) ارزیابی مقدار راندمان برنامه و روش آزمون و خطا بود. به این صورت که چندین حالت مختلف در نظر گرفته شد (مثلاً ۲۰ حالت مختلف) و همگی این حالت‌ها اجرا شدند (مثلاً در یک dump). در فایل خروجی قسمتی به نام Fom وجود دارد که نشان‌دهنده راندمان محاسبات MCNP است. هر چه Fom بزرگ‌تر باشد، به ازای یک زمان ثابت، خطا و یا به ازای یک خطای ثابت، زمان کم‌تر است. پس هر برنامه‌ای که دارای مقدار Fom بیش‌تری بود مناسب‌تر بود.

هم‌چنین با توجه به موقعیت مکانی چهار عضو ذکر شده، مطلوب بود به جای این که گسیل الکترون‌ها از چشمه به صورت یکنواخت و همسانگرد در همه‌ی جهات پی‌گیری شود، به الکترون‌هایی که به سمت پایین بدن گسیل می‌شوند نسبت به الکترون‌های گسیل شده در سایر جهات اهمیت بیش‌تری داده شود. پس زاویه‌ی گسیل الکترون‌ها به عنوان متغیر پیش‌قدردار در داخل مخروطی که در واقع پهن شده و در صفحه‌ی X-Y قرار دارد فرض شد. اساس انتخاب این مقدار موقعیت قرار گرفتن چهار عضو بود. اگر به جای چهار عضو تنها یک عضو وجود

می‌داشت می‌توانستیم زاویه‌ی رأس مخروط را بسته‌تر در نظر بگیریم. اگر زاویه‌ی رأس مخروط را نسبت به جهت مثبت محور Z در نظر بگیریم در این صورت گسیل الکترون به سمت پایین بدن در زاویه‌ی  $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$  و گسیل الکترون به سمت بالا در زاویه‌ی  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  فرض می‌شود. برای به کارگیری این روش کاهش واریانس از کارت‌های SIn، SPn، SBn استفاده شد. کارت SIn توزیع کسینوس زاویه و کارت SPn توزیع گسیل را تعیین می‌کند و کارت SBn تعیین می‌کند که در داخل و خارج مخروط، الکترون با چه احتمالی در یک توزیع خاص گسیل می‌شود. در داخل مخروط با احتمال  $P1=1$  و در خارج مخروط با احتمال  $P2=0$  توزیع همسانگرد الکترون وجود دارد.

### ۳. نتایج و بحث

طیف انرژی بتای حاصل از واپاشی دو دختر رادون-۲۲۲ در شکل ۴ نشان داده شده است. این طیف تطابق بسیار خوبی با طیف پیوسته‌ی بتای ارائه شده توسط مارکوویچ در سال ۲۰۰۹ دارد [۶]. دز جذبی تابش بتا و الکترون تبدیل داخلی دختران رادون-۲۲۲ در عضوهای بدن به همراه خطای نسبی آن‌ها بعد از به کارگیری روش‌های کاهش واریانس در جدول‌های ۱ و ۲ درج شده است. نتایج نشان دادند که دز رسیده به ریه در مقایسه با سایر عضوهای بدن، بیش‌ترین مقدار را دارد که این به دلیل تعریف ریه به عنوان چشمه‌ی الکترون گسیل قابل پیش‌بینی بود. هم‌چنین دز جذبی عضوهای بدن از  $^{214}\text{Bi}$  بیش‌تر از  $^{214}\text{Pb}$  است، زیرا ذرات پرنرژی در طیف انرژی  $^{214}\text{Bi}$  بیش‌تر از  $^{214}\text{Pb}$  هستند (شکل ۲) [۷].



شکل ۴. طیف پیوسته‌ی بتای حاصل از واپاشی دو دختر رادون-۲۲۲.



هر چه انرژی ذرات پایین تر باشد، شکل فانتوم در محاسبات دزیمتری مؤثرتر می‌شود.

برای به دست آوردن برآوردی از سهم دز سالانه الکترون دختران رادون، از داده‌های اندازه‌گیری شده در UNSCEAR 2006 استفاده شد [۸]. غلظت رادون (در ایران) اندازه‌گیری شد که بیش‌ترین مقدار آن  $31000 \text{ Bq/m}^3$  و کم‌ترین مقدار آن  $82 \text{ Bq/m}^3$  به دست آمد. برای برآورد اهمیت دز الکترون دختران رادون، در جدول ۴ دز جذبی عضوهای بدن، در این دو غلظت مختلف رادون داده شده است. براساس اطلاعات این جدول در غلظت‌های پایین رادون، دز جذبی عضوها تا حدی قابل چشم‌پوشی است. ولی در غلظت‌های بالا نمی‌توان از دز جذبی برخی از عضوها مثل ریه، ماهیچه، قلب، تیموس، معده، مری و کبد چشم‌پوشی کرد. دز مؤثر سالانه‌ی ناشی از الکترون دختران رادون در غلظت بالای رادون  $2.019 \text{ mSv}$  و در غلظت پایین آن در حدود  $5.337 \times 10^{-3} \text{ mSv}$  است.

نتایج این پژوهش به ازای واحد غلظت رادون گزارش شده‌اند و با داشتن غلظت رادون در هر محیط و ضرب کردن نتایج در آن می‌توان دز جذبی عضوهای بدن را به دست آورد.

نتایج محاسبات دزیمتری نشان داد که دز جذبی اکثر عضوهای بدن دارای خطای کم‌تر از ۵٪ است که از نظر برآوردهای پزشکی قابل قبول است. ولی عضوهایی که در فاصله‌ی دوری از ریه‌ها قرار داشتند دارای خطای بالا بودند، چرا که این عضوها کوچک بوده و تعداد تابش کم‌تری نسبت به سایر عضوها به آن‌ها می‌رسد. این عضوها شامل مثانه، رحم و غدد جنسی مرد و زن بودند. همچنین نتایج محاسبات دز ناشی از  $^{214}\text{Pb}$  حاکی از آن بود که علاوه بر این چهار عضو، کیسه‌ی صفرا و تیروئید نیز دارای خطای بالای ۵٪ بودند که با استفاده از روش‌های کاهش واریانس خطای آن‌ها تا حد قابل قبولی کاهش داده شد. با این وجود غدد جنسی مرد همچنان دارای خطای غیرقابل قبول بود. مقدار دز مؤثر تابش بتا و الکترون تبدیل داخلی دختران رادون  $5.93 \mu\text{SvWLM}^{-1}$  تعیین شد. به بیان دیگر شخصی که به مدت یک ماه در معرض تابش رادون با غلظت  $1 \text{ WL}$  قرار بگیرد، مقدار دز مؤثر دریافتی وی  $5.93 \mu\text{Sv}$  خواهد بود. در جدول ۳ نتایج این مقایسه و محاسبه‌ی مارکوئیچ برای چند عضو بدن انسان مقایسه شده است. توافق خوبی بین این دو وجود دارد. تفاوت دز جذبی حاصل از  $^{214}\text{Pb}$  بیش‌تر از  $^{214}\text{Bi}$  است، زیرا در طیف  $^{214}\text{Pb}$  ذرات با انرژی پایین‌تر وجود دارند.

**جدول ۳.** مقایسه‌ی دز جذبی بتای محاسبه شده با MCNP با داده‌های مارکوئیچ [۶] برای دو ایزوتوپ بتاگسیل  $^{214}\text{Bi}$  و  $^{214}\text{Pb}$

| عضو              | پژوهش حاضر            |                       | مارکوئیچ              |                       |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | $^{214}\text{Pb}$     | $^{214}\text{Bi}$     | $^{214}\text{Pb}$     | $^{214}\text{Bi}$     |
| پوست             | $2.76 \times 10^{-5}$ | $3.68 \times 10^{-4}$ | $2.64 \times 10^{-5}$ | $3.65 \times 10^{-4}$ |
| کبد              | $1.45 \times 10^{-4}$ | $8.45 \times 10^{-3}$ | $1.58 \times 10^{-4}$ | $8.44 \times 10^{-3}$ |
| معده             | $8.85 \times 10^{-5}$ | $3.49 \times 10^{-3}$ | $8.78 \times 10^{-5}$ | $3.4 \times 10^{-3}$  |
| غدد جنسی مرد     | $5.87 \times 10^{-5}$ | $8.86 \times 10^{-5}$ | $5.65 \times 10^{-5}$ | $9.8 \times 10^{-5}$  |
| سطوح استخوانی    | $1.22 \times 10^{-4}$ | $2.36 \times 10^{-3}$ | $1.14 \times 10^{-4}$ | $2.24 \times 10^{-3}$ |
| مغز قرمز استخوان | $2.09 \times 10^{-4}$ | $4.19 \times 10^{-3}$ | $1.99 \times 10^{-4}$ | $4.2 \times 10^{-3}$  |
| روده‌ی بزرگ      | $4.22 \times 10^{-6}$ | $9.48 \times 10^{-5}$ | $4.26 \times 10^{-6}$ | $9.49 \times 10^{-5}$ |
| مری              | $2.56 \times 10^{-5}$ | $4.01 \times 10^{-4}$ | $2.41 \times 10^{-5}$ | $3.69 \times 10^{-4}$ |



**جدول ۴.** دز جذبی سالانه‌ی عضوهای بدن براساس داده‌های UNSCEAR2006 برای بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت رادون در ایران و ضرایب دز جذبی برحسب  $\mu\text{GyWLM}^{-1}$

| دز جذبی سالانه از الکترون رادون ( $\mu\text{Gy}$ ) |                        | دز جذبی کل الکترون         | عضو              | جنسیت          |
|--|------------------------|----------------------------|------------------|----------------|
| $31000 \text{ Bq/m}^3$                             | $82 \text{ Bq/m}^3$    | ( $\mu\text{GyWLM}^{-1}$ ) |                  |                |
| $3.092 \times 10^{-2}$                             | $8.180 \times 10^{-5}$ | $9.081 \times 10^{-5}$     | کلیه‌ها          |                |
| $2.146 \times 10^{-1}$                             | $5.676 \times 10^{-4}$ | $6.302 \times 10^{-4}$     | لوزالمعده        |                |
| $2.533 \times 10^{-2}$                             | $6.702 \times 10^{-5}$ | $7.440 \times 10^{-5}$     | روده‌ی کوچک      |                |
| $5.690 \times 10^{-1}$                             | $1.505 \times 10^{-3}$ | $1.671 \times 10^{-3}$     | آدرنال‌ها        |                |
| $1.730 \times 10^{-1}$                             | $4.578 \times 10^{-4}$ | $5.082 \times 10^{-4}$     | کیسه‌ی صفرا      |                |
| 2.105  | $5.570 \times 10^{-3}$ | $6.183 \times 10^{-3}$     | قلب              |                |
| $1.462 \times 10^{-1}$                             | $3.868 \times 10^{-4}$ | $4.294 \times 10^{-4}$     | پوست             |                |
| $8.674 \times 10^{-1}$                             | $2.294 \times 10^{-3}$ | $2.547 \times 10^{-3}$     | تیروئید          |                |
| 1.253  | $3.315 \times 10^{-3}$ | $3.681 \times 10^{-3}$     | معده             |                |
| $8.895 \times 10^{-1}$                             | $2.353 \times 10^{-3}$ | $2.612 \times 10^{-3}$     | سطوح استخوانی    | عضوهای مشترک   |
| 16791.300  | 44.420                 | $49.312 \times 10^{-3}$    | ریه              |                |
| 1.504  | $3.979 \times 10^{-3}$ | $4.417 \times 10^{-3}$     | مری              |                |
| $2.468 \times 10^{-2}$                             | $6.528 \times 10^{-5}$ | $7.247 \times 10^{-5}$     | مثانه            |                |
| $2.779 \times 10^{-1}$                             | $7.351 \times 10^{-4}$ | $8.160 \times 10^{-4}$     | تیموس‌ها         |                |
| 2.992  | $7.914 \times 10^{-3}$ | $8.786 \times 10^{-3}$     | کبد              |                |
| $9.348 \times 10^{-2}$                             | $2.473 \times 10^{-5}$ | $2.745 \times 10^{-5}$     | مغز              |                |
| $3.669 \times 10^{-2}$                             | $9.705 \times 10^{-5}$ | $1.077 \times 10^{-4}$     | روده‌ی بزرگ      |                |
| $3.057 \times 10^{-1}$                             | $8.087 \times 10^{-4}$ | $8.977 \times 10^{-4}$     | مغز قرمز استخوان |                |
| 28.362   | $7.503 \times 10^{-2}$ | $8.329 \times 10^{-2}$     | ماهیچه           |                |
| $4.809 \times 10^{-1}$                             | $1.272 \times 10^{-3}$ | $1.412 \times 10^{-3}$     | طحال             |                |
| 4.810  | $1.272 \times 10^{-2}$ | $1.412 \times 10^{-2}$     | سینه             |                |
| $6.435 \times 10^{-2}$                             | $1.702 \times 10^{-4}$ | $1.889 \times 10^{-4}$     | رحم              | عضوهای زن بالغ |
| $1.030 \times 10^{-1}$                             | $2.725 \times 10^{-4}$ | $3.025 \times 10^{-4}$     | تخمندان‌ها       |                |
| $5.384 \times 10^{-2}$                             | $1.424 \times 10^{-4}$ | $1.581 \times 10^{-4}$     | بیضه‌ها          | عضو مرد بالغ   |

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج محاسبه، می‌توان از دز جذبی الکترون در مقایسه با آلفا در غلظت‌های پایین رادون صرف‌نظر کرد. ولی براساس گزارش‌های اندازه‌گیری رادون به دست آمده از UNSCEAR-2006 نمی‌توان از دز جذبی عضوهایی چون ریه، ماهیچه، قلب، تیموس، معده، مری و کبد در غلظت‌های بالای رادون چشم‌پوشی نمود، زیرا مقادیر دز دریافتی از تابش بتا در غلظت‌های بالای رادون در ایران قابل مقایسه با دز مجاز سالانه است.

دز جذبی تابش بتا و الکترون تبدیل داخلی گسیلیده از دختران رادون موجود در محیط برای شخصی که به مدت یک ماه در معرض تابش رادون به غلظت 1WL قرار گیرد، برآورد شد. نتایج نشان داد که اگرچه دز جذبی آلفای دختران رادون در مقایسه با تابش بتا و الکترون‌های تبدیل آن بسیار بیش‌تر است، اما قدرت نفوذ بیش‌تر الکترون‌ها در بافت، به آن‌ها امکان می‌دهد که از ریه خارج شده و در دیگر عضوهای بدن انرژی از دست بدهند. به همین دلیل، عضوهایی که در مجاورت ریه‌ها قرار دارند، دز قابل توجهی از الکترون‌ها دریافت می‌کنند. براساس





## پی‌نوشت‌ها:

۱. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
۲. Cristy
۳. Echerman
۴. Unalofeski
۵. Riman
۶. Markovich
۷. Geometry Splitting
۸. Source Biassing

## مرجع‌ها:

1. UNSCEAR, Source and effect of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. Report to General, Assembly with Annexes (2000).
2. James E. Martin, Physics for radiation protection, WILEY-VCH Veil GmbH & K G Aa. Weinheim, ISBN: 3-527-40611-5 (2006).
3. William J. Makofske, Micheal R. Edelstein, Radon and the environment, Noyes Publications, Park Riddge, NJ (1988).
4. A. Abbasnezhad, Environmental impact and implication of Radon-222, and its urgency attention in Iran, Journal of Nuclear Science and Technology, 26 (2003) 17-31.
5. G.M. Kendall and T.J. Smith, Dose to organs and tissues from radon and its decay product, J. Radiation Protection Dosimetry, 22 (2002) 389-406.
6. V.M. Markovich, D. Krstic, D. Nikezic, Gamma and beta doses in human organs due to radon progeny in human lung, Radiation Protection Dosimetry, 135 (2009) 197-202.
7. Table of Radioactive Isotopes. Periodic Table linked to decay data for known isotopes of each element. Available on <http://ie.lbl.gov/education/isotopes.html> last accessed on December 15 (2008).
8. UNSCEAR, Source and effect of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. Report to General, Assembly with Annex E (2006).