

عناصر ثانویه تولید شده در بافت ریه انسان در اثر برهم‌کنش ذرات آلفای رادن و دختران

INC29-1005

یاسین حیدری‌زاده، شراره بابامحمدی، محمدرضا رضایی*

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته، ۷۶۳۱۸۸۵۳۵۶، کرمان، ایران.

چکیده:

رادن و دختران آن به‌عنوان یکی از عوامل مهم در بروز سرطان هستند که رتبه دوم بعد از مواد مخدر را در این زمینه دارا می‌باشند. بافت ریه مهم‌ترین ارگانی است که درگیر مخاطرات تابشی رادن و دختران می‌شود که در اثر استنشاق رادون ایجاد شده از اجزای محیط اطراف وارد بدن انسان شده‌اند. هدف اصلی این مقاله محاسبه ذرات ثانویه با استفاده از ابزار Geant4 با فعال کردن فرایند اسپالیشن ذرات آلفای رادن و دختران با اجزای بافت ریه و محاسبه مخاطرات ذرات ثانویه تولید شده در آن می‌باشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در اثر برهم‌کنش ذرات آلفای ۵،۴۹، ۶ و ۷،۶۹ MeV، رادن و دختران، پروتون و عناصر O^{16} و C^{12} با بیشترین بهره در بافت ریه تولید می‌شوند. همچنین عناصر رادیواکتیو F^{18} ، Al^{26} نیز در بین عناصر تولید شده در بافت ریه، مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: اسپالیشن، رادن و دختران، آلفا، مخاطرات تابش، ریه، Geant4

Secondary Particles Produced by the Interaction of Alpha Particles of Radon and Progeny with lung tissues

Yassin Heydarizade, Sharareh Babamohammadi, Mohammad Raza Rezaie*

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, 7631885356, Kerman, Iran

Abstract:

Radon and progeny are one of the most important factors in the occurrence of cancer, which rank second after drugs in this field. Lung tissue is the most important organ that is affected by the dangers of Radon radiation and progeny, due to the inhalation of radon, which is created from the components of the surrounding environment and is entered the human body. The aim of this research is the calculation of the proton, ions, and radioactive elements that are produced with activation, spallation, and nuclear interactions of radon and progeny alpha particles with lung tissues. The results of this research show that due to the interaction of 5.49, 6, and 7.68 MeV alpha particles of Radon and progeny in the lung tissue, proton, ^{16}O , and ^{12}C elements are produced with the highest yield. Also, ^{26}Al , and ^{18}F radioactive elements are also produced in the lung tissue.

Keywords: Spallation, Radon and progeny, Alpha, Radiation hazards, Lung, Geant4

۱. مقدمه

رادان که یکی از محصولات گازی واپاشی ^{238}U است از منافذ محل تولید، وارد هوا شده و به علت رادیواکتیو بودن آن ایجاد مخاطرات تابشی برای انسان می‌کند. رادن و دو دختر ^{218}Po و ^{214}Po آن نیز به ترتیب با تابش آلفا با انرژی‌های ۵،۴۹، ۶ و ۷،۶۹ MeV نیز در مخاطرات تابشی نقش مهمی بازی می‌کنند. بیشترین تأثیر رادن در بدن انسان از طریق استنشاق آن است. بافت ریه با ورود رادن به اجزای آن و واپاشی آلفای رادن و دخترانش به علت بالا بودن LET ذرات آلفا، دچار آسیب می‌شوند. به علت بالا بودن وزن ذره آلفا (به میزان ۲۰)، میزان مخاطرات تابشی ذرات آلفا در بافت‌های انسانی بیشتر از دیگر تابش‌ها است [۱]. تاکنون دزیمتری رادن و دختران آن در بافت ریه مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. نتایج نشان می‌دهد که میزان دز رادن و دختران آن در بافت ریه برابر 0.25mSv/Bq/m^3 است [۳]. ماریانا و همکاران نشان دادند که بافت ریه در اثر برهم‌کنش آلفای رادن و دختران دچار تخریب ساختاری و تغییر در DNA می‌شوند [۴]. هوباکس و همکاران نشان دادند دلیل اصلی سرطان ریه در افرادی که سیگار نمی‌کشند در اثر برهم‌کنش آلفای رادن و دختران آن در حدود ۱۰ الی ۲۵٪ می‌باشد [۵]. از آنجا که رادن گاز بی‌اثری است، بیشترین مقدار آن پس از استنشاق به سرعت از ریه خارج می‌شود [۶]، لذا دز نسبتاً کمی در واحد حجم ریه وارد می‌کند. اما از آنجایی که محصولات واپاشی آن نیمه‌عمر کوتاه‌تری دارند، سبب آسیب‌های زیاد به سیستم تنفسی شده و در نتیجه قبل از مراحل خارج شدن رادن از ریه، نواحی مختلف دستگاه تنفس تحت تابش پرتو آلفا قرار گرفته و سطوح حساس تنفسی آسیب می‌بینند. در این تحقیق سعی می‌شود که تأثیر آلفای رادن و دختران آن بر بافت ریه در اثر فرایند اسپالیشن بررسی شده و میزان تولید عناصر مختلف در آن مورد مطالعه قرار گیرد. فرایند اسپالیشن فرایندی است که هسته مورد تابش قرار گرفته با جذب یون تابیده شده به آن، تبدیل به یک هسته مرکب با انرژی داخلی بالا شده و به طیفی از هسته‌های کوچک‌تر تبدیل می‌شود. یون‌های تولید شده در برهم‌کنش آلفای رادن و دختران آن در بافت ریه باعث تغییر PH خون و همچنین ایجاد رادیکال‌های آزاد شده و به مولکول‌های DNA انسان آسیب می‌رساند که منشأ بروز سرطان می‌باشند [۷]. در این تحقیق نتایج تولید عناصر ثانویه در اثر برهم‌کنش آلفای ریه با استفاده از ابزار Geant4 صورت می‌گیرد. Geant4 یک ابزار کارآمد است که با تعریف فیزیک برهم‌کنش، بررسی فرایند اسپالیشن آلفا در بافت‌های مختلف بدن با استفاده از آن را امکان‌پذیر می‌سازد [۹]، همچنین برهم‌کنش‌های آلفا با هسته‌های مختلف غیر از فرایند اسپالیشن نیز وجود دارد. در هر صورت هسته مرکب ایجاد شده در اثر جذب ذرات آلفا مسیرهای متفاوتی برای واپاشی خواهند داشت. با فعال شدن فرایند اسپالیشن می‌توان محصولات تولید شده در اثر ایجاد هسته مرکب را مشاهده نمود. چگونگی انجام این تحقیق در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

۲. روش کار

برای محاسبه احتمال تولید ذرات ثانویه در اثر برهم‌کنش آلفای رادن و دختران آن با اجزای بافت ریه از ابزار Geant4 استفاده شده است. هندسه موردنظر در شبیه‌سازی یک برشی از ریه به ابعاد $1 \times 1 \times 0.01\text{cm}^3$ است که ضخامت بافت آن برابر با برد ذرات آلفا با بیشترین انرژی در بافت ریه در نظر گرفته شده است. چشمه موردنظر ذرات آلفا با انرژی‌های ۵،۴۹، ۶ و ۷،۶۹ MeV به ترتیب مربوط به آلفای رادن، ^{218}Po و ^{214}Po می‌باشد که به صورت موازی به سطح هدف تابیده می‌شود. برای ساختن هندسه موردنظر در پوشه *include* و *src* از کتابخانه *Detector Construction* استفاده شده است که یک فانتومی است که ماده آن از جنس ریه از کتابخانه‌های پیش‌فرض Geant4 به اسم *G4_LUNG_TISSUE* به ابعاد $1 \times 1 \times 0.01\text{cm}^3$ تعریف شده است. جهت تعریف چشمه آلفا از کتابخانه *Primary Detector Construction* و از دستور *G4ParticleTable::GetParticleTable()* و انرژی‌های ۵،۴۹، ۶ و ۷،۶۹ MeV استفاده شده است. برای محاسبه طیف ذرات تولید

شده از تابع *BeginOfRunAction* در کلاس *RunAction* و برای نمایش ذرات تولید شده از تابع *UserSteppingAction* در کلاس *SteppingAction* استفاده شده و نیز برای تعریف فیزیک از کلاس پایه *FTFP_BERT* استفاده شده است. این اینس پایه برهم‌کنش اسپالیشن را در کنار بقیه برهم‌کنش‌ها به صورت جامع در برمی‌گیرد. برای کاهش خطا محاسبات به زیر ۱٪، تعداد ذرات چشمه 10^8 ذره در نظر گرفته می‌شود. با محاسبه ذرات ثانویه تولید شده از تابش اولیه 10^8 ذره، می‌توان احتمال تولید پروتون و ذرات ثانویه دیگر را ناشی از یک ذره آلفا در بافت ریه به دست آورد. این شبیه‌سازی با استفاده از یک لپ‌تاپ دارای پردازنده *Corei5* چهار هسته‌ای با رم ۴ گیگابایتی انجام شده است. شکل ۱ نمایی از تراپرد ذرات آلفا در بافت ریه را نشان می‌دهد. چگونگی انجام کار در ادامه شرح داده شده است.



شکل ۱: نمایی از شبیه‌سازی یک مقطع بافت ریه به ابعاد $1 \times 1 \times 0.01 \text{cm}^3$ با چشمه آلفای نقطه‌ای

۳. نتایج

در جدول ۱ نتایج حاصل از میزان عناصر تولید شده در اثر تابش ذرات آلفا با انرژی‌های ۵،۴۹، ۶ و ۷،۶۹ MeV که به آب تابیده شده، در شبیه‌سازی با ابزار *Geant4* را نشان می‌دهد. مشخصات ذرات ثانویه تولید شده در اثر برهم‌کنش اسپالیشن و واپاشی هسته مرکب ایجاد شده با ذرات آلفا رادن و دختران با انرژی‌های ۵،۴۹، ۶ و ۷،۶۹ MeV برای بافت ریه، محاسبه شده که در جداول ۱ تا ۳ آورده شده است. برای رسیدن به خطای زیر ۱٪، تعداد ذرات شبیه‌سازی شده 10^8 ذره در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: عناصر تولید شده در بافت ریه با تابش رادن با انرژی ۵،۴۹ MeV

	Gain ($\times E-8$)	Emean	Lifetime
^{26}Al	1	749.82 keV	1.0351e+06 y
^{12}C	748	579.89 keV	Stable
^{13}C	6	932.4 keV	Stable
^{18}F	2	446.92 keV	Stable
^{26}Mg	1	67.598 eV	Stable
^{14}N	187	581 keV	Stable
^{23}Na	4	156.44 keV	Stable
^{21}Ne	4	735.75 keV	Stable
^{16}O	4944	507.61 keV	Stable
^{17}O	7	610.59 keV	Stable
^{18}O	16	346.25 keV	Stable
Alpha	29	2.5551 MeV	Stable

Deuteron	6	117.48 keV	Stable
e+	90	2.4798 MeV	Stable
e-	6281	613.75 keV	Stable
gamma	1856	5.0813 MeV	Stable
neutron	4	575 keV	14.67 min
nu_e	3	525.99 keV	Stable
proton	13723	974.07 keV	Stable

جدول 2: عناصر تولید شده در بافت ریه با تابش رادن با انرژی ۶ MeV

	Gain ($\times E-8$)	Emean	Lifetime
^{26}Al	1	610.84 keV	1.0351e+06 y
^{36}Ar	2	321.08 keV	Stable
^{12}C	1068	672.77 keV	Stable
^{13}C	10	827.75 keV	Stable
^{36}Cl	1	382.22 eV	4.3498e+05 y
^{18}F	2	545.54 keV	2.6394 h
^{26}Mg	1	67.598 eV	Stable
^{14}N	292	637.27 keV	Stable
^{23}Na	5	151.87 keV	Stable
^{21}Ne	4	859.67 keV	Stable
^{22}Ne	2	756.74 keV	Stable
^{16}O	6913	499.71 keV	Stable
^{17}O	6	307.76 keV	Stable
^{18}O	18	353.47 keV	Stable
^{31}P	1	25.1 keV	Stable
^{32}S	3	63.552 keV	Stable
alpha	120	3.2082 MeV	Stable
anti_nu_e	1	349.39 keV	Stable
deuteron	10	110.2 keV	Stable
e+	128	3.0918 MeV	Stable
e-	7093	652.95 keV	Stable
gamma	2094	5.2674 MeV	Stable
neutron	8	473.2 keV	14.67 min
nu_e	3	446.91 keV	Stable
proton	16191	1.0386 MeV	Stable

جدول 3: عناصر تولید شده در بافت ریه با تابش رادن با انرژی ۷,۶۹ MeV

	Gain ($\times E-8$)	Emean	Lifetime
^{26}Al	6	984.11 keV	1.0351e+06 y
^{27}Al	2	510.76 keV	Stable

³⁶ Ar	2	772.03 keV	Stable
³⁸ Ar	1	1.0301 MeV	Stable
¹² C	2713	1.2462 MeV	Stable
¹³ C	28	820.2 keV	Stable
⁴² Ca	1	792.13 keV	Stable
³⁵ Cl	9	301.53 keV	Stable
³⁷ Cl	2	78.728 keV	Stable
¹⁸ F	1	537.55 keV	2.6394 h
³⁹ K	1	100.04 keV	Stable
²⁴ Mg	6	67.598 eV	Stable
¹⁴ N	586	795 keV	Stable
¹⁴ N	1	98.966 keV	Stable
²³ Na	15	259.73 keV	Stable
²⁰ Ne	3	1.3416 MeV	Stable
²¹ Ne	10	1.202 MeV	Stable
¹⁶ O	13035	449.65 keV	Stable
¹⁷ O	13	452.01 keV	Stable
¹⁸ O	37	366.72 keV	Stable
³¹ P	6	94.773 keV	Stable
³² S	8	164.14 keV	Stable
³² S	1	176.6 keV	Stable
alpha	1047	4.1153 MeV	Stable
deuteron	22	61.599 keV	Stable
e+	130	2.8086 MeV	Stable
e-	7728	582.1 keV	Stable
gamma	2236	4.9302 MeV	Stable
neutron	23	846.61 keV	14.67 min
nu_e	7	889.52 keV	stable
proton	25526	1.2507 MeV	stable

با توجه به جداول ۱ تا ۳، ²⁶Al بهره 1×10^{-8} با انرژی متوسط 610.84 MeV و 749.82 MeV در اثر آلفای با انرژی‌های 5.49 MeV و 6 MeV و با بهره 6×10^{-8} با انرژی متوسط 984.11 keV در اثر آلفای با انرژی 7.69 MeV و نیمه‌عمر $y 1.0351 \times 10^{+6}$ تولید می‌شود که به علت زیاد بودن نیمه‌عمر آن مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین می‌توانیم از ³⁶Cl با بهره 1×10^{-8} و انرژی 382.22 eV با نیمه‌عمر $y 4.3498 \times 10^{+5}$ نیز نام برد که به دلیل نیمه‌عمر بالا می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. همچنین تولید ¹⁸F با انرژی‌های 545.54 keV و 537.55 keV به ترتیب مربوط به آلفا با انرژی‌های 5.49 MeV و 6 MeV با نیمه‌عمر 2.6394 h ساعت که به دلیل فعالیت در تولید رادیکال آزاد مورد توجه قرار می‌گیرند. با توجه به جداول ۱ تا ۳، پرتو گاما با انرژی 5.0813 MeV با بهره 1856×10^{-8} مربوط به آلفا با انرژی 5.49 MeV پرتو گاما با انرژی 5.2674 MeV با بهره 2094×10^{-8} مربوط به آلفا با انرژی 6 MeV و یک پرتو گاما با انرژی 4.93 MeV با بهره 2236×10^{-8} برای آلفا با انرژی 7.69 MeV در اثر برهم‌کنش ذرات آلفا رادن و دختران در بافت ریه تولید می‌شود. به علت زیاد بودن انرژی گاماها تولید شده مخاطرات تابشی آن در سرتاسر بدن وجود دارد. با توجه به جداول ۱ تا ۳، ذرات بتای مثبت با انرژی 2.4798 MeV با بهره 90×10^{-8} مربوط به آلفا با انرژی 5.49 MeV ذرات بتای مثبت با انرژی 3.0918 MeV با بهره 128×10^{-8} مربوط به آلفا با انرژی 6 MeV و ذرات بتای مثبت با

انرژی $2,8086 \text{ MeV}$ با بهره 130×10^{-8} برای آلفا با انرژی $7,69 \text{ MeV}$ در اثر برهم‌کنش ذرات آلفا رادن و دختران در بافت ریه تولید می‌شود و به علت واکنش نابودی در بدن مورد توجه قرار می‌گیرند. همچنین بتای منفی با انرژی $0,613 \text{ MeV}$ با بهره 6281×10^{-8} ، با انرژی $0,652 \text{ MeV}$ با بهره 7093×10^{-8} و با انرژی $0,582 \text{ MeV}$ با بهره 7788×10^{-8} برای ذرات آلفا با انرژی‌های $5,49 \text{ MeV}$ ، 6 MeV و $7,69 \text{ MeV}$ به ترتیب در بافت ریه ایجاد می‌شود که به علت زیاد بودن انرژی آن‌ها مخاطرات تابشی محسوسی هستند. نتایج جداول ۱ تا ۳ نشان می‌دهد که پروتون‌ها با انرژی $0,974 \text{ MeV}$ و بهره 130×10^{-8} با انرژی $1,0386 \text{ MeV}$ و بهره 16191×10^{-8} و با انرژی $1,2507 \text{ MeV}$ و بهره 25526×10^{-8} به ترتیب برای آلفای $5,49 \text{ MeV}$ ، 6 MeV و $7,69 \text{ MeV}$ در بافت ریه ایجاد می‌شود. مقدار نهایی پروتون‌های رادن و دختران آن ۳ بهره تولید می‌کند. آن‌ها با در نظر گرفتن ضریب تعادل بین رادن و دختران آن است که ضریب تعادلی برابر $0,5$ ، $0,7$ و 1 به ترتیب برای ^{218}Ra ، ^{218}Po و ^{216}Po می‌باشد. در نتیجه بهره نهایی تولید شده پروتون‌های بافت ریه برابر مقدار زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Gain}_{\text{Final}} &= 1 \times 1.3723 \times 10^{-4} + 0.7 \times 1.6191 \times 10^{-4} + 0.5 \times 2.5526 \times 10^{-4} \\ &= 3.78197 * 10^{-4} \end{aligned}$$

همچنین ذرات ^{16}O ، ^{21}Ne ، ^{20}Ne ، ^{23}Na ، ^{15}N ، ^{14}N ، ^{26}Mg ، ^{39}K ، ^{18}F ، ^{37}Cl ، ^{35}Cl ، ^{42}Ca ، ^{12}C ، ^{13}C ، ^{38}Ar ، ^{36}Ar ، ^{27}Al ، ^{26}Al ، ^{32}S ، ^{31}P ، ^{18}O ، ^{17}O و دوترون به دلیل داشتن انرژی LET بالایی که دارند و مخرب هستند، زیرا در فاصله کوتاهی انرژی خود را از دست می‌دهند و ضریب تابش WR برای این ذرات ۲۰ است [۸].

۴. نتیجه‌گیری

ایجاد سرطان در بافت ریه در اثر استنشاق رادن و ذرات آلفا با بافت ریه یکی از موارد شناخته‌شده هست. تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است یکی از مخاطرات دیگر رادن و دختران آن امکان تولید ذرات ثانویه در اثر جذب ذرات آلفای رادن توسط هسته عناصر موجود در بافت ریه هست. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که امکان تولید پروتون‌های پر انرژی در بافت ریه وجود دارد. علاوه بر پروتون‌ها ذرات ^{12}C ، ^{13}C ، ^{35}Cl ، ^{37}Cl ، ^{18}F ، ^{19}F ، ^{39}K ، ^{26}Mg ، ^{14}N ، ^{15}N ، ^{23}Na ، ^{21}Ne ، ^{16}O ، ^{17}O ، ^{18}O ، ^{31}P ، ^{32}S و دوترون در بافت ریه ایجاد می‌شود. از این ذرات ثانویه یون‌های ^{12}C ، ^{13}C ، ^{35}Cl ، ^{37}Cl ، ^{18}F ، ^{39}K ، ^{21}Ne ، ^{20}Ne ، ^{26}Al با انرژی چندین مگا الکترون ولت مشاهده می‌شود.

۵. مراجع

- [1] M. Anderson, SJ Marsden, EG Wright, MA Kadhim, DT Goodhead, CS Griffin, R. "Complex chromosome aberrations in peripheral blood lymphocytes as a potential biomarker of exposure to high-LET alpha-particles." *International Journal of Radiation Biology* 76.1 (2000): 31-42.
- [2] Richardson, David B., et al. "Lung Cancer and Radon: Pooled Analysis of Uranium Miners Hired in 1960 or Later." *Environmental health perspectives* 130.5 (2022): 057010.
- [3] Mirdoraghi, Mohammad, et al. "Assess the annual effective dose and contribute to risk of lung cancer caused by internal radon 222 in 22 regions of Tehran, Iran using geographic information system." *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 18.1 (2020): 211-220
- [4] Riudavets, Mariona, et al. "Radon and Lung Cancer: Current Trends and Future Perspectives." *Cancers* 14.13 (2022): 3142
- [5] Hubaux, Roland, et al. "Arsenic, asbestos and radon: emerging players in lung tumorigenesis." *Environmental health* 11.1 (2012): 1-12.
- [6] Khan, A. J. "A study of indoor radon levels in Indian dwellings, influencing factors and lung cancer risks." *Radiation measurements* 32.2 (2000): 87-92.
- [7] Scott, Bobby R. "Radiation toxicology, ionizing and nonionizing." (2014): 29-43.



- [8] Haggmann, Chris, David Lange, and Douglas Wright. "Cosmic-ray shower generator (CRY) for Monte Carlo transport codes." 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Vol. 2. IEEE, 2007.
- [9] Friedberg, Wallace, and Kyle Copeland. Ionizing radiation in Earth's atmosphere and in space near earth. Federal Aviation Administration Oklahoma City Ok Civil Aerospace Medical Inst, 2011.