

محاسبه کسر جذب انرژی پرتوهای گامای ^{199}Au در فانتوم ORNL با کد MCNP و مقایسه نتایج با فانتوم RADAR

محمد سلیمان پور^{۱*}، ملیحه حدیثی^۱، ناصر وثوقی^۱، سیدابوالفضل حسینی^۱، حسن یوسف‌نیا^۲

۱. دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۸۸۹۶۹۴، تهران - ایران

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران - ایران

چکیده:

یکی از عوامل مهم مرگ و میر در جهان ابتلا به سرطان می‌باشد. سرطان به مجموعه بیماری‌هایی گفته می‌شود که از تکثیر بیش از حد سلول‌های بدن پدید می‌آید. در میان روش‌های مختلف درمان سرطان، پرتودرمانی هدفمند توسط رادیوداروها یک روش سودمند در درمان سرطان‌های برگشت پذیر و ثانویه است. در پرتودرمانی هدفمند، هدف نهایی وارد کردن دز بیشینه به سلول‌های سرطانی و کمترین آسیب به سلول‌های سالم اطراف آن است. هدف اصلی در این مقاله، محاسبه کسر جذب انرژی برای انرژی گامای ^{199}Au (۱۵۹ keV) با استفاده از فانتوم ORNL می‌باشد که در آن از کد MCNP جهت شبیه‌سازی استفاده شده و جهت اثبات صحت‌سنجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های فانتوم مورد استفاده در روش RADAR مقایسه شد. نتایج به دست آمده از هر دو فانتوم در توافق بسیار خوبی با هم هستند.

کلیدواژه‌ها: کسر جذب انرژی، شبیه‌سازی مونت کارلو، فانتوم ORNL، MCNP

Calculation of energy absorption fraction of Au-199 gamma rays in ORNL phantom with MCNP code and comparison of results with RADAR phantom

M.Solimanpoor^{*1}, M.Hadisi¹, N.Vosoughi¹, S.A.Hoseini¹, Hassan Yousefnia²

1. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, 1458889694, Tehran, Iran

2. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), 14395-836, Tehran, Iran

Abstract:

One of the leading causes of death in the world is cancer. Cancer is a group of diseases that result from the overproduction of body cells. Among the various methods of cancer treatment, targeted radiotherapy by radiopharmaceuticals is a useful method in the treatment of reversible and secondary cancers. In targeted radiotherapy, the final goal is import maximum dose to the cancer cells and minimum damage to the surrounding healthy cells. The main purpose of this paper is to calculation of energy absorption fraction for gamma energy of 159 keV gold-199 radioisotope using from ORNL phantom that from MCNP code is used for simulation and to prove the validation the simulation results were compared with the phantom data used in the RADAR method. The results from both phantoms are in perfect agreement.

Keywords: Energy absorption fraction, Monte Carlo simulation, ORNL Phantom, MCNP

Email: mohammad.sfm9574@gmail.com

۱. مقدمه

به منظور درمان انواع سرطان‌ها از روش‌های مختلف درمانی از قبیل جراحی، شیمی درمانی و پرتودرمانی به صورت تنهایی یا ترکیبی استفاده می‌شود که انتخاب روش درمان به نوع بیماری، مرحله بیماری و وضعیت بیمار بستگی دارد. پرتودرمانی یکی از رایج‌ترین روش‌های درمان سرطان است که می‌تواند به تنهایی یا همراه با سایر روش‌های درمانی مانند جراحی، شیمی‌درمانی یا هورمون‌درمانی مورد استفاده قرار گیرد. [۱]. در پرتودرمانی از تابش پرتوهای گاما یا ایکس و یا ذرات باردار برای از بین بردن سلول‌های سرطانی استفاده می‌شود. هدف در این روش تخریب بافت‌های سرطانی با حداقل آسیب به بافت‌های سالم اطراف می‌باشد. در این روش محاسبه دز و طراحی درمان بسیار مهم است زیرا مقدار دز نامناسب پرتو نه تنها تومور را از بین نمی‌برد بلکه باعث به وجود آمدن عوارض در بافت سالم می‌شود. پرتودرمانی به دو صورت کلی گاهی به صورت خارجی و گاهی به صورت داخلی انجام می‌شود [۲].

در درمان هدفمند با رادیودارو که جزء روش‌های پرتودرمانی داخلی به حساب می‌آید، از تفاوت بیولوژیکی بین سلول‌های توموری و بافت‌های طبیعی، به منظور هدایت انتخابی رادیونوکلیدها به تومور استفاده می‌شود. برای محاسبه جذب انرژی پرتو گاما در اندام‌ها و بافت‌ها می‌توان دز جذب شده در اندام یا بافت هدف را بر اثر تابش اندام چشمه که ایزوتوپ پرتوزا در آن به طور یکنواخت توزیع شده است، محاسبه کرد. هدف نهایی در این روش وارد کردن دز بیشتر تشعشع به سلول‌های تومور از طریق خواص بیولوژیکی تومورها نسبت به سلول‌های طبیعی است [۳]. مهم‌ترین معیار در انتخاب یک رادیونوکلید درمانی، خصوصیات ویژه واپاشی و واکنش‌پذیری بیوشیمیایی آن است [۳، ۴]. رادیوایزوتوپ‌های مختلف طلا از جمله طلا-۱۹۸ و طلا-۱۹۹ در اوایل دهه ۱۹۳۰ کشف شدند. طلا-۱۹۹ با نیمه عمر ۳/۱۴ روز یک رادیوایزوتوپ مهم بتا‌زاست که ذرات بتا را با بیشینه انرژی ۲۹۵ keV و همچنین پرتوهای گاما قابل تصویربرداری با انرژی ۱۵۹ keV را ساطع می‌کند [۵].

در درمان با استفاده از رادیوداروها، تعیین میزان پرتوزایی در تومور به عنوان هدف و همچنین میزان توزیع دز جذبی در سایر ارگان‌ها برای ارزیابی درمان ضروری است. آسیب حاصل از تابش به جذب انرژی بستگی دارد و تقریباً با تراکم انرژی جذب شده در بافت متناسب است. اثرات بیولوژیکی درمان با رادیونوکلید از طریق کمیت فیزیکی دز جذبی که به صورت انرژی جذب شده در واحد جرم تعریف شده، بیان می‌گردد. تعیین دز جذبی در بافت‌ها و تخمین دز تابشی برای هر ارگان به منظور دستیابی به هدف درمان در پرتودرمانی، ارزیابی خطرات تزریق رادیودارو و همچنین تعیین بیشینه مقدار اکتیویته تزریقی استفاده می‌شود [۳، ۵].

با روش ارائه شده توسط MIRD برای محاسبه جذب انرژی پرتو گاما در اندام‌ها و بافت‌ها می‌توان دز جذب شده در اندام یا بافت هدف را بر اثر تابش اندام چشمه که ایزوتوپ پرتوزا در آن به طور یکنواخت توزیع شده است، محاسبه کرد. این روش بر اساس محاسبه کسر جذبی (که به صورت انرژی جذب شده توسط ارگان هدف به انرژی گسیل شده از ارگان چشمه تعریف می‌شود) با استفاده از تکنیک‌های نمونه‌برداری مونت کارلو پایه‌ریزی شده است. کسر جذبی با استفاده از تکنیک‌های مونت کارلو که به صورت ریاضی برابر فوتون‌های گسیل شده توسط یک ارگان چشمه خاص را دنبال می‌کند، تخمین زده می‌شود و همچنین انرژی در ارگان‌های مختلف درون فانتوم برای هر تراپد فوتون ثبت می‌شود. در انتها نیز انرژی جذب شده برای هر ناحیه یا ارگان محاسبه می‌شود [۶، ۷].

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص محاسبه کسر جذبی انرژی و فاکتور S انجام شده است. در سال ۲۰۰۹، دیوولی^۱ و همکارانش، مطالعاتی را بر روی محاسبه فاکتور S توسط کد MCNP برای رادیوایزوتوپ ید-۱۳۱ با استفاده از تصاویر CT و مقایسه داده‌ها با منبع ارزیابی دز تابش انجام دادند [۷]. در سال ۲۰۱۹، طاهرپور و همکارانش، مطالعاتی بر روی محاسبه فاکتور S با استفاده از Geant4 برای الکترون‌های کم انرژی را انجام دادند [۸].

¹ Divoli

هر چند محاسبات کسر جذبی انرژی‌های گاما در مطالعات زیادی انجام شده و هدف اصلی آن محاسبه فاکتور S برای رادیوایزوتوپ‌های مختلف بوده است، لیکن مقادیر ارائه شده در روش‌های مختلف به دلیل استفاده از فانتوم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت هستند. از طرفی ظهور رادیوایزوتوپ‌های جدید تشخیصی و درمانی در مسیر توسعه رادیوداروهای نوین، لزوم محاسبات در این راستا را تقویت می‌نماید. مطالعه حاضر نیز در راستای محاسبات فاکتور S برای رادیوایزوتوپ نوظهور طلا-۱۹۹ طراحی گردیده و به دلیل عدم دسترسی به فانتوم بسیار دقیق روش RADAR² [۹] (که داده‌های آن در نرم‌افزار OLINDA/EXM موجود است)، از فانتوم در دسترس ORNL استفاده شده است. جهت بررسی میزان کارایی، دقت و صحت فانتوم ORNL به عنوان فانتومی محاسباتی دو بعدی ابتدا در انرژی ۵۰۰ keV انجام و میزان تطابق آن با داده‌های فانتوم روش RADAR مقایسه شدند. در ادامه برای انرژی گامای ۱۵۹ keV ساطع شده از رادیوایزوتوپ درمانی نوین طلا-۱۹۹ محاسبات تکرار و مجدداً با داده‌های فانتوم روش RADAR مقایسه شدند.

۲. روش کار

در این مطالعه، مطابق با روش MIRD و از کد مونت کارلوی MCNP و فانتوم مرد بالغ ORNL (شکل ۱) جهت شبیه‌سازی و محاسبه کسر جذبی انرژی استفاده شده است. تعیین دز جذبی در اندام‌های مختلف از روش MIRD که بر مفهوم کسر جذبی متکی است، بر طبق این روش، می‌توان آهنگ دز ناشی از ذره i ام را در هدفی به وزن m کیلوگرم از طریق رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$D_i = \frac{1.6 \times 10^{-13} \times A_s \times E_i \times n_i \times \varphi_i}{m} \quad (1)$$

در این رابطه A_s اکتیویته چشمه، E_i انرژی ذره گسیل شده، n_i تعداد ذرات با انرژی E_i به ازای هر استحاله و φ_i کسر جذبی می‌باشند. در واقع کسر جذبی پایه و اساس محاسبات دز در روش MIRD می‌باشد. کسر جذب شده φ_i نشان‌دهنده مقداری از انرژی است که در تمام اندام یا بافت جذب می‌شود. اما برای تعیین دز جذبی باید مقدار کل انرژی جذب شده بر جرم اندام هدف تقسیم شود. به جای آنکه کسر انرژی جذب شده در اندام هدف را بر وزن اندام تقسیم شود، بهتر است از کسر جذب ویژه یا Φ_i استفاده نمود. Φ_i کسر انرژی جذب شده در واحد جرم بافت هدف در اثر i امین ذره گسیل شده از اندام چشمه است. چون هر اندامی در بدن برای اندام چشمه مشابه یک هدف است، ارتباط دقیق هدف-چشمه به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$(r_k \leftarrow r_h) \quad (2)$$

که در آن r_k نشان‌دهنده اندام هدف و r_h نماینده اندام چشمه است. از این‌رو دز اندام هدف در اثر فعالیت \tilde{A}_h در اندام چشمه r_h از رابطه (۳) تبعیت می‌کند [۹].

$$D(r_k \leftarrow r_h) = \tilde{A}_h \sum \Delta_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \quad (3)$$

در این صورت برای ساده شدن رابطه (۳)، تعریف جدیدی به صورت رابطه (۴) وارد می‌گردد.

$$(4) s(r_k \leftarrow r_h) = \sum \Delta_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h)$$

. در این صورت دز هر یک از اندام‌های هدف یعنی r_k در اثر اندام چشمه r_h از رابطه (۵) محاسبه خواهد شد.

² Organ Level Internal Dose Assessment

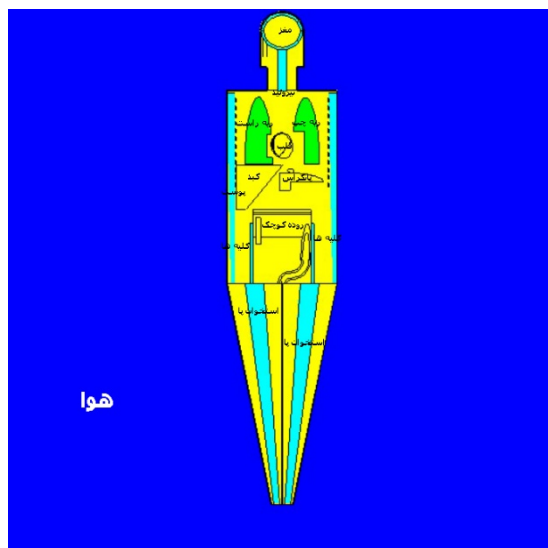
$${}^{(5)}D(r_k \leftarrow r_h) = \tilde{A}_h \times s(r_k \leftarrow r_h)$$

و در نهایت چون معمولاً پرتوزایی داخل بدن در همه جا پخش می‌شود، اندام هدف ممکن است تحت تابش‌دهی چندین اندام چشمه مختلف قرار بگیرد. بنابراین دز هدف از رابطه (۶) بدست خواهد آمد.

$${}^{(6)}D(r_k) = \sum_h D(r_k \leftarrow r_h)$$

مطابق با توضیحات ارائه شده در مورد کسر جذب به عنوان پایه و اساس محاسبات دز داخلی به روش MIRD که در آن کسر جذب ذرات بتا برای اندامی که چشمه و هدف یکی است برابر با یک و برای سایر موارد صفر در نظر گرفته می‌شود. در مورد کسر جذب اشعه گاما در انرژی‌های مختلف باید عنوان داشت که این محاسبات در انرژی‌های مختلف که به طور منظم از مقادیر کم افزایش می‌یابد در فانتوم‌های توسعه داده شده توسط هر گروه محاسبه می‌گردد. به گونه‌ای که کسر جذب برای انرژی‌هایی از گاما که در فانتوم محاسبه نشده است قابل برون‌یابی است.

در این مطالعه، به منظور برآورد میزان کارایی، دقت و صحت فانتوم ORNL به عنوان فانتومی محاسباتی دو بعدی [۱۰]، برای دو انرژی ۵۰۰ keV و ۱۵۹ keV (ساطع شده از طلا-۱۹۹) کسرهای جذب برای اندام مختلف انسان به عنوان چشمه و هدف محاسبات انجام شد و با مقادیر محاسبه شده در فانتوم سه بعدی روش RADAR مقایسه گردید. انرژی ۵۰۰ keV، انرژی موجود در جداول محاسبه کسر جذب روش RADAR بوده و مقادیر آن در جدول موجود می‌باشد. در صورتی که مقادیر کسر جذب انرژی گامای ۱۵۹ keV در جدول مذکور موجود نبوده و از روش برون‌یابی قابل برآورد است. در این صورت، کسرهای جذب برای این دو انرژی با استفاده از فانتوم دو بعدی ORNL (که داده‌های آن در دسترس نیست) محاسبه شده و با مقادیر مذکور برای فانتوم روش RADAR مقایسه شدند.



شکل ۱. فانتوم تمام بدن ORNL

برای محاسبه کسر جذب انرژی پرتوهای گامای ۱۵۹ keV ساطع شده از طلا-۱۹۹ در کد MCNP، ابتدا اعضاء مورد نظر که شامل آدرنالین، مغز، روده کوچک، دیواره قلب، کلیه‌ها، ریه‌ها، کبد، طحال و تیروئید بود را بعنوان چشمه پرتوزا با انرژی مشخص تعریف نموده

و در هر مرحله یکی از اعضاء بعنوان چشمه و اعضاء دیگر را بعنوان عضو هدف در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از تالی F6 مقدار انرژی برجای گذاشته شده در حجم عضو هدف محاسبه شد. با توجه به اینکه این تالی مقدار کرما را محاسبه می‌کند، علت انتخاب تالی F6 این بود که در ابعاد سلول‌های فانتوم مورد نظر و در انرژی‌های تعیین شده، به دلیل تعادل الکترونی، کرما و دز جذبی برابر است، در نتیجه می‌توان از تالی F6 بجای تالی F8* برای محاسبه دز جذبی استفاده کرد. این مراحل برای اعضاء ذکر شده ابتدا برای انرژی 0/5 MeV و سپس برای انرژی گاما طلا-۱۹۹ انجام شد. شبیه‌سازی برای انرژی 0/5 MeV به منظور برآورد میزان صحت محاسبات کسر جذبی محاسبه و با نتایج بدست آمده از فانتوم سه بعدی مورد استفاده در روش RADAR مقایسه شد.

۳. نتایج

نتایج حاصل از محاسبه کسر جذبی انرژی پرتوهای گامای 0/5 MeV و 159 keV و مقایسه آن با نتایج حاصل از محاسبات روش RADAR در جداول ۱ تا ۴ آمده است.

جدول ۱. داده‌های حاصل از کد MCNP برای انرژی 0/5 MeV و مقایسه با نتایج روش RADAR

کلیه‌ها		دیواره قلب		روده کوچک		مغز		آدرنالین		هدف چشمه
RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	
1/65E-05	1/55E-05	6/50E-06	5/77E-06	1/80E-06	1/80E-06	3/50E-08	3/26E-08	8/00E-04	7/31E-04	آدرنالین
1/5E-08	2/15E-08	1/5E-07	9/25E-08	5/5E-09	7/41E-09	0/00006	5/34E-05	3/50E-08	3/65E-08	مغز
1/85E-06	1/67E-06	0/0001	7/62E-05	6/5E-07	5/64E-07	1/5E-07	9/50E-08	6/5E-06	5/27E-06	دیواره قلب
0/000125	1/14E-04	1/85E-06	1/85E-06	4/75E-06	4/58E-06	1/5E-08	2/02E-08	1/65E-05	1/56E-05	کلیه‌ها
6/5E-06	6/08E-06	0/000005	4/76E-06	2/65E-06	2/59E-06	5/5E-08	4/56E-08	9/5E-06	8/98E-06	کبد
1/6E-06	1/62E-06	0/0000095	8/84E-06	4/4E-07	4/69E-07	3/05E-07	2/35E-07	5/5E-06	4/80E-06	ریه‌ها
0/000015	1/36E-05	0/0000035	3/44E-06	0/0000024	2/28E-06	6E-08	5/23E-08	0/00001	9/60E-06	طحال
1/85E-07	1/34E-07	1/15E-06	1/00E-06	2/95E-08	4/22E-08	0/0000035	1/43E-06	2/8E-07	2/82E-07	تیروئید

جدول ۲. ادامه داده‌های حاصل از کد MCNP برای انرژی 0/5 MeV و مقایسه با نتایج روش RADAR

تیروئید		طحال		پوست		ریه‌ها		کبد		هدف چشمه
RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	
2/80E-07	1/10E-07	1/00E-05	9/60E-06	1/00E-06	9/29E-07	5/50E-06	4/83E-06	9/50E-06	9/01E-06	آدرنالین



مغز	4/82E-08	5/5E-08	2/39E-07	3/05E-07	1/13E-06	1/2E-06	5/37E-08	6E-08	5/85E-07	3/5E-06
دیواره قلب	4/72E-06	0/000005	9/53E-06	0/0000095	9/73E-07	0/000001	2/71E-06	3/5E-06	4/70E-07	1/15E-06
کلیه‌ها	6/11E-06	0/0000065	1/64E-06	0/0000016	1/04E-06	1/15E-06	1/36E-05	0/000015	5/32E-08	1/85E-07
کبد	4/02E-05	0/0000435	4/15E-06	4/35E-06	9/74E-07	0/000001	1/72E-06	1/75E-06	1/12E-07	3/05E-07
ریه‌ها	3/94E-06	4/35E-06	2/38E-05	0/000026	1/09E-06	1/1E-06	3/62E-06	3/6E-06	8/07E-07	2/1E-06
طحال	1/73E-06	1/75E-06	3/44E-06	0/0000036	9/56E-07	1/05E-06	2/03E-04	0/000225	1/12E-07	2/75E-07
تیروئید	2/84E-07	3/05E-07	1/99E-06	0/0000021	2/56E-06	1/2E-06	2/78E-07	2/75E-07	4/92E-04	0/00085

جدول شماره ۳ و ۴ مقادیر کسر جذبی انرژی حاصل از شبیه‌سازی برای انرژی $0/159 \text{ MeV}$ که مربوط به انرژی گاما رادیوایزوتوپ طلا-۱۹۹ است را ارائه داده، که این مقادیر برای ۸ عضو مختلف بدن در فانتوم ORNL محاسبه شده است.

جدول ۳. داده‌های حاصل از کد MCNP برای انرژی $0/159 \text{ MeV}$ طلا-۱۹۹ و مقایسه با نتایج روش RADAR

هدف چشمه	آدرنالین		مغز		روده کوچک		دیواره قلب		کلیه‌ها	
	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP
آدرنالین	2/10E-04	2/25E-04	4/86E-09	3/67E-09	5/81E-07	5/85E-07	2/07E-06	2/20E-06	5/25E-06	5/60E-06
مغز	5/72E-09	3/67E-09	1/69E-05	1/91E-05	8/45E-10	3/82E-10	1/70E-08	2/28E-08	2/76E-09	1/46E-09
دیواره قلب	1/83E-06	2/20E-06	1/58E-08	2/28E-08	1/52E-07	1/67E-07	2/38E-05	3/09E-05	5/23E-07	6/37E-07
کلیه‌ها	5/23E-06	5/60E-06	2/39E-09	1/46E-09	1/62E-06	1/66E-06	6/01E-07	6/37E-07	3/44E-05	3/75E-05
کبد	3/11E-06	3/40E-06	6/24E-09	7/18E-09	8/88E-07	9/07E-07	1/67E-06	1/81E-06	2/11E-06	2/29E-06
ریه‌ها	1/63E-06	1/81E-06	4/67E-08	6/34E-08	1/21E-07	1/09E-07	3/10E-06	3/38E-06	5/01E-07	5/22E-07
طحال	3/35E-06	3/53E-06	6/89E-09	5/31E-09	7/76E-07	7/89E-07	1/23E-06	1/28E-06	4/64E-06	5/12E-06
تیروئید	6/55E-08	6/60E-08	3/49E-07	1/07E-06	6/32E-09	4/24E-09	2/83E-07	3/40E-07	2/50E-08	2/75E-08

جدول ۴. ادامه داده‌های حاصل از کد MCNP برای انرژی ۰/۱۵۹ MeV و مقایسه با نتایج روش RADAR

تیرئید		طحال		پوست		ریه‌ها		کبد		هدف
RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	RADAR	MCNP	چشمه
6/60E-08	2/58E-08	3/53E-06	3/41E-06	2/70E-07	2/58E-07	1/81E-06	1/70E-06	3/40E-06	3/17E-06	آدرنالین
1/07E-06	1/45E-07	5/31E-09	7/49E-09	3/21E-07	3/13E-07	6/34E-08	5/05E-08	7/18E-09	7/01E-09	مغز
3/40E-07	1/33E-07	1/28E-06	9/42E-07	2/96E-07	2/75E-07	3/38E-06	3/39E-06	1/81E-06	1/67E-06	دیواره قلب
2/75E-08	9/71E-09	5/12E-06	4/68E-06	3/05E-07	2/90E-07	5/22E-07	5/19E-07	2/29E-06	2/14E-06	کلیه‌ها
7/29E-08	2/51E-08	5/72E-07	5/64E-07	2/86E-07	2/74E-07	1/59E-06	1/45E-06	1/42E-05	1/31E-05	کبد
6/84E-07	2/42E-07	1/27E-06	1/24E-06	3/18E-07	3/09E-07	8/15E-06	7/52E-06	1/52E-06	1/35E-06	ریه‌ها
6/50E-08	2/48E-08	6/77E-05	6/20E-05	2/80E-07	2/69E-07	1/28E-06	1/19E-06	5/72E-07	5/64E-07	طحال
2/32E-04	1/39E-04	6/50E-08	6/43E-08	3/53E-07	7/36E-07	6/84E-07	6/19E-07	7/29E-08	6/55E-08	تیرئید

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور بررسی فانتوم ORNL در محاسبه کسر جذب پرتوهای گاما، مقادیر کسر جذب برای انرژی گامای ۱۵۹ keV ساطع شده از طلا-۱۹۹ و انرژی ۰/۵ MeV بوسیله کد مونت کارلوی MCNP در فانتوم ORNL شبیه‌سازی شد. به منظور بررسی صحت داده‌های به دست آمده، این داده‌ها با مقادیر ارائه شده در روش RADAR که از فانتوم‌های سه بعدی مانند فانتوم زوبال^۳ استفاده می‌نماید و داده‌های آن در نرم‌افزار اولیندا^۴ مورد استفاده است، مقایسه شدند. نتایج این مقایسه در جداول ۱ تا ۴ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود اختلاف بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با فانتوم ORNL و فانتوم سه بعدی زوبال در روش RADAR، در موارد زیادی بسیار اندک و در مواردی تا چند ده درصد می‌باشد. علت اصلی اختلاف بین داده‌های دو فانتوم موردنظر این است که شبیه‌سازی سه بعدی اعضا بدن در فانتوم RADAR این امکان را می‌دهد که ابعاد هر سلول و مواد تشکیل دهنده آن بصورت دقیق‌تری شبیه‌سازی گردد که این امکان برای فانتوم‌های دو بعدی وجود ندارد. این مطالعه نشان داد که برآورد کسر جذب پرتوهای گاما در زمان

³ Zubal Phantom

⁴ Olinda



عدم دسترسی به فانتوم‌های سه بعدی با استفاده از فانتوم‌های دو بعدی مانند فانتوم ORNL امکان پذیر بوده هر چند استفاده از فانتوم‌های سه بعدی می‌تواند نتایج دقیق تری را حاصل نماید.

مراجع

۱. Lippincott Williams & Khan, F.M. and J.P. Gibbons, *Khan's the physics of radiation therapy*. ۲۰۱۴ Wilkins.
۲. Podgoršak, E.B., *Radiation physics for medical physicists*. Springer ۲۰۰۶.
۳. Saha, G.B. and G.B. Saha, *Fundamentals of nuclear pharmacy*. Vol ۶. Springer: ۲۰۰۴.
۴. Lyra, M., et al., *Nuclear Medicine Therapy*.
۵. Kan, P., *Radioactive Au for potential radiotherapeutic application*. University of Missouri--Columbia, ۲۰۱۰.
۶. Snyder, W.J.M.P.n., " *S* " *absorbed dose per unit cumulated activity for selected radionuclides and organs*. ۱۹۷۵.
۷. Divoli, A., et al., *Effect of patient morphology on dosimetric calculations for internal irradiation as assessed by comparisons of Monte Carlo versus conventional methodologies*. (۳۱۶-۳۲۳): p. ۲ (۵۰. ۲۰۰۹).
۸. سلیم, al et ., محاسبه و ارزیابی نهشت انرژی و *S-value* ناشی از الکترون‌های کم-انرژی در یک مدل چندسلولی، با استفاده از *Geant-4*. *DNA*. (۲۰۱۹): p. ۲ (۷. ۱۳-۲۴).
۹. <https://www.doseinfo-radar.com/RADARHome.html>
۱۰. Lamart, S., et al., *Comparison of internal dosimetry factors for three classes of adult computational phantoms with emphasis on I-131*. (۲۰۱۱): p. ۲۲ (۵۶. ۷۳۱۷).