

## محاسبه کسر جذبی ویژه و ضریب S برای دزیمتری داخلی رادیونوکلئید لوتشیوم-۱۷۷ در

## فانتوم زوبال با استفاده از کد مونت کارلو GATE

سید احمد صحافی پور<sup>۱</sup>، الهام سعید زاده<sup>۱\*</sup>، سید پژمان شیرمردی<sup>۲</sup>، مهدی صادقی<sup>۳</sup> و سمانه برادران<sup>۲</sup><sup>۱</sup>گروه مهندسی هسته‌ای- پرتو پزشکی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.<sup>۲</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.<sup>۳</sup>گروه فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.<sup>\*</sup>گروه مهندسی هسته‌ای- پرتو پزشکی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۵۱۵-۷۷۵.

پست الکترونیکی: esaeedzadeh@srbiau.ac.ir

## چکیده

کسر جذبی ویژه یکی از پارامترهای مهم جهت تخمین دز داخلی می‌باشد. در این مقاله کسر جذبی ویژه تعدادی از ارگان‌های بدن با استفاده از فانتوم وکسلی زوبال محاسبه گردیده است. از کد مونت کارلوی GATE<sup>۱</sup> ورژن ۷.۲ برای شبیه سازی فوتون‌ها و ذرات بتای تک انرژی مربوط به رادیویزوتوپ لوتشیوم-۱۷۷ استفاده شده است. سه ارگان کلیه، کبد و طحال به‌عنوان ارگان چشمه در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند و کسر جذبی ویژه این ارگان‌های چشمه با مقادیر به‌دست آمده از داده‌های مطالعات قبلی مقایسه شده‌اند. در بیشتر داده‌ها، اختلاف قابل قبول می‌باشد و بیشترین مقدار در صد اختلاف نسبی نتایج این مطالعه و مطالعات قبلی، مربوط به فوتون با انرژی ۷۱ keV و در حالتی که طحال و کبد به‌عنوان ارگان‌های چشمه و هدف در نظر گرفته شده بودند، برابر با ۴۱٪ به‌دست آمد. با استفاده از مقادیر SAF به‌دست آمده، ضریب S<sup>۲</sup> که برای محاسبات دزیمتری در روش MIRD مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه و ارائه گردید.

کلیدواژه‌گان: کسر جذبی ویژه، فاکتور S، کد GATE، MIRD، دزیمتری داخلی، فانتوم زوبال.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل توسعه حامل‌های مولکولی پیچیده، استفاده از چشمه‌های باز و درمان هدفمند برای درمان تومورهای سرطانی در پزشکی هسته‌ای بسیار مورد توجه واقع شده است [۱]. کسر جذبی ویژه یکی از پارامترهای اصلی برای ارزیابی دز داخلی است و برابر است با مقدار کسری از انرژی ساطع شده از ارگان چشمه که در واحد جرم ارگان هدف

<sup>۱</sup> GEANT 4 Application for Tomographic Emission<sup>۲</sup> S-factor

کامپیوتری<sup>۱</sup> و یا تصویربرداری تشدید مغناطیسی<sup>۲</sup> از بدن انسان واقعی تهیه شده‌اند، توسعه زیادی یافته‌اند [۲].

فانتوم زوبال<sup>۳</sup> یکی از فانتوم‌های وکسلی می‌باشد که از تصاویر توموگرافی کامپیوتری انسان تهیه شده است. این فانتوم شامل ارگان‌های مختلفی می‌باشد که می‌توان برای محاسبات دزیمتری هریک را به صورت چشمه تعریف نمود [۳]. هدف از این مطالعه محاسبه کسر جذبی ویژه برای تک فوتون‌ها و ذرات بتای ساطع شده توسط رادیوداروی لوتشیوم-۱۷۷ با استفاده از کد مونت کارلوی GATE و پس از آن محاسبه ضریب S می‌باشد. ارگان‌های کبد، کلیه‌ها و طحال جهت محاسبات دزیمتری در این مطالعه انتخاب شده‌اند. معمولاً در مطالعات از این ارگان‌ها به دلیل حساس بودن به پرتو و همچنین به دلیل این‌که بیشترین تجمع هنگام دفع از این ارگان‌ها صورت می‌پذیرد، استفاده می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

به منظور محاسبه توزیع دز از فانتوم وکسلی زوبال بزرگسال استفاده شد. این فانتوم تعداد زیادی از ارگان‌ها و بافت‌های مهم و حساس به پرتو را دارا می‌باشد. این فانتوم یک آرایه  $128 \times 128 \times 243$  از وکسل‌هایی با ابعاد  $4 \times 4 \times 4$  mm<sup>3</sup> می‌باشد و از ۵۶ ارگان مانند مغز، قلب، مغز استخوان، استخوان، کبد، کلیه، طحال و... تشکیل شده و در شکل ۱ نمایش داده شده است. شکل، موقعیت و سایز ارگان‌های مختلف مطابق تصاویر سی تی اسکن انسان استاندارد شبیه‌سازی شده است [۴]. در جدول ۲، جرم برخی از ارگان‌های فانتوم زوبال ارائه شده است، همچنین چگالی و ترکیب عناصر هر ارگان برای محاسبه جرم آن مطابق ICRU44 تعیین شده‌اند [۵].

جذب می‌شود. پس از تزریق رادیونوکلئید به بدن بیمار جهت تشخیص یا درمان، رادیودارو در ارگان‌های مختلف توزیع شده و هر کدام از این ارگان‌ها نقش چ شمه را ایفا می‌کنند. ارزیابی و محاسبه دز ارگان‌های مختلف بدن به جهت محافظت ارگان‌ها در مقابل پرتو (اثرات احتمالی و قطعی) امری ضروری و مهم می‌باشد. رادیویزوتوپ لوتشیوم-۱۷۷ یکی از رادیویزوتوپ‌هایی است که به دلیل دارا بودن انرژی‌های مفید الکترون و گاما در سال‌های اخیر جهت درمان و همزمان تشخیص بیماری‌ها، توسعه زیادی یافته است.

در جدول ۱ مشخصات این رادیویزوتوپ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات رادیویزوتوپ لوتشیوم-۱۷۷.

رادیویزوتوپ	نیمه عمر	انرژی بتا ماکزیموم (keV)	انرژی بتا مؤثر (keV)	انرژی گاما (keV)
		۱۷۶ (۱۲/۲ %)	۵۹	۷۱/۶ (۰/۳۲ %)
لوتشیوم-۱۷۷	۶۷ روز	۴۹۷ (۷۸/۶ %)	۱۶۶	۱۱۳ (۶/۶ %)
		۳۸۴ (۹/۱ %)	۱۲۸	۱۳۷ (۰/۱۰ %)
		۲۴۸ (۰/۰۵ %)	۸۳	۲۰۸ (۱۱ %)
				۲۴۹ (۰/۲۰ %)
				۳۲۱ (۰/۲۱ %)

یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای محاسبه و ارزیابی دز داخلی و محاسبه دز جذبی، استفاده از کدهای مبتنی بر مونت کارلو به همراه یک فانتوم شبه انسان می‌باشد. برای محاسبات دزیمتری، هر چه فانتوم از نظر هندسی و شکل و فاصله ارگان‌ها شباهت بیشتری با بدن انسان داشته باشد، محاسبات از دقت بالاتری برخوردار خواهند بود. به همین علت در سال‌های اخیر فانتوم‌های وکسلی شبه انسان که از طریق تصاویر توموگرافی

<sup>3</sup>Zubal

<sup>1</sup> Computer Tomography Scan (CT scan)

<sup>2</sup> Magnetic Resonance Imaging (MRI)

شد. زمان اجرای برنامه تا حصول نتیجه به طور متوسط برای هر یک از انرژی‌های مختلف حدود ۴ ساعت بود.

## ۲.۲. اعتبارسنجی کد GATE

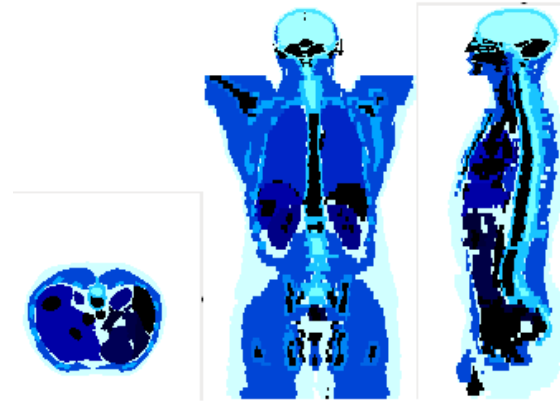
اعتبارسنجی کد محاسباتی GATE اجرا شده در مطالعه اخیر با مقایسه مقادیر SAF (برای ۳ ترکیب مختلف بافت چشمه-هدف) به دست آمده برای فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷ (۷۱/۶، ۱۱۳، ۱۳۶/۷، ۲۰۸، ۲۴۹ و ۳۲۱ keV) و همچنین مقادیر SAF به دست آمده داده‌های منتشر شده در سایت OpenDose [۱۱] که با فانتوم ICRP110AM انجام و همچنین درصد اختلاف نسبی آن‌ها با دیتاهای به دست آمده از کد GATE به دست آمده است و حداکثر درصد اختلاف نسبی به دست آمده نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد که در قسمت نتایج آمده است.

پس از اعتبارسنجی کد نوشته شده با داده‌های موجود از مطالعات قبلی، کلیه داده‌ها در انرژی‌های مختلف لوتشیوم با داده‌های بونیابی شده از طریق ICRP89 و همچنین داده‌های موجود در سایت OpenDose [۱۱] مقایسه شدند.

## ۳.۲. محاسبه کسر جذب و ویژه (SAF) و ضریب S

انرژی پرتوهای گاما و ذرات بتای لوتشیوم ۱۷۷ مطابق جدول ۱ به صورت تک انرژی و جداگانه در قسمت تعریف چشمه شبیه‌سازی شد و انرژی جذب شده در ارگان هدف با استفاده از DoseActor به دست آمد. توزیع اکتیویته در ارگان چشمه به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و پس از آن انرژی جذب شده در ارگان هدف محاسبه گردید. این پروسه برای ارگان‌های کلیه، طحال و کبد به عنوان چشمه به صورت مستقل انجام گردید. پس از آن کسر جذب ویژه برای هر ارگان چشمه و ارگان هدف با استفاده از معادله زیر، محاسبه گردید [۴].

$$SAF(r_T \leftarrow r_S) = \frac{(E_T/E_S)}{m} \quad (1)$$



شکل ۱- برش مقطع ساجیتال<sup>۱</sup>، کرونال<sup>۲</sup> و لترال<sup>۳</sup> فانتوم زوبال.

جدول ۲- جرم ارگان‌های مختلف فانتوم زوبال

جرم (kg)	ارگان/بافت
۱/۹۸۵	کبد
۰/۵۱۲	کلیه‌ها
۰/۳۷۷	طحال
۱/۰۳۵	ریه‌ها
۰/۰۰۷	تیروئید
۰/۲۱۱	مثانه
۱/۲۱۸	مغز
۲۴/۰۷۸	ماهیچه‌ها
۱/۴۱۸	مغز استخوان
۰/۸۳۶	جمع‌همه

## ۱.۲. کد مونت کارلوی GATE

کلیه شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه بوسیله کد مونت کارلوی GATE (ورژن ۷.۲) انجام شده‌اند که بر پایه کد Geant ۴ می‌باشد [۶]. کد GATE معمولاً برای طراحی سیستم‌های تصویربرداری و پزشکی هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. همچنین استفاده از کدهای GATE و Geant ۴ برای اهداف دزیمتری در مقالات متعددی مطرح شده است [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. در این مطالعه از یک کامپیوتر با پردازنده Intel i3-7100 CPU 3.90GHz و رم 8.0 GB استفاده

<sup>3</sup> Lateral

<sup>1</sup> Sagittal

<sup>2</sup> coronal

مختلف محاسبہ گردید کہ در شکل ۲ مقادیر مربوط به ارگان‌ها و هدف‌های یکسان (خود جذبی بافت‌ها) و مقایسہ آن با مطالعات قبلی قابل مشاهده است. مقادیر بہ دست آمدہ از مطالعات قبلی پس از درونیابی بہ انرژی‌های لوتشیوم تبدیل گردید و همچنین مقادیر درصد اختلاف<sup>۱</sup> آن‌ها نیز محاسبہ گردید. مقادیر کسر جذبی ویژه فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷ برای ارگان‌های هدف و چشمہ غیر یکسان نیز محاسبہ و با مقادیر منتشر شدہ توسط ICRP89 و openDose مقایسہ گردید و در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ارائه شدہ اند.

در حالی کہ ارگان چشمہ و هدف یکسان می‌باشند، بیشترین مقدار اختلاف نسبی میان دادہ‌های کسر جذبی ویژه فوتون‌ها در این مطالعہ و دادہ‌های مطالعات قبلی مربوط بہ انرژی keV ۱۳۶ و خود جذبی در بافت کلیہ‌ها (۳۶٪) می‌باشد.

حداکثر اختلاف ملاحظہ شدہ کسر جذبی ویژه فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷ مربوط بہ ارگان‌های مختلف در این مطالعہ با مطالعات قبلی مربوط بہ انرژی keV ۷۱ و ارگان چشمہ کبد و ارگان هدف طحال (۴۱٪) می‌باشد.

### ۲.۳. کسر جذبی ویژه ذرات بتای لوتشیوم-۱۷۷

مقادیر کسر جذبی ویژه برای الکترون‌های گسیل شدہ از لوتشیوم-۱۷۷ با انرژی‌های مؤثر (میانگین) بہ صورت جداگانہ (keV ۵۹، ۸۳، ۱۲۸ و ۱۶۶) با استفاده از کد مونت کارلو GATE و برای سہ ارگان چشمہ و هدف کبد، کلیہ‌ها و طحال محاسبہ گردید. در شکل ۶، مقادیر کسر جذبی ویژه مربوط بہ ارگان‌ها و هدف‌های یکسان (خود جذبی بافت‌ها) و مقایسہ آن‌ها با مطالعات قبلی نشان دادہ شدہ است. درصد اختلاف (%RD) نیز برای ارگان‌های گزارش شدہ نسبت بہ مطالعات قبلی محاسبہ شد.

کہ در آن  $RT$  مختصات ارگان چشمہ،  $ES$  مختصات ارگان هدف،  $ET$  انرژی ساطع شدہ از ارگان چشمہ،  $ES$  انرژی جذب شدہ در ارگان هدف و  $m$  جرم ارگان هدف می‌باشد. سپس اختلاف مقادیر کسر جذبی ویژه حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر منتشر شدہ توسط ICRP89 (پس از درونیابی) [۱۰] و همچنین مقادیر ارائه شدہ در سایت openDose [۱۱] با استفاده از روابط (۲) و (۳) بہ دست آمد.

$$\%RD = \frac{(SAF_{GATE} - SAF_{ICRP89})}{SAF_{ICRP89}} \quad (2)$$

$$\%RD = \frac{(SAF_{GATE} - SAF_{OpenDose})}{SAF_{OpenDose}} \quad (3)$$

پس از محاسبہ کسر جذبی ویژه برای فوتون‌ها و ذرات بتای لوتشیوم-۱۷۷ جهت محاسبہ ضریب  $S$  از معادلہ زیر استفادہ گردید.

$$S = \sum_{i=1}^m E_{i\gamma} n SAF_{i\gamma} + \sum_{i=1}^m E_{i\beta} n SAF_{i\beta} \quad (4)$$

کہ در آن  $E_{i\gamma}$ ،  $E_{i\beta}$ ،  $n$  آمین انرژی پرتو گاما،  $E_{i\beta}$ ،  $n$  آمین انرژی ذرہ بتا،  $n$  احتمال واپاشی مربوط بہ بتا و گاما در آن انرژی  $SAF_{i\gamma}$  کسر جذبی ویژه مربوط بہ پرتو گامای ہر انرژی و  $SAF_{i\beta}$  کسر جذبی ویژه مربوط بہ ذرہ بتای ہر انرژی می‌باشد.

### ۳. نتایج

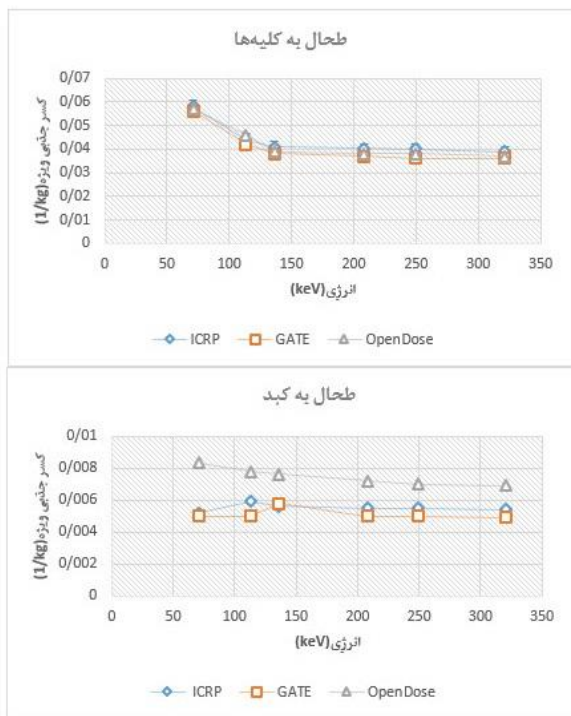
مقادیر کسر جذبی ویژه برای ہریک از انرژی‌های فوتون و الکترون در ارگان‌های مورد نظر در فانتوم وکسل زوبال از طریق شبیه‌سازی با کد مونت کارلوی GATE محاسبہ و با مقادیر موجود در مطالعات قبلی مقایسہ گردیدند [۱۰، ۱۱].

#### ۱.۳. کسر جذبی ویژه فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷

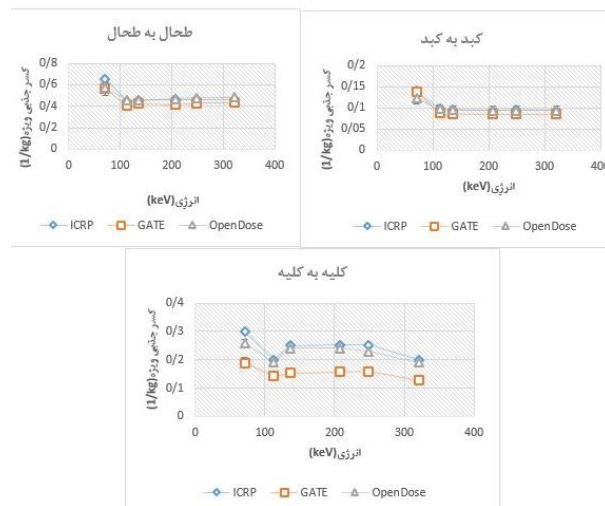
کسر جذبی ویژه فوتون‌های تک انرژی keV ۷۱، ۱۱۳، ۱۳۶، ۲۰۸، ۲۴۹ و ۳۲۱ لوتشیوم-۱۷۷ با استفاده از کد مونت کارلوی GATE برای سہ ارگان چشمہ و هدف (کبد، کلیہ‌ها و طحال)

<sup>۱</sup> Relative Differences Percentage (%RD)

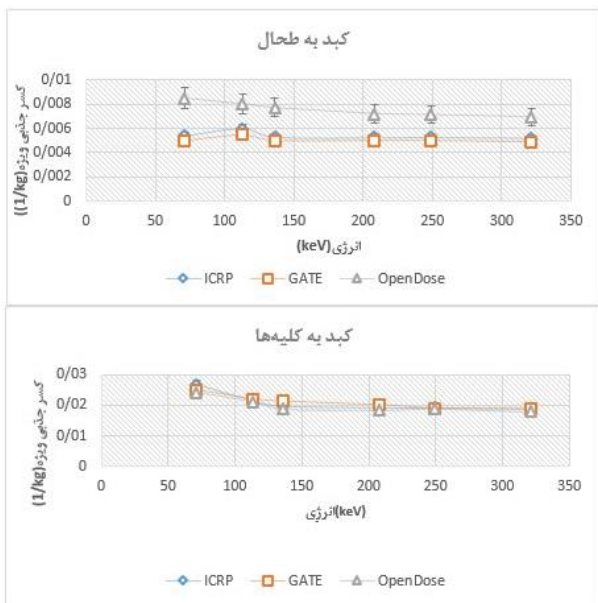
مقادیر کسر جذب ویژه ذرات بتای لوتشیوم-۱۷۷ برای ارگان‌های هدف و چشمه غیر یکسان نیز محاسبه و با مقادیر محاسبات قبلی مقایسه شده و در شکل‌های ۷ الی ۹ ارائه شده است.



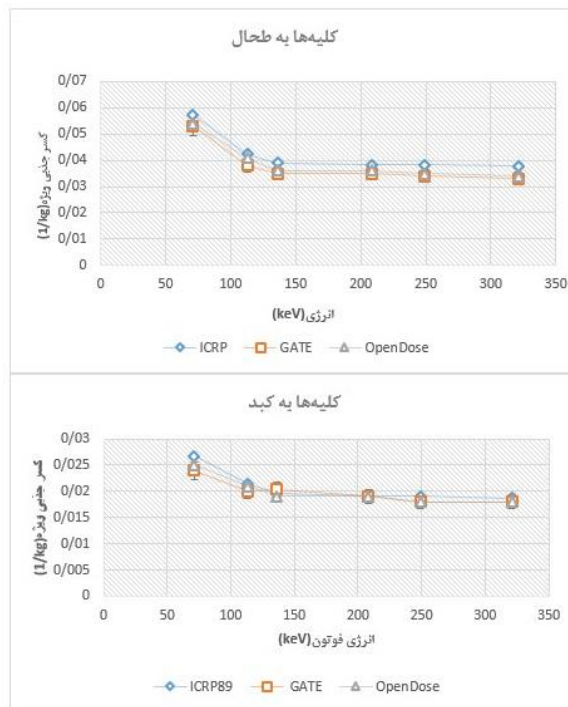
شکل ۴. کسر جذب ویژه فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷، از طحال به کبد و کلیه‌ها.



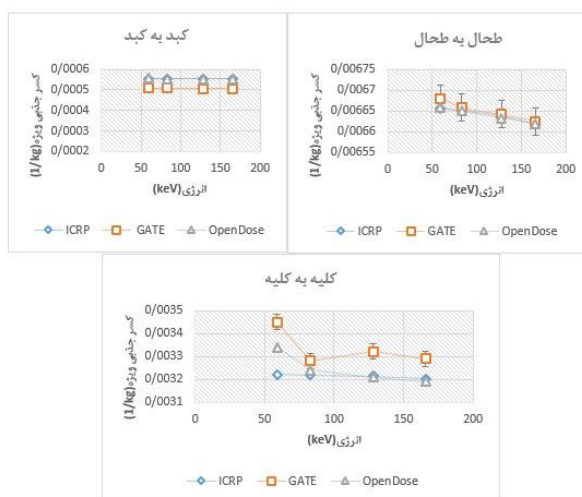
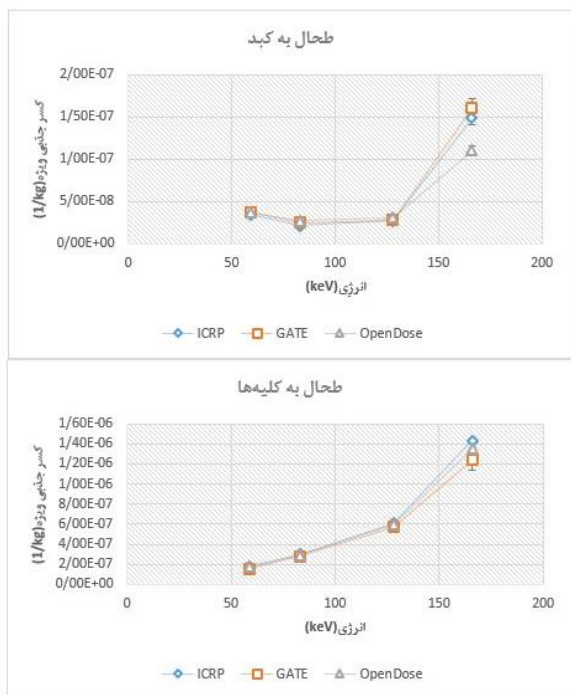
شکل ۲. کسر جذب ویژه فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷، برای خود جذبی ارگان‌های کبد، کلیه‌ها و طحال.



شکل ۵. کسر جذب ویژه فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷، از کبد به طحال و کلیه‌ها.

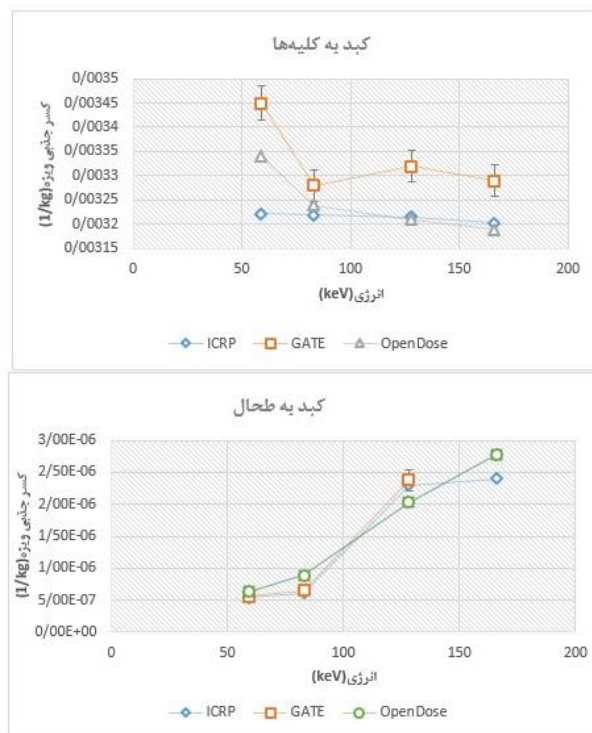
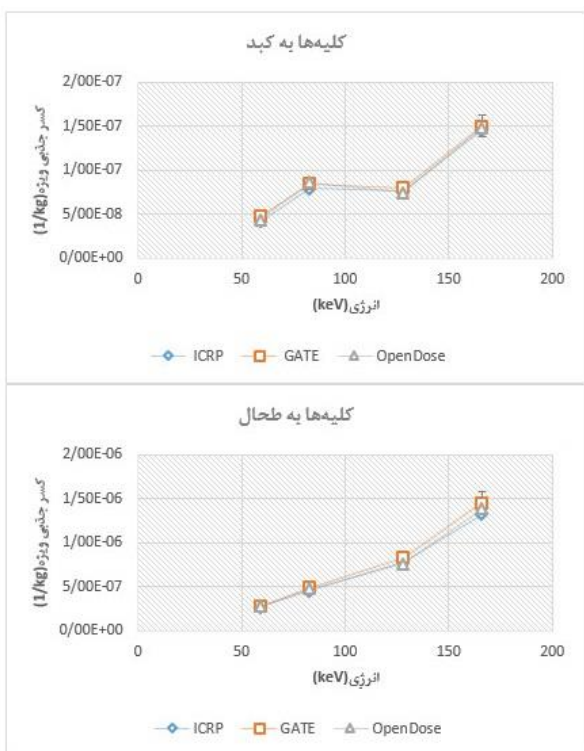


شکل ۳. کسر جذب ویژه فوتون‌های لوتشیوم-۱۷۷ از کلیه‌ها به کبد و طحال.



شکل ۶. کسر جذبی ویژه ذرات بنای لوتشیوم-۱۷۷ برای ارگان‌های کبد، کلیه‌ها و طحال در حالتی که ارگان چشمه و هدف یکسان می‌باشند.

شکل ۸. کسر جذبی ویژه ذرات بنای لوتشیوم-۱۷۷، از طحال به کلیه‌ها و کبد.

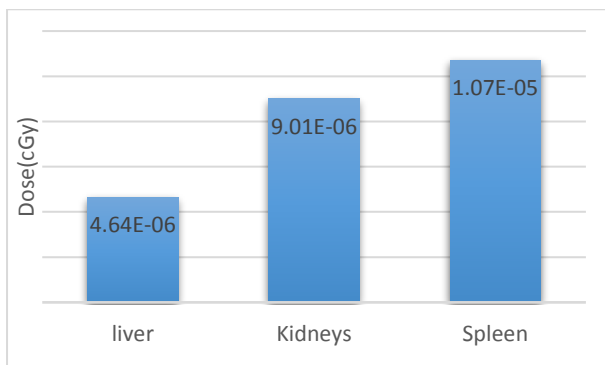


شکل ۷. کسر جذبی ویژه ذرات بنای لوتشیوم-۱۷۷، از کبد به کلیه‌ها و طحال.

شکل ۹. کسر جذبی ویژه ذرات بنای لوتشیوم-۱۷۷، از کلیه‌ها به طحال و کبد.



کلیه و هدف طحال محاسبه و با دز ناشی از خودجذبی طحال جمع، و به عنوان دز طحال ارائه گردیده است. همان طور که از نتایج جدول ۳ قابل مشاهده است، مقادیر درصد اختلاف به دست آمده از نتایج این تحقیق و مطالعات مشابه با سایر فانتومها کمتر از ۱۰٪ می باشد و بیشترین درصد اختلاف مربوط به کلیه به عنوان بافت چشمه و طحال به عنوان بافت هدف و ۹/۳٪ می باشد. این اختلاف می تواند به دلیل تفاوت در سایز این ارگانها و فاصله بین آنها در فانتومهای مختلف باشد. با توجه به این که فانتوم استفاده شده در این مطالعه، فانتوم زوبال بوده و فانتومهای استفاده شده در مطالعات دیگر ICRP89 و ICRP110M می باشد و سایز و جرم ارگانها و فاصله ارگانها در این فانتومها با یکدیگر متفاوت می باشد، و سایز و جرم ارگانها و فاصله بین آنها تاثیر به سزایی در مقادیر ضریب S دارد، لذا به نظر می رسد دلیل این اختلاف این عوامل باشند.



شکل ۱۰. دز ناشی از خود جذب و جذب از دیگر ارگانها به ازای یک مگا بکرل اکتیویته در هر ارگان با استفاده از شبیه سازی GATE و فانتوم زوبال.

#### ۴. نتیجه گیری

تفاوت قابل قبول میان داده های کسر جذب و ویژه و همچنین ضریب S محاسبه شده در این مطالعه نسبت به مطالعات قبلی مشاهده شد. کسر جذب و ویژه و ضریب S به انرژی فوتونها و الکترونها، جرم اندام چشمه و هدف و همچنین فاصله

در حالتی که ارگان چ چشمه و هدف یک سان می باشد (خود جذب ارگانها)، بیشترین مقدار اختلاف نسبی میان داده های کسر جذب و ویژه الکترونها در این مطالعه و داده های مطالعات قبلی مربوط به انرژی مؤثر ۱۲۸ keV و خود جذب در بافت کبد (۸/۶٪) می باشد. حداکثر اختلاف نسبی مشاهده شده کسر جذب و ویژه ذرات بتای لوتشیوم-۱۷۷، مربوط به ارگانهای مختلف در این مطالعه، نسبت به مطالعات قبلی مربوط به انرژی مؤثر ۸۳ keV و ارگان کبد به عنوان چشمه و ارگان هدف طحال (۲۶/۲٪) می باشد. پس از محاسبه کسرهای جذب و ویژه مربوط به ارگانهای مختلف (الکترونها و فوتونها)، با استفاده از رابطه ۴، مقادیر ضریب S محاسبه و با مقادیر سایر مراجع [۱۱،۱۰] مقایسه گردید (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه ضریب S ارگانهای مختلف با استفاده از شبیه سازی

#### GATE و OpenDose ICRP89 (mGy/MBq.S)

چشمه	هدف	GATE	درصد اختلاف درصد اختلاف نسبی با ICRP89	OpenDose
کبد	کبد	$1/44 \times 10^{-5}$	۵/۱	۲/۷
کبد	کلیه	$8/20 \times 10^{-8}$	۱/۱	۳/۹
کبد	طحال	$2/87 \times 10^{-8}$	۱۳	۸/۲
کلیه	کبد	$7/24 \times 10^{-8}$	۵	۲/۲۰
کلیه	کلیه	$7/84 \times 10^{-5}$	۵/۱	۳/۹
کلیه	طحال	$2/04 \times 10^{-7}$	۹/۲	۱/۳
طحال	کبد	$2/14 \times 10^{-8}$	۳/۹	۷/۱
طحال	کلیه	$1/72 \times 10^{-7}$	۷/۸	۵/۵
طحال	طحال	$1/63 \times 10^{-4}$	۱/۸	۳/۲۱

در پایان مقادیر دز هر ارگان ناشی از خود جذب و دز سایر ارگانها به ازای ۱ MBq با استفاده از نتایج کد GATE و فانتوم زوبال، محاسبه و در شکل ۱۰ ارائه گردیده است. بدین ترتیب که به طور مثال مجموع دز ناشی از چشمه کبد و چشمه

داده‌های به‌دست آمده در این مطالعه می‌توان برای تخمین دزیمتری بافت‌های مختلف برای بهینه‌سازی تزریق لوتسیم-۱۷۷ برای درمان و تشخیص همزمان استفاده نمود.

لذا با توجه به اختلاف قابل قبول در اندازه‌گیری داده‌های دزیمتری بین فانتوم زوبال و فانتوم‌های ارائه شده در مطالعات قبلی (فانتوم‌های ICRP89 و ICRP110M) می‌توان از فانتوم زوبال به دلیل دسترسی آسان و رایگان بودن آن به‌عنوان تحقیقات دزیمتری داخلی در موارد مشابه استفاده نمود.

ارگان‌های چشمه و هدف از یکدیگر بستگی دارد. در این مطالعه که بر روی یک فانتوم شبیه‌سازی شده انسان انجام شد، بیشترین اختلاف کسر جذبی ویژه با مطالعات قبلی مربوط به انرژی ۷۱ کیلو ولت فوتون‌ها و اندام چشمه کبد و هدف طحال و برابر با ۴۱٪ بود.

همچنین بیشترین درصد اختلاف نسبی ضریب S نیز مربوط به کلیه به‌عنوان بافت چشمه و طحال به‌عنوان بافت هدف می‌باشد (۹/۲٪) که می‌تواند به دلیل اختلاف جرم این ارگان‌ها و همچنین فاصله متفاوت بین این دو ارگان در فانتوم‌های مختلف باشد. از

## ۵. مراجع

1. I. G. Zubal, C. R. Harrell, E. Q. Smith, Z. Rattner, G. Gindi, P. B. Hoffer. Computerized three-dimensional segmented human anatomy. *Med. Phys.* 21 (1994) 299-302.
2. R. G. Dale, Dose-rate effects in targeted radiotherapy. *Phys. Med. Biol.* 41 (10) (1996) 1871-1884.
3. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Brogna, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytracsek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J.J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartal. Geant4-a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 506 (2003) 250-303.
4. S. Jan, G. Santin, D. Strul, S. Staelens, K. Assie, D. Autret, S. Avner, R. Barbier, M. Bardies, P. M. Bloomfield, D. Brasse, V. Breton, P. Bruyndonckx, I. Buvat, A. F. Chatzioannou, Y. Choi, Y. H. Chung, C. Comtat, D. Donnarieix, L. Ferrer, S. J. Glick, C. J. Groiselle, D. Guez, P.-F. Honore, S. Kerhoas-Cavata, A. S. Kirov, V. Kohli, M. Koole, M. Krieguer, D. J. van der Laan, F. Lamare, G. Langeron, C. Lartizien, D. Lazaro, M. C. Maas, L. Maigne, F. Mayet, F. Melot, C. Merheb, E. Pennacchio, J. Perez, U. Pietrzyk, F. R. Rannou, M. Rey, D. R. Schaart, C. R. Schmidlein, L. Simon, T. Y. Song, J.-M. Vieira, D. Visvikis, R. Van de Walle, E. Wieers, C. Morel. GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT *Phys. Med. Biol.* 49 (2004) 4543-4561.
5. D. Visvikis, M. Bardies, S. Chiavassa, C. Danford, A. Kirov, F. Lamare, L. Maigne, S. Staelens, R. Taschereau. Use of the GATE Monte Carlo package for dosimetry applications. *Nucl. Instrum. Methods A.* 569 (2006) 335-340.
6. K. Assié, I. Gardin, P. Véra, I. Buvat. Validation of the Monte Carlo simulator GATE for indium-111 imaging. *Phys. Med. Biol.* 50 (2005) 3113-3125.



7. C. O. Thiam, V. Breton, D. Donnarieix, B. Habib, L. Maigne, Validation of a dose deposited by low-energy photons using GATE/GEANT4. *Phys. Med. Biol.* 53 (2008) 3039-3055.
8. R. Loevinger, T. F. Budinger, E. E. Watson. *MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations*. Society of Nuclear Medicine, New York, 1988.
9. W. E. Bolch, K. F. Eckerman, G. Sgouros, Thomas SR. *MIRD pamphlet No 21: A generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry— standardization of nomenclature*. *J. Nucl. Med.* 50 (2009) 477-484.
10. ICRP 89 Adult Male <https://www.doseinfo-radar.com/RADARphan.html>.
11. M. Chauvin, D. Borys, F. Botta, P. Bzowski, J. Dabin, A. M Denis-Bacelar, A. Desbrée, N. Falzone, B. Q. Lee, A. Mairani, Alessandra Malaroda, G. Mathieu, E. McKay, E. Mora-Ramirez, A. P. Robinson, D. Sarrut, L. Struelens, A. Vergara Gil, M. Bardiès. *OpenDose: Open-Access Resource for Nuclear Medicine Dosimetry*. *J. Nucl. Med.* 61 (10) (2020) 1514-1519.
12. G. Santin, D. Strul, D. Lazaro, L. Simon, M. Krieguer, M. Vieira, V. Breton, C. Morel. *GATE: a Geant4-based simulation platform for PET, SPECT integrating movement and time management* *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 50 (2003) 1516-1521.