

ارزیابی و محاسبات دز جذبی رادیوداروی مس ۶۴ به جهت مقاصد پزشکی هسته‌ای

محرم امینی^۱ و حامد صالحی^{۳*}

^۱دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران.

^۲باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

گروه مهندسی هسته‌ای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^{۳*}تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی. کدپستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵

پست الکترونیکی: H.salehi.atc@gmail.com

چکیده

مواد رادیواکتیو مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای یا خود رادیوایزوتوپ‌ها هستند و یا داروهایی که با مواد رادیوایزوتوپ نشان‌دار شده‌اند. داروی رادیواکتیو، در روش‌های تشخیصی مواد رادیواکتیو به بیمار تزریق شده و میزان اشعه تایید شده، از بیمار اندازه‌گیری می‌گردد. اکثر روش‌های تشخیصی به کمک یک دوربین اشعه گاما، توانایی تشکیل تصویر را دارند. در این کار قصد داریم میزان دز جذبی را به وسیله کد MCNP برای ارزیابی دزیمتری زمانی که رادیوداروی مس ۶۴ برای تصویربرداری یا درمان در سینه، مغز و قلب به کار می‌رود، بررسی کنیم.

کلید واژگان: دزیمتری، رادیوداروی مس ۶۴، توزیع بیولوژیکی، واپاشی بتا مثبت، تصویربرداری در پزشکی هسته‌ای، کد MCNP.

۱. مقدمه

مس ۶۴ با یک واپاشی به وسیله پوزیترون یا جابه‌جایی‌های گیراندازی الکترون به نیکل ۶۴ و به وسیله بتای منفی به روی ۶۴ تبدیل می‌شود. این هسته عموماً به عنوان دزیمتر برای تعیین شار نوترون در یک راکتور هسته‌ای مورد استفاده است به علاوه این‌که به عنوان یک رادیوداروی برای عکس‌برداری‌های PET نیز مورد استفاده می‌باشد. در سال‌های اخیر مس ۶۴ در ساختار شیمیایی کلرید (CuCl_2) به عنوان یک عامل بالقوه مفید برای عکس‌برداری‌های PET معرفی شده و در درمان رادیونکلئیدی، به صورت هدف‌گذاری مس در بدن در انواع سلول‌های سرطانی بیش از پیش مطرح شده است.

^۱Biomedical Cyclotron

۱. میزان دز جذبی در استفاده از این رادیودارو در ارگان‌های بدن چه مقدار می‌باشد؟
۲. در روش تصویربرداری PET برای قلب و سینه با استفاده از این رادیو دارو چه مقدار دز در بدن جذب می‌شود؟
۳. در روش درمان سرطان در مغز چه مقدار دز در بدن جذب می‌شود؟

۲. روش و مواد مورد استفاده

به منظور نیل به اهداف در نظر گرفته شده در سه حالت مدل‌سازی‌ها انجام پذیرفت. در حالت نخست، با فرض این‌که چشمه حاوی مس ۶۴ در داخل مغز واقع شده است دز جذب شده در ارگان‌های بدن محاسبه می‌شود. در حالت دوم این چشمه در داخل قلب و در حالت سوم در سینه (برای یک مدل‌سازی ویژه بانوان) فرض شد.

شبهه‌سازیها به وسیله کد مونت‌کارلوی MCNPX 2.4 انجام و برای محیط بدن از فانوم استاندارد ORNL استفاده گردید. از ژل ماگات به عنوان ژل دزیمتر استفاده نموده و با استفاده از مُد الکترون-گاما در برنامه اهمیت تابش‌های الکترون و گامای ثانویه را مورد توجه قرار دادیم. با این فرض که مس (۱) فقط گاما گسیل می‌کند، (۲) تنها بتا گسیل می‌کند و (۳) تنها پوزیترون گسیل می‌کند نتایج برای مقایسه به صورت مجزا ارائه گردید. این فرضیات از آن جهت است که در حالت گیراندازی گامای نخستین مورد توجه است و با این فرض حالت (۱) را شبهه‌سازی می‌کنیم هم‌چنین برای گسیل بتا فرض (۲) و برای گسیل مستقیم پوزیترون فرض (۳) را در نظر گرفته‌ایم.

۳. نتایج

۳.۱. چشمه واقع در مغز

علاوه بر تابش‌های پوزیترون، مس ۶۴ ذرات بتا منفی، الکترون‌های اوژه، الکترون‌های ناشی از تبدیلات داخلی و فوتون‌های گاما را نیز گسیل می‌کند (۱۷,۴ درصد بتا مثبت، ۳۹ درصد بتا منفی، ۴۳,۶ درصد تبدیل داخلی) [۱]. ذرات بتا منفی و الکترون‌های اوژه عمدتاً برای درمان تومورها مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بیش‌ترین انرژی بتا منفی ۰,۵۷۹ مگاالکترون ولت است [۲]. این ذرات دارای یک بازه‌ی بیشینه‌ای در حدود ۲ میلی‌متر در بافت‌ها می‌باشد که بسیار برای تومورهای کوچک مناسب است. الکترون‌های اوژه و تبدیل داخلی‌هایی که در هنگام گیراندازی الکترون و واپاشی مس ۶۴ ساطع می‌شوند دارای انرژی بسیار پایینی (در حدود ۲ کیلوالکترون ولت) می‌باشند و تنها یک بازه زیرسلولی (کم‌تر از ۱ میکرومتر) را پوشش می‌دهند [۳]. این ساختار پرتویی بیش‌تر برای از بین بردن یک سلول یا یک خوشه کوچک سلولی مناسب است. در تئوری، پوزیترون‌های ساطع شده نیز این امکان را دارند که (علاوه بر بتا منفی‌ها) در مواجهه با تومورها مورد استفاده قرار گیرند.

بسیاری از لیگاندهای مس برای تصویربرداری از تومورها و درمان آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کمپلکسی از مس در پزشکی هسته‌ای نوین نیز به کار رفته است که برای تصویربرداری از خون‌رسانی بافت عضلانی قلب و مغز مورد استفاده قرار می‌گیرد. نکته جالب آن که کمپلکس خنثی مس دوظرفیتی، پس از رسیدن به تومورهای در حال رشد (که اکثراً کم اکسیژن هستند) به یون مس یک ظرفیتی احیا می‌شود. در نتیجه بار کلی کمپلکس منفی شده و در فضای چربی‌دوست سلول سرطانی به دام می‌افتد و می‌تواند وظیفه تشخیص و یا درمانی خود را به انجام برساند [۴].

با این توضیحات در صورت استفاده از مس در طی یک درمان پزشکی، برخی از سوالاتی که باید به پاسخ به آن برسیم به این شرح است:

۰,۰۰۵۶	۳,۳۴E-۱۴	قسمت دهلیز راست
۰,۰۰۰۲	۱,۶۸E-۱۳	محتویات دهلیز راست
۰,۰۱۰۱	۱,۱۱E-۰۹	مغز
۶۶,۷۴۵	۲,۳۲E-۱۰	سر
۱۳,۹۵۰۳	۹,۸۰E-۱۱	اسکلت صورت
۵,۸۹۲۸	۸,۸۸E-۱۱	اسکلت جمجمه
۵,۳۳۹۶	۲,۳۶E-۱۱	ستون فقرات
۱,۴۱۹۱	۲,۶۹E-۱۱	صورت
۱,۶۱۷۵	۲,۵۸E-۱۲	استخوان بازوان
۱۰۰	۱,۶۶E-۰۹	مجموع

همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از مغز با مقدار $1.11E-09$ MeV/g ، سر با میزان $2.32E-10$ و اسکلت صورت با $9.80E-11$ بیشترین دز را جذب می‌کنند. این داده‌ها به صورت برداری در شکل ۱ در مقایسه با دو گسیل دیگر نشان داده شده‌اند.

هم‌چنین برای همین حالت با فرض گسیل فقط بتا جدول (۲) را خواهیم داشت. یادآوری مجدد این نکته که بایستی مد ورودی ها e ، p باشد، ضروریست زیرا در غیر این صورت تابش‌های ثانویه‌ی ناشی از برهم‌کنش‌های اتمی را نادیده انگاشته‌ایم.

جدول (۲): دز جذبی حاصل از بتا در مُد فوتون - الکترون برحسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یون‌ساز در مغز می‌باشد.

ارگان مورد بررسی	میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد
کبد	۶,۱۱E-۲۸	۰
پوست	۶,۰۶E-۱۴	۰,۰۰۱
کلیه چپ	۰	۰
کلیه راست	۰	۰
رحم	۰	۰
تخمندان	۰	۰
اندام مثانه	۰	۰

جدول (۱) میزان دز جذبی ناشی از گاما در اندام‌های گوناگون بدن را در زمانی که چشمه در مغز واقع شده نشان می‌دهد. بیش‌ترین دز دریافتی (به غیر از خود مغز) برای بینی و سر می‌باشد و دز سایر اندام عمدتاً از مرتبه پایینی است و این نشان‌دهنده آن است که علیرغم تولید گاماهاى ثانویه به وسیله مس ۶۴ این پرتوها برای اندام‌های بدن تأثیر پایینی داشته و با در نظر داشتن انرژی گاما ، اصلی‌ترین تأثیر در خود ارگان هدف می‌باشد.

جدول (۱): دز جذبی حاصل از گاما در مُد فوتون - الکترون برحسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یون‌ساز در مغز می‌باشد.

ارگان مورد بررسی	میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان برحسب درصد
کبد	۱,۰۱E-۱۲	۰,۰۶۰۷
پوست	۲,۶۹E-۱۱	۱,۶۱۷۵
کلیه چپ	۲,۹۷E-۱۴	۰,۰۰۱۸
کلیه راست	۴,۵۹E-۱۴	۰,۰۰۲۸
رحم	۱,۹۶E-۱۵	۰,۰۰۰۱
تخمندان	۱,۸۱E-۱۶	۰
اندام مثانه	۹,۶۰E-۱۶	۰
محتویات مثانه	۳,۱۱E-۱۵	۰,۰۰۰۱
ریه سمت راست	۱,۰۲E-۱۲	۰,۰۰۰۲
ریه سمت چپ	۸,۶۴E-۱۳	۰,۰۶۱۳
تیروئید	۱,۷۴E-۱۳	۰,۰۰۵۲
روده کوچک	۸,۸۰E-۱۴	۰,۰۱۰۵
بدن	۴,۹۷E-۱۱	۰,۰۰۵۳
لوزالمعده	۳,۰۹E-۱۴	۲,۹۸۸۵
مری + قفسه سینه + امعاء و احشا	۱,۲۱E-۱۳	۰,۰۰۱۹
پستان‌ها	۷,۷۵E-۱۳	۰,۰۰۷۳
قسمت دهلیز چپ	۱,۰۶E-۱۳	۰,۰۴۶۶
محتویات دهلیز چپ	۹,۲۹E-۱۴	۰,۰۰۶۴

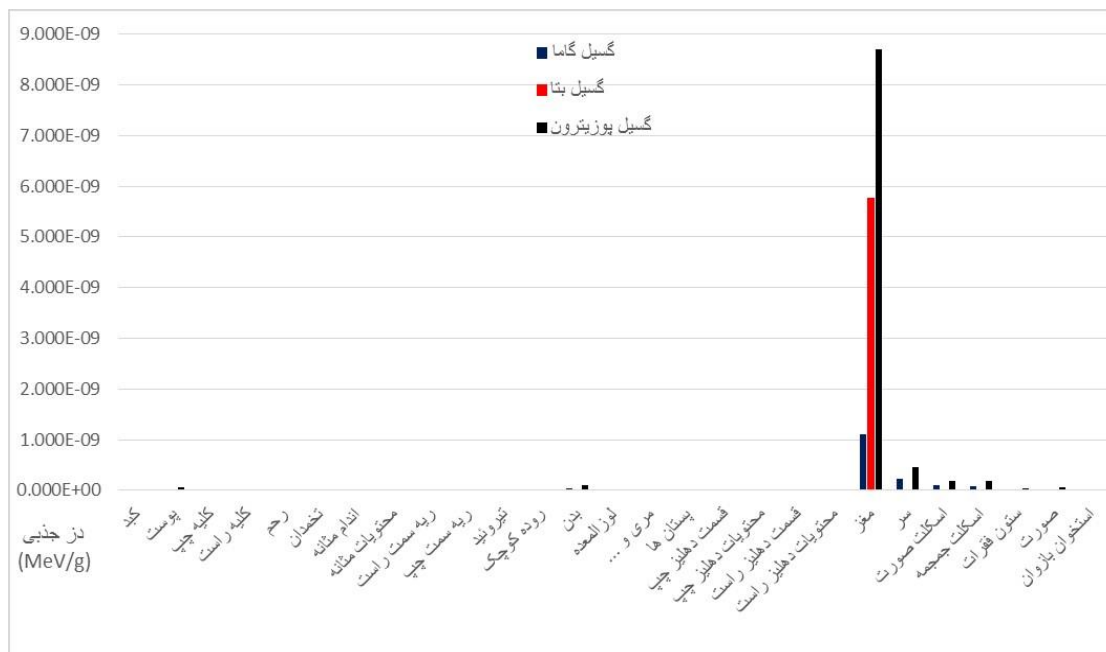
۰,۵۳۵۴	۵,۲۴E-۱۱	پوست	۰	۰	محتویات مثانه
۰,۰۰۰۷	۷,۱۲E-۱۴	کلیه چپ	۰	۵,۱۷E-۱۶	ریه سمت راست
۰,۰۰۰۷	۶,۴۶E-۱۴	کلیه راست	۰	۲,۶۲E-۱۶	ریه سمت چپ
۰,۰۰۰۱	۸,۷۲E-۱۵	رحم	۰	۵,۹۹E-۲۷	تیروئید
۰	۲,۱۴E-۱۵	تخمندان	۰	۰	روده کوچک
۰	۱,۹۳E-۱۵	اندام مثانه	۰,۰۰۱	۵,۹۳E-۱۴	بدن
۰,۰۰۰۱	۱,۲۰E-۱۴	محتویات مثانه	۰	۰	لوزالمعده
۰,۰۱۸۲	۱,۷۸E-۱۲	ریه سمت راست	۰	۱,۶۷E-۱۶	مری + قفسه سینه +
۰,۰۱۸۲	۱,۷۸E-۱۲	ریه سمت چپ	۰	۰	امعاء و احشا
۰,۰۰۳۹	۳,۸۱E-۱۳	تیروئید	۰	۶,۸۷E-۱۶	پستان ها
۰,۰۰۱۷	۱,۶۸E-۱۳	روده کوچک	۰	۵,۳۸E-۲۷	قسمت دهلیز چپ
۰,۹۹۴۱	۹,۷۳E-۱۱	بدن	۰	۲,۱۸E-۱۶	محتویات دهلیز چپ
۰,۰۰۰۵	۵,۰۳E-۱۴	لوزالمعده	۰	۱,۹۶E-۱۷	قسمت دهلیز راست
۰,۰۰۲۱	۲,۰۶E-۱۳	مری + قفسه سینه +	۰	۱,۳۵E-۱۶	محتویات دهلیز راست
۰,۰۱۴۹	۱,۴۶E-۱۲	امعاء و احشا	۹۹,۹۶۶۱	۵,۷۸E-۰۹	مغز
۰,۰۱۴۹	۱,۴۶E-۱۲	پستان ها	۰,۰۰۸۹	۵,۱۷E-۱۳	سر
۰,۰۰۱۶	۱,۵۴E-۱۳	قسمت دهلیز چپ	۰,۰۱۰۳	۵,۹۴E-۱۳	اسکلت صورت
۰,۰۰۲۱	۲,۰۸E-۱۳	محتویات دهلیز چپ	۰,۰۱	۵,۷۹E-۱۳	اسکلت جمجمه
۰,۰۰۰۷	۷,۲۱E-۱۴	قسمت دهلیز راست	۰,۰۰۱۵	۸,۶۸E-۱۴	ستون فقرات
۰,۰۰۰۳	۲,۹۷E-۱۳	محتویات دهلیز راست	۰,۰۰۰۱	۶,۰۶E-۱۴	صورت
۸۸,۸۸۹۶	۸,۷۰E-۰۹	مغز	۰,۰۰۰۱	۳,۰۵E-۱۵	استخوان بازوان
۴,۶۷۹۵	۴,۵۸E-۱۰	سر	۱۰۰	۵,۷۸E-۰۹	مجموع
۱,۹۵۱۵	۱,۹۱E-۱۰	اسکلت صورت			
۱,۷۹۸۲	۱,۷۶E-۱۰	اسکلت جمجمه			
۰,۴۸۱۲	۴,۷۱E-۱۱	ستون فقرات			
۰,۵۳۵۴	۵,۲۴E-۱۱	صورت			
۰,۰۴۷۸	۴,۶۸E-۱۲	استخوان بازوان			
۱۰۰	۹,۷۹E-۰۹	مجموع			

در صورتی که فرض به گسیل پوزیترون داشته باشیم داده‌های جدول (۳) را خواهیم داشت. این داده‌ها نیز به صورت برداری در شکل ۱ قابل مشاهده هستند.

جدول (۳) دز جذبی حاصل از پوزیترون در مُد فوتون - الکترون بر حسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یون‌ساز در مغز می‌باشد.

ارگان مورد بررسی	میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد
کبد	۱,۸۳E-۱۲	۰,۰۱۸۷

به وضوح مشخص است که برای هر سه حالت بیشترین دز جذبی در خود ناحیه‌ی مغز بوده و آسیب ناچیزی به بافت های سالم در سایر قسمت های بدن خواهد رسید.



شکل ۱: نمودار دز جذبی اعضای بدن ناشی از گاما، بتا و پوزیترون در زمانی که چشمه در مغز واقع شده است.

۳،۲. چشمه واقع در قلب

مطابق بخش قبل به مدل سازی حالتی می پردازیم که چشمه درون قلب واقع شده باشد. در حالتی که مس ۶۴ به گسیل گاما بپردازد، دز جذبی اعضای بدن مطابق جدول (۴) می باشد.

جدول (۴) دز جذبی حاصل از گاما در مُد فوتون - الکترون بر حسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یون ساز در قلب می باشد.

ارگان مورد بررسی	میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد
کبد	۸،۷۱E-۱۱	۴،۲۵۸۵
پوست	۲،۴۲E-۱۱	۱،۱۸۳۲
کلیه چپ	۳،۲۲E-۱۲	۰،۱۵۷۴
کلیه راست	۳،۳۳E-۱۲	۰،۱۶۲۸
رحم	۲،۶E-۱۳	۰،۰۱۲۷
تخمندان	۴،۷۲E-۱۴	۰،۰۰۲۳
اندام مثانه	۵،۱۶E-۱۴	۰،۰۰۲۵
محتویات مثانه	۲،۶E-۱۳	۰،۰۱۲۷
ریه سمت راست	۵،۲۶E-۱۱	۲،۵۷۱۷
ریه سمت چپ	۳،۷۹E-۱۱	۱،۸۵۳

۰،۰۰۹۲	۱،۸۸E-۱۳	تیروئید
۰،۳۵۰۱	۷،۱۶E-۱۲	روده کوچک
۵۳،۲۹۲۳	۱،۰۹E-۰۹	بدن
۰،۲۳۹۱	۴،۸۹E-۱۲	لوزالمعده
۰،۷۲۸۵	۱،۴۹E-۱۱	مری + قفسه سینه + امعاء و احشا
۰،۹۳۸۷	۱،۹۲E-۱۱	پستان ها
۵،۰۳۵۹	۱،۰۳E-۱۰	قسمت دهلیز چپ
۱۷،۳۵۶۷	۳،۵۵E-۱۰	محتویات دهلیز چپ
۰،۵۳۷۸	۱،۱E-۱۱	قسمت دهلیز راست
۲،۹۴۸۲	۶،۰۳E-۱۱	محتویات دهلیز راست
۰،۰۹۹۳	۲،۰۳E-۱۲	مغز
۰،۶۹۴۳	۱،۴۲E-۱۱	سر
۰،۰۵۱۸	۱،۰۶E-۱۲	اسکلت صورت
۰،۰۴۰۵	۸،۲۸E-۱۳	اسکلت جمجمه
۵،۱۸۲۶	۱،۰۶E-۱۰	ستون فقرات
۱،۱۸۳۲	۲،۴۲E-۱۱	صورت
۱،۰۹۵۲	۲،۲۴E-۱۱	استخوان بازوان
۱۰۰	۲،۰۵E-۰۹	مجموع

۰,۰۰۰۱	۳,۱۸E-۱۵	اسکلت جمجمه
۰,۰۰۹۳	۵,۳۹E-۱۳	ستون فقرات
۰,۰۰۰۸	۴,۴۵E-۱۴	صورت
۰,۰۰۱۴	۸,۲۹E-۱۴	استخوان بازوان
۱۰۰	۵,۷۸E-۰۹	مجموع

در ادامه برای حالتی که چشمه پوزیترون ساطع کند خواهیم داشت:

جدول (۶) دز جذبی حاصل از پوزیترون در مُد فوتون - الکترون بر حسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یونساز در قلب می باشد.

میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد	ارگان مورد بررسی
۱,۷۳E-۱۰	۱,۶۴۳۸	کبد
۴,۷۲E-۱۱	۰,۴۴۸۵	پوست
۶,۴۵E-۱۲	۰,۰۶۱۳	کلیه چپ
۶,۴E-۱۲	۰,۰۶۰۸	کلیه راست
۵,۳۱E-۱۳	۰,۰۰۵	رحم
۸,۶۱E-۱۴	۰,۰۰۰۸	تخمدان
۱,۰۲E-۱۳	۰,۰۰۱	اندام مثانه
۵,۱۹E-۱۳	۰,۰۰۴۹	محتویات مثانه
۱,۰۳E-۱۰	۰,۹۷۸۷	ریه سمت راست
۷,۵۱E-۱۱	۰,۷۱۳۶	ریه سمت چپ
۲,۴۲E-۱۳	۰,۰۰۲۳	تیروئید
۱,۳۳E-۱۱	۰,۱۲۶۴	روده کوچک
۲,۱۳E-۰۹	۲۰,۲۳۸۶	بدن
۹,۵۷E-۱۲	۰,۰۹۰۹	لوزالمعده
۳,۰۱E-۱۱	۰,۲۸۶	مری + قفسه سینه + امعاء و احشا
۳,۸۵E-۱۱	۰,۳۶۵۸	پستان ها
۲,۰۴E-۱۰	۱,۹۳۸۳	قسمت دهلیز چپ
۷,۲۱E-۰۹	۶۸,۵۰۷۱	محتویات دهلیز چپ
۲,۱۸E-۱۱	۰,۲۰۷۱	قسمت دهلیز راست
۱,۲۰E-۱۰	۱,۱۴۰۳	محتویات دهلیز راست

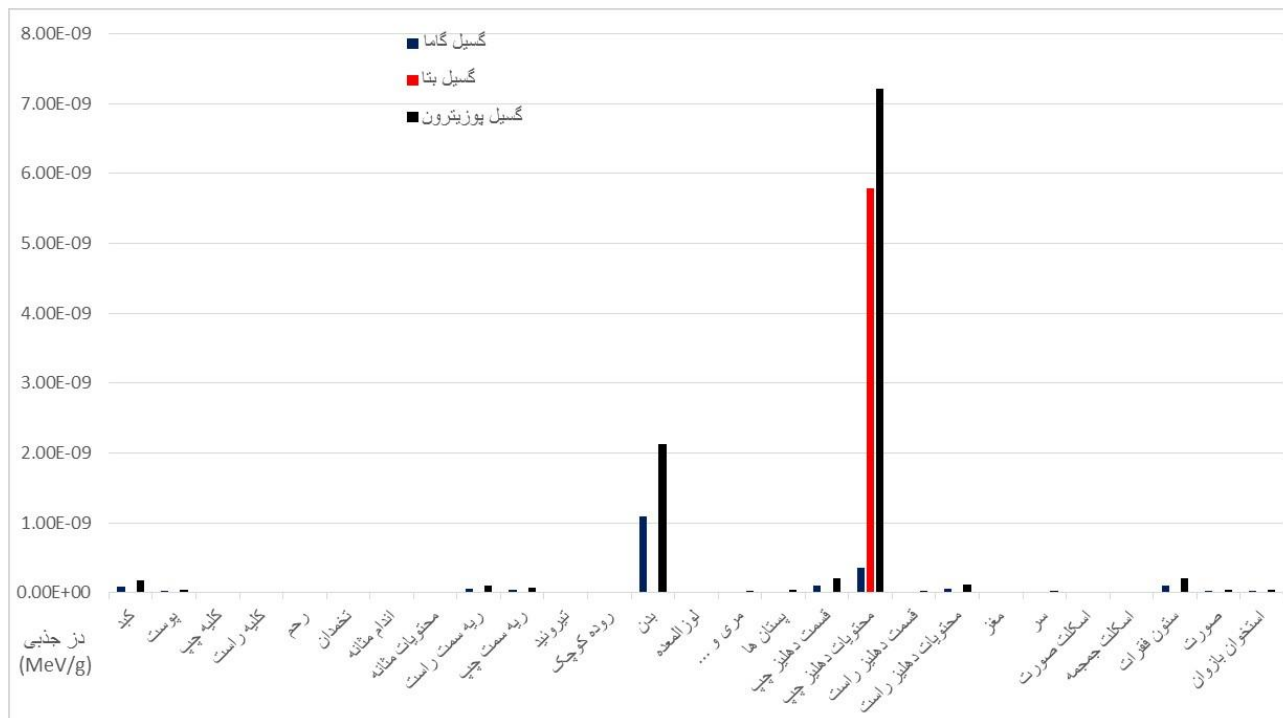
این مقادیر به صورت نموداری در شکل ۲ نشان داده شده است.

همچنین برای تابش بتا در این حالت جدول (۵) نتایج را ارائه می نماید.

جدول (۵) دز جذبی حاصل از بتا در مُد فوتون - الکترون بر حسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یونساز در قلب می باشد.

میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد	ارگان مورد بررسی
۲,۲۹E-۱۳	۰,۰۰۴	کبد
۴,۴۵E-۱۴	۰,۰۰۰۸	پوست
۲,۸۶E-۱۵	۰	کلیه چپ
۷,۷۳E-۱۵	۰,۰۰۰۱	کلیه راست
۹,۹۶E-۱۸	۰	رحم
۴,۱۸E-۱۶	۰	تخمدان
۰	۰	اندام مثانه
۰	۰	محتویات مثانه
۱,۵۴E-۱۳	۰,۰۰۲۷	ریه سمت راست
۱,۱۳E-۱۳	۰,۰۰۲	ریه سمت چپ
۸,۸۱E-۱۷	۰	تیروئید
۸,۳۴E-۱۵	۰,۰۰۰۱	روده کوچک
۳,۰۹E-۱۲	۰,۰۵۳۴	بدن
۱,۴۷E-۱۴	۰,۰۰۰۳	لوزالمعده
۵,۸۲E-۱۴	۰,۰۰۱	مری + قفسه سینه + امعاء و احشا
۳,۸۸E-۱۴	۰,۰۰۰۷	پستان ها
۴,۸۷E-۱۳	۰,۰۰۸۴	قسمت دهلیز چپ
۵,۷۸E-۰۹	۹۹,۹۰۹۷	محتویات دهلیز چپ
۴,۴۵E-۱۴	۰,۰۰۰۸	قسمت دهلیز راست
۲,۳۷E-۱۳	۰,۰۰۴۱	محتویات دهلیز راست
۲,۴۵E-۱۵	۰	مغز
۱,۹۲E-۱۴	۰,۰۰۰۳	سر
۲,۷۳E-۱۵	۰	اسکلت صورت

۰,۴۴۸۵	۴,۷۲E-۱۱	صورت	۰,۰۳۴	۳,۵۸E-۱۲	مغز
۰,۴۱۳۳	۴,۳۵E-۱۱	استخوان بازوان	۰,۲۶۴۱	۲,۷۸E-۱۱	سر
۱۰۰	۱,۰۵E-۰۸	مجموع	۰,۰۱۸	۱,۸۹E-۱۲	اسکلت صورت
همچنین در شکل ۲ نیز به صورت نموداری قابل مشاهده می باشند.			۰,۰۱۵	۱,۵۸E-۱۲	اسکلت جمجمه
			۱,۹۸۵۹	۲,۰۹E-۱۰	ستون فقرات



شکل ۲: نمودار دز جذبی اعضای بدن ناشی از گاما، بتا و پوزیترون هنگامی که چشمه در قلب واقع شده است.

۳,۳. چشمه واقع در سینه

برای حالت سوم، هنگامی که یک چشمه رادیودارو حاوی مس ۶۴ در یکی از پستانها واقع شده باشد، دز جذبی ناشی از گسیل فوتون آن مطابق جدول (۷) خواهد بود.

جدول (۷) دز جذبی حاصل از گاما در مُد فوتون - الکترون بر حسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یون ساز در سینه می باشد.

ارگان مورد بررسی	میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد
کبد	۱,۶۱E-۱۱	۱,۲۱۳۳
پوست	۴,۲۶E-۱۱	۳,۲۱۰۴
کلیه چپ	۱,۴۴E-۱۲	۰,۱۰۸۵
کلیه راست	۷,۴۲E-۱۳	۰,۰۵۵۹
رحم	۱,۵E-۱۳	۰,۰۱۱۳

۰,۰۰۱۳	۱,۷۲E-۱۴	تخمدان
۰,۰۰۱۹	۲,۵۸E-۱۴	اندام مثانه
۰,۰۱۱۵	۱,۵۳E-۱۳	محتویات مثانه
۰,۳۸۸۱	۵,۱۵E-۱۲	ریه سمت راست
۲,۵۴۷۲	۳,۳۸E-۱۱	ریه سمت چپ
۰,۰۰۸۴	۱,۱۲E-۱۳	تیروئید
۰,۲۳۸۹	۳,۱۷E-۱۲	روده کوچک
۴۳,۵۵۸۹	۵,۷۸E-۱۰	بدن
۰,۱۳۱۹	۱,۷۵E-۱۲	لوزالمعده
۰,۰۸۶۷	۱,۱۵E-۱۲	مری + قفسه سینه + امعاء و احشا
۴۰,۵۴۴۴	۵,۳۸E-۱۰	پستانها
۰,۱۸۷۶	۲,۴۹E-۱۲	قسمت دهلیز چپ
۰,۲۶۹	۳,۵۷E-۱۲	محتویات دهلیز چپ

		امعاء و احشا	۰,۰۶۸۱	۹,۰۳E-۱۳	قسمت دهلیز راست
۹۹,۹۶۶۱	۰,۳۰۱۴	پستان ها	۴E-۱۲	۲,۴۲E-۱۲	محتویات دهلیز راست
۰,۰۰۰۱	۰,۱۸۲۴	قسمت دهلیز چپ	۰,۸۸۹۳	۱,۱۸E-۱۱	مغز
۰,۰۰۰۱	۰,۰۹۲۷	محتویات دهلیز چپ	۰,۰۷۲۸	۱,۲۳E-۱۲	سر
۰	۱,۲E-۱۵	قسمت دهلیز راست	۱,۲۰۵۸	۹,۶۶E-۱۳	اسکلت صورت
۰,۰۰۰۲	۸,۷۵E-۱۵	محتویات دهلیز راست	۴,۲۶E-۱۱	۱,۶E-۱۱	اسکلت جمجمه
۰	۲,۳E-۱۶	مغز	۳,۲۱۰۴	۱,۴E-۱۱	ستون فقرات
۰,۰۰۰۳	۱,۶۱E-۱۴	سر	۱,۴۰۱۷	۱,۸۶E-۱۱	صورت
۰	۲,۶E-۱۵	اسکلت صورت	۱۰۰	۱,۳۳E-۰۹	استخوان بازوان
۰	۳,۷۸E-۱۶	اسکلت جمجمه			مجموع
۰,۰۰۰۸	۴,۵۱E-۱۴	ستون فقرات			
۰,۰۰۲۳	۱,۳۲E-۱۳	صورت			
۰,۰۰۰۹	۵,۰۳E-۱۴	استخوان بازوان			
۱۰۰	۵,۷۸E-۰۹	مجموع			

و به صورت نموداری در شکل ۳ نشان داده شده است. هم چنین برای حالتی که چشمه تنها بتا گسیل نماید خواهیم داشت:

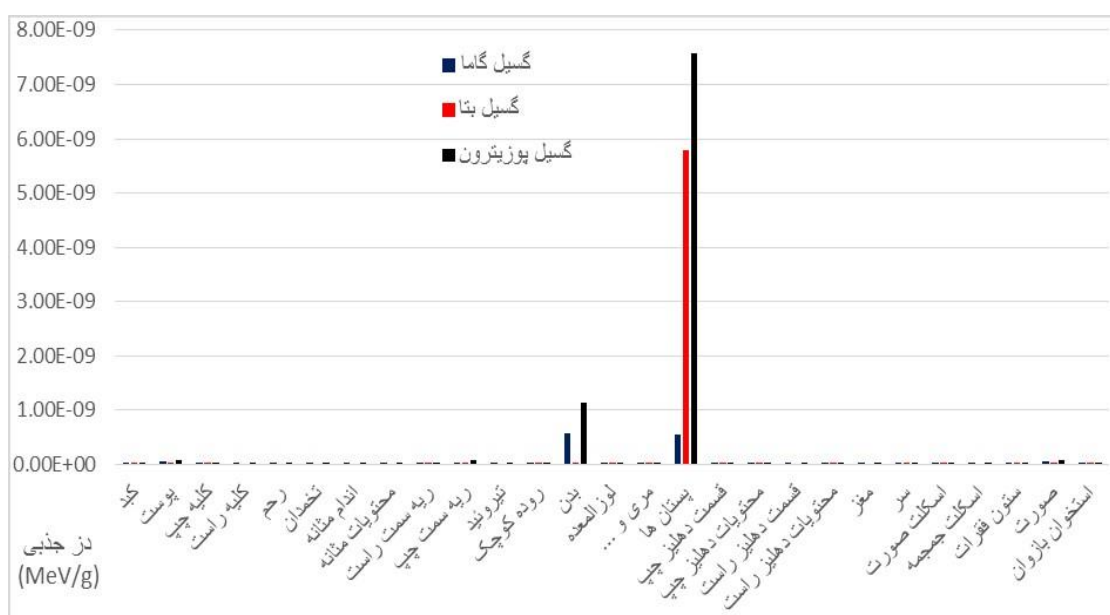
جدول (۸) دز جذبی حاصل از بتا در مُد فوتون - الکترون برحسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یون ساز در سینه می باشد.

جدول (۹) برای حالتی که چشمه پوزیترون گسیل می کند. جدول (۹) دز جذبی حاصل از پوزیترون در مُد فوتون - الکترون برحسب (MEV/G) هنگامی که چشمه یون ساز در سینه می باشد.

ارگان مورد بررسی	میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد
------------------	-------------------------------------	-------------------

ارگان مورد بررسی	میزان دز جذبی ناشی از فوتون الکترون	میزان بر حسب درصد
کبد	۲,۶۳E-۱۴	۰,۰۰۰۵
پوست	۱,۳۲E-۱۳	۰,۰۰۲۳
کلیه چپ	۲,۴۷E-۱۵	۰
کلیه راست	۱,۳۹E-۱۵	۰
رحم	۲,۴۳E-۱۶	۰
تخمندان	۲,۶۳E-۲۷	۰
اندام مثانه	۰	۰
محتویات مثانه	۰	۰
ریه سمت راست	۱,۰۴E-۱۴	۰,۰۰۰۲
ریه سمت چپ	۸,۵۱E-۱۴	۰,۰۰۱۵
تیروئید	۲,۱۱E-۲۷	۰
روده کوچک	۴,۴۹E-۱۵	۰,۰۰۰۱
بدن	۱,۴۲E-۱۲	۰,۰۲۴۶
لوزالمعده	۵,۲E-۱۵	۰,۰۰۰۱
مری + قفسه سینه +	۳,۲۶E-۱۵	۰,۰۰۰۱

۰,۰۲۷۹	۲,۰۵E-۱۲	اسکلت صورت	۰,۰۲۴۱	۲,۰۲E-۱۲	مری + قفسه سینه + امعاء و احشا
۰,۰۱۹۵	۱,۷۸E-۱۲	اسکلت جمجمه	۸۲,۹۵۱	۷,۵۷E-۰۹	پستان ها
۰,۳۵۳۹	۳,۲۳E-۱۱	ستون فقرات	۰,۰۵۱۹	۴,۷۴E-۱۲	قسمت دهلیز چپ
۰,۹۱۸۳	۸,۳۸E-۱۱	صورت	۰,۰۷۴۶	۶,۸۱E-۱۲	محتویات دهلیز چپ
۰,۳۹۸۹	۳,۶۴E-۱۱	استخوان بازوان	۰,۰۱۸۶	۱,۷E-۱۲	قسمت دهلیز راست
۱۰۰	۹,۱۳E-۰۹	مجموع	۰,۰۸۸۸	۸,۱E-۱۲	محتویات دهلیز راست
		این نتایج در مقایسه با نتایج قبل به صورت نموداری در شکل ۳ قابل مشاهده می باشد.	۰,۰۵۰۷	۴,۶۳E-۱۲	مغز
			۰,۲۵۲	۲,۳E-۱۱	سر



شکل ۳: نمودار دز جذبی اعضای بدن ناشی از گاما، بتا و پوزیترون در زمانی که چشمه در یکی از پستان ها واقع شده است.

۴. نتیجه گیری

بنابراین همان طور که در جدول (۳)، جدول (۶) و جدول (۹) مشاهده می کنید بالغ بر ۸۲ درصد از دز در همان ارگان هدف جذب و باقی مقادیر (اندک) در ارگان های مجاور جذب می شود و دز جذب شده توسط ارگان های دورتر تقریباً صفر است. با این حال این نباید از اهمیت اندازه گیری دز ارگان های حیاتی تا حدودی دورتر بکاهد و اندازه گیری آن دز ضروری به نظر می رسد.

در استفاده از مس ۶۴ برای قرارگیری درون مغز، حدود 9.79E-09 MeV/g دز تحمیلی ناشی از پوزیترون جذب

با توجه به این که مس ۶۴ دارای نیمه عمر ۱۲,۷۰۱ ساعت می باشد، از رادیوداروها محسوب می شود که نیمه عمری مناسب برای پرتودرمانی دارد. این رادیودارو با احتمال ۶۱,۵ درصد گسیل پوزیترون و گیراندازی دارد و در ۳۸,۵ درصد با بتا منفی به روی ۶۴ تبدیل می شود. گامای ساطع شده از این رادیو ایزوتوپ دارای انرژی 1345.77 KeV ناشی از انرژی جابه جایی است [۴].

با توجه به این که پوزیترون گسیل شده از مس ۶۴ در زمره پوزیترون های کوتاه برد تقسیم بندی می شود (<1mm) [۳]

را نشان می‌دهد.

در حالتی که چشمه درون قلب باشد، بیش‌ترین دز مجموع مجدداً از آن پوزیترون‌های گسیل شده با $1.05E-08 \text{ MeV/g}$ است که تقریباً دو برابر بناها با $5.78E-09 \text{ MeV/g}$ و ۵ برابر گاماها با دز $2.04E-09 \text{ MeV/g}$ است. این رویه برای حالت چشمه در سینه نیز مفروض است.

می‌شود که از $5.780E-09 \text{ MeV/g}$ بتا و $1.66E-09 \text{ MeV/g}$ گاما بیش‌تر است و با توجه به درصد واپاشی پوزیترون‌زایی (۶۱٫۵ درصد) عدد مورد توجه دز می‌باشد و عمده‌ی آن (حدود ۸۸٫۸ درصد) در خود مغز جذب خواهد شد که برای درمان مطلوب است. هم‌چنین دز جذبی بتا در مغز حدود ۹۹٫۹ درصد است که برد مناسب این ذرات و انرژی اولیه مطلوب آن

۵. مراجع

- [1] JN. Bryan, F. Jia, et al. Monoclonal antibodies for copper-64 PET dosimetry and radioimmunotherapy. *Cancer Biol Ther.* 11 (2011)
- [2] KF. Eckerman, A. Endo. *MIRD: Radionuclide data and decay schemes.* Second ed. VA: Society of Nuclear Medicine. (2008)
- [3] RW. Howell. *Radiation spectra for Auger-*

electron emitting radionuclides: report No. 2 of AAPM Nuclear Medicine Task Group No. 6. *Med Phys.* (1992)

- [4] Z. Cai, CJ. Anderson. Chelators for copper radionuclides in positron emission tomography radiopharmaceuticals. *J Labeled Comp Radiopharm.* (2014)