

برآورد دز مؤثر در تابش‌گیری‌های ناشی از حوادث رادیوگرافی صنعتی

کیهان‌دخت کریمی شهری^{۱*} و محمد الله شیرزاد^۲

^۱ دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ مرکز علم و تکنولوژی، بدخشان، افغانستان.

* خراسان جنوبی، بیرجند، دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه فیزیک، کد پستی ۹۷۱۷۴۳۴۷۶۵.

پست الکترونیکی: k.karimi@birjand.ac.ir; karimi.keyhandokht@gmail.com

چکیده

برآورد سریع توزیع دز در قربانیان حوادث رادیوگرافی صنعتی، حائز اهمیت است. به این منظور، در اختیار داشتن کتابخانه‌ای از داده‌های دز مؤثر و دز جذبی برای استفاده در شرایط بحرانی، می‌تواند مؤثر واقع شود. در این مطالعه دز مؤثر کل بدن، برای دو چشمه پرکاربرد در رادیوگرافی صنعتی ^{192}Ir و ^{60}Co با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX2/6 و فانتوم وکسل مرد بزرگسال ICRP برآورد شده است. شبیه‌سازی‌ها در ۴ هندسه تابشی قدامی-خلفی، خلفی-قدامی، راست و چپ جانبی و ۵ ارتفاع مختلف چشمه شامل؛ کف زمین، وسط ران پا، انتهای تنه، وسط تنه و بالای تنه در نزدیکی گردن صورت گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که دز مؤثر در تمامی ارتفاع‌ها به جز در کف زمین از فاصله ۱۰۰ cm به بعد مستقل از ارتفاع چشمه و تقریباً یکسان است. بیشترین و کمترین مقدار دز مؤثر، به ترتیب مربوط به هندسه تابشی قدامی-خلفی و راست جانبی است. مقدار دز مؤثر در ارتفاع وسط تنه در هندسه قدامی-خلفی و در فاصله ۰٫۵ cm در مقایسه با ارتفاع وسط ران پا و کف زمین به ترتیب ۵ و ۲۰۰ برابر بیشتر برای هر دو چشمه ^{192}Ir و ^{60}Co است. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده در این مطالعه، دز مؤثر قربانی حادثه ۱۹۹۶ گیلان ۲۰۰ mSv به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، با داده‌های گزارش شده در ICRP ۱۴۵ مقایسه و دلایل اختلاف بررسی شده است.

کلیدواژگان: حوادث رادیوگرافی صنعتی، چشمه‌های رادیوگرافی ^{60}Co و ^{192}Ir ، کد مونت کارلو MCNPX، دز مؤثر.

۱. مقدمه

دزهای تابشی بالا منجر به ایجاد سندروم‌های گوارشی، آسیب‌های عروقی، مغزی و سرطان خون می‌شود [۲]. پس از رخ دادن حادثه، افراد به لحاظ میزان آسیب باید سریعاً طبقه بندی شده تا مداخلات پزشکی ضروری برای هر گروه صورت پذیرد [۳]. از این رو اطلاع از میزان دز رسیده به اعضای بدن و

حوادث رادیوگرافی صنعتی، یکی از پرتکرارترین حوادث گزارش شده در بین گزارشات صنعت هسته‌ای است. بر اساس گزارش لیما، در مجموع ۸۰ حادثه رادیوگرافی، ۱۲۰ پرتوکار و ۱۱۰ فرد عادی دز غیرمعمول دریافت نموده و ۱۲ مورد مرگ از سال ۱۸۹۶ تا ۲۰۱۴ گزارش شده است [۱]. در این حوادث،

استرالیا و انگلستان و کمتر از آمریکا و کانادا و تقریباً برابر با آلمان، چین و برزیل است. این مطالعه با استفاده از اندازه‌گیری توسط TLD صورت گرفت [۸].

در سال ۲۰۱۷ پویا و همکاران دز رسیده به دست را با فیلم رادیوگرافی اندازه‌گیری و با نتایج شبیه‌سازی توسط فانتوم پلی اتیلن مقایسه نمودند [۹]. مطالعه‌ای روی دز جذبی اعضا برای چشمه ^{192}Ir و ^{137}Cs ناشی از حادثه‌ای که در مصر رخ داد، صورت گرفت. در محاسبات از کد [MCNP ۱۰] و در مطالعه‌ای دیگر از کد Resrad-Build استفاده شد [۱۱].

هان و همکاران در سال ۲۰۱۹ دز جذبی اعضا را با استفاده از فانتوم هیبرید MRCP^۱ و کد مونت کارلوی Geant4 و چشمه‌های ^{192}Ir ، ^{137}Cs و ^{60}Co برآورد نمودند. آن‌ها اثر سائز بدن روی داده‌ها را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در ادامه، در سال ۲۰۲۰ داده‌های ارائه شده توسط هان و همکاران به صورت کامل‌تر در بخشی از ICRP ۱۴۵ شامل دز مؤثر و دز جذبی برای اعضای مغز، روده بزرگ، روده کوچک و شش‌ها ارائه شد [۱۳]. در اختیار داشتن کتابخانه کاملی از داده‌های دز مؤثر کل بدن می‌تواند در هنگام حادثه یاری رسان باشد.

در این مطالعه از کد مونت کارلو MCNPX ۲/۶ و فانتوم وکسل بزرگسال مرد ICRP (قد ۱۷۶ cm و وزن ۷۳ kg) در برآورد دز استفاده شده است. دو چشمه پرکاربرد ^{192}Ir و ^{60}Co در ۱۳ فاصله مختلف شامل ۰٫۵، ۱٫۰، ۲٫۰، ۳٫۰، ۴٫۰، ۵٫۰، ۷٫۰، ۸٫۰، ۹٫۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ از بدن در ۴ هندسه تابش قدامی-خلفی^۲، خلفی-قدامی^۳، راست جانبی^۴ و چپ جانبی^۵ شبیه سازی شده‌اند. علاوه بر این با توجه به نوع شغل ارتفاع چشمه نسبت به بدن می‌تواند متفاوت باشد. به همین دلیل ۵ ارتفاع

همچنین دز مؤثر کل بدن برای چشمه‌های پرکاربرد در این زمینه، در شرایط حاد می‌تواند مؤثر واقع شود. با ابزارها و روش‌های دزیمتری موجود امکان برآورد سریع و دقیق دز در این‌گونه حوادث امکان پذیر نیست [۴،۵]. علاوه بر این، هیچ ابزاری برای برآورد دز کل بدن به صورت مستقیم در اختیار نیست. یکی از روش‌های قابل اعتماد در تعیین توزیع دز در بدن استفاده از کدهای مونت کارلو است. با استفاده از کدهای مونت کارلو و فانتوم‌های محاسباتی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند، امکان محاسبه دقیق دز در بدن و محاسبه دز کل بدن فراهم شده است [۶].

میزان دز دریافت شده توسط فرد به مدت زمان تابش، فاصله شخص تا چشمه و جهت قرارگیری شخص نسبت به چشمه وابسته است. به این دلیل برای در اختیار داشتن مجموعه کاملی از داده‌ها، مقدار دز در حالت‌های مختلف باید محاسبه شود. تاکنون محققان دز جذبی اعضا و دز مؤثر کل بدن ناشی از چشمه‌های رادیوگرافی صنعتی را در برخی حوادث رخ داده شده، برآورد نموده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

در سال ۲۰۱۵ تینگ و همکاران حادثه‌ای که در سال ۱۹۹۹ در تایوان جایی که دو اپراتور توسط چشمه ^{192}Ir با اکتیویته $2,33 \times 10^{11}\text{Bq}$ تحت تابش قرار گرفتند، را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه دز اعضای چون پوست، شش‌ها و مغز استخوان به دست آمد. محاسبات با استفاده از رابطه دز و داده‌های تجربی موجود انجام شد [۷].

در سال ۲۰۱۶ رحمان و همکاران دز مؤثر کل را برای کارکنانی که با چشمه‌های رادیوگرافی در بنگلادش سروکار داشتند مورد بررسی قرار دادند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد که دز متوسط سالانه کارکنان در بنگلادش بیشتر از هلند،

⁴ Right-Lateral (RLAT)

⁵ Left-Lateral (LLAT)

¹ Mesh-type Reference computational Phantom

² Anterior-Posterior (AP)

³ Posterior-Anterior (PA)

۲.۲. نحوه محاسبه دز مؤثر

دز مؤثر کمیت حفاظتی است که به صورت مجموع حاصل ضرب دزهای معادل هر بافت در ضریب وزنی بافت مورد نظر تعریف می‌شود:

$$E = \sum_T W_T \times H_T \quad (1)$$

که در آن H_T دز معادل در بافت T و از رابطه (۲) به دست می‌آید و W_T ضریب وزنی بافت T است.

$$H_T = \sum_T D_T \times W_R \quad (2)$$

در رابطه فوق D_T دز جذبی در بافت T و W_R ضریب وزنی تابش است. با توجه به این‌که این مطالعه برای فوتون‌ها انجام شده است و ضریب وزنی تابش در تمام انرژی‌های فوتون ۱ است، دز معادل و دز جذبی برابر هستند. واحد دز معادل و دز مؤثر Sv است.

ضرایب وزنی بافت بیانگر حساسیت‌پذیری بافت‌ها در مقابل تابش هستند، بنابراین به نوع بافت‌های مختلف وابسته است و مقادیر آن‌ها نیز تا امروز چندین بار تغییر کرده است. اعضای سهیم در محاسبه دز مؤثر شامل اعضای غدد جنسی، مغز، استخوان قرمز، روده بزرگ، شش‌ها، معده، مثانه، پستان‌ها، کبد، مری، تیروئید، پوست، سطوح استخوانی و اعضای باقیمانده است. اعضای باقیمانده خود شامل غدد فوق کلیوی، مغز، کلیه‌ها، ماهیچه، لوزالمعده، روده کوچک، طحال، تیموس و پروستات (برای زنان رحم) است. در این مطالعه جدیدترین ضرایب وزنی بافت که در ICRP ۱۰۳ گزارش شده انتخاب شده است [۱۶]. همچنین طبق پیشنهاد ICRP ۱۰۳ دز مؤثر برای اعضای باقیمانده براساس محاسبه میانگین حسابی به دست آمده است. برای محاسبه دز سطوح استخوانی و مغز استخوان فعال اطلاعات

مختلف در امتداد قد فانتوم برای چشمه شامل؛ کف زمین^۱، وسط ران پا^۲، پایین تنه^۳، وسط تنه^۴ و بالای تنه^۵ در نظر گرفته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX ۲/۶ [۱۴] انجام شده است. در این بخش، ابتدا به توضیح فانتوم مورد استفاده و سپس نحوه محاسبه دز مؤثر کل بدن و در نهایت پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی چشمه‌های ^{60}Co و ^{192}Ir پرداخته خواهد شد.

۲.۱. فانتوم و کسل بزرگسال مرد ICRP

فانتوم‌های وکسل نسل دوم فانتوم‌های محاسباتی هستند که با استفاده از داده‌های استخراج شده از تصاویر CT و یا MRI کل بدن فرد به دست می‌آیند. به دلیل این‌که کاملاً منطبق بر بدن یک فرد ساخته می‌شوند، در مقایسه با فانتوم‌های محاسباتی نسل اول (فانتوم‌های ریاضی) آناتومی واقعی دارند. فانتوم وکسل مرد ICRP از تصاویر CT بدن یک مرد ۳۸ ساله با قد ۱۷۶ cm و وزن ۷۳ kg به دست آمده است [۱۵]. این فانتوم شامل ۱۴۰ عضو از جمله رگ‌های خونی، غدد لنفاوی، غضروف‌ها و غیره که در نسخه‌های قبلی فانتوم‌ها نبودند، است. در ساخت فایل ورودی MCNPX این فانتوم، از قابلیت ایجاد شبکه (Lattice) استفاده شده است. در واقع در فانتوم‌های وکسل با یک آرایه سه بعدی از اعداد مواجه هستیم که هر عدد (ID) نمایانگر یک عضو است. ابعاد آرایه سه بعدی فانتوم وکسل ICRP، $222 \times 127 \times 245$ و اندازه هر وکسل $8 \text{ mm}^3 \times 2137 \times 2137$ است.

⁴ Middle torso

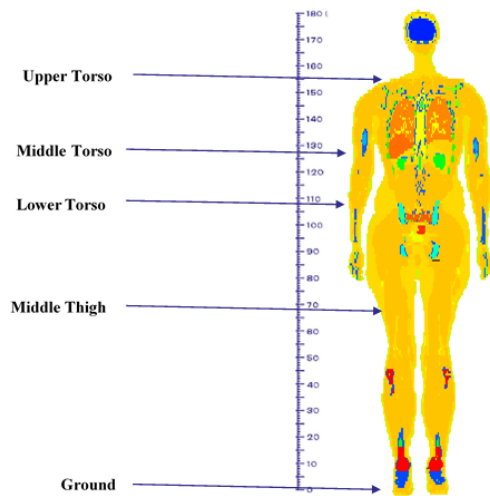
⁵ Upper torso

¹ Ground

² Middle thigh

³ Lower torso

۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ انتخاب شده است.



شکل (۱): نمایش ارتفاع‌های مختلف چشمه.

با توجه به ارتفاع چشمه و جهت تابش مختصات X ، Y و Z چشمه تعیین و فانتوم از ۴ جهت قدامی-خلفی، خلفی-قدامی، راست جانبی و چپ جانبی تحت تابش قرار گرفته است. انرژی در کارت قطع (CUT) برای فوتون و الکترون به ترتیب 0.01 و 0.5 MeV در نظر گرفته شد. همچنین با استفاده از کارت فیزیک (PHYS) پراکندگی‌های ریلی نیز برای فوتون لحاظ شد. داده‌های سطح مقطع از کتابخانه MCPLIB گرفته شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

دزهای مؤثر به‌دست آمده به اکتیویته چشمه نرمال شده‌اند از این‌رو واحد گزارش شده Sv/Bq است. زمان اجرای برنامه‌ها به جهت تابش، ارتفاع چشمه و فاصله آن از بدن وابسته است. این زمان به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که خطای دز جذبی در تمامی اعضا خصوصاً اعضای کوچک کمتر از 1% باشد. به‌طور متوسط زمان اجرای برنامه ۵۰ ساعت است.

ICRP^{۱۱۶} مربوط به جرم هر کدام از استخوان‌ها که در مغز استخوان قرمز و سطوح استخوانی مشارکت دارند استفاده شد [۱۷]. بعد از محاسبه دز جذبی مربوط به اعضای باقیمانده، مغز استخوان قرمز و سطوح استخوانی با استفاده از رابطه (۱)، دز مؤثر کل بدن در هر حالت به‌دست آمده است. خطای محاسبات هر داده دز مؤثر با استفاده از رابطه (۳) به‌دست می‌آید. که در آن ΔD^1 خطای آماری دز جذبی عضو ۱، ΔD^2 خطای عضو ۲ و به همین ترتیب برای سایر اعضا است. دز جذبی اعضا با استفاده از تالی $F6+$ برآورد شده است.

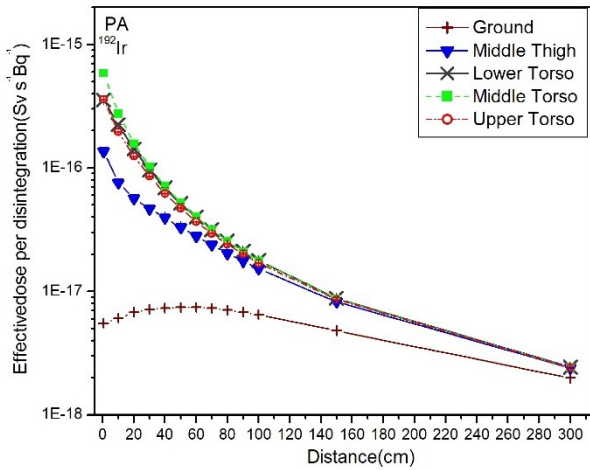
$$\Delta E = \sqrt{\Delta D^1 + \Delta D^2 + \dots} \quad (3)$$

۳.۲. چشمه‌های ^{60}Co و ^{192}Ir

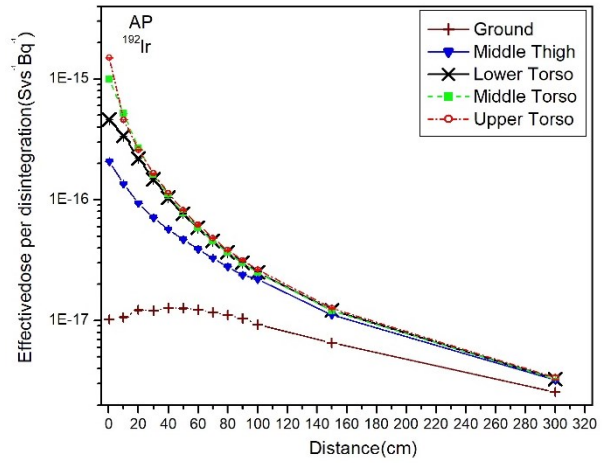
چشمه ^{60}Co با نیمه عمر ۵ سال و انرژی‌های 1.17 و 1.33 MeV با اکتیویته‌های 0.37 TBq تا 3.7 TBq در رادیوگرافی صنعتی استفاده می‌شود [۱۸]. ^{192}Ir نیز با نیمه عمر ۷۴ روز و میانگین انرژی 375 keV است. برای ^{192}Ir طیف‌های متفاوتی گزارش شده که اندکی در احتمالات با هم اختلاف دارند. در این مطالعه از طیف گزارش شده توسط NNDC^۱ استفاده شده است [۱۹].

هر دو چشمه به‌صورت نقطه‌ای و با استفاده از پارامتر SDEF در کد MCNPX شبیه‌سازی شده‌اند. توزیع انرژی با استفاده از دو کارت SI و SP که به ترتیب مقدار انرژی و تابع توزیع احتمال برای هر انرژی را مشخص می‌کند، تعیین شده است. نوع ذراتی که باید تراپرد شوند، در کارت MODE فوتون و الکترون لحاظ شده است. شکل ۱، ارتفاع‌های مختلف چشمه را نشان می‌دهد. این ارتفاع‌ها شامل کف زمین، وسط ران پا، پایین تنه، میانه تنه و بالا تنه است. در هر ارتفاع ۱۳ فاصله مختلف برای چشمه از بدن شامل 0.5 ، 1.0 ، 2.0 ،

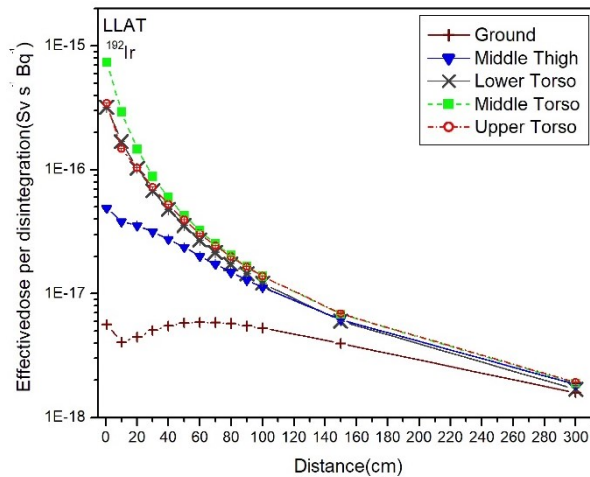
¹ National Nuclear Data Center



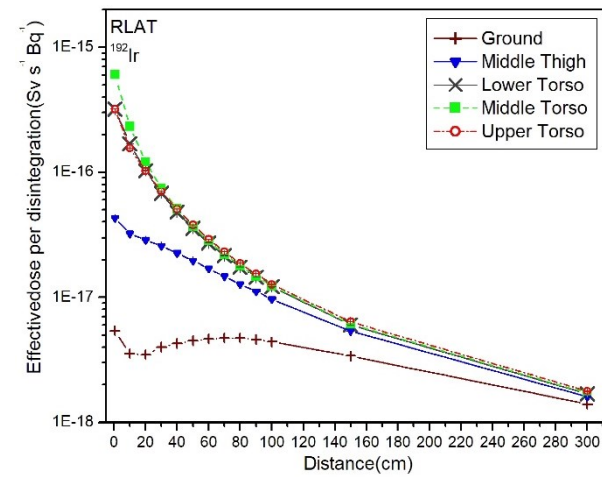
ب



الف



د



ج

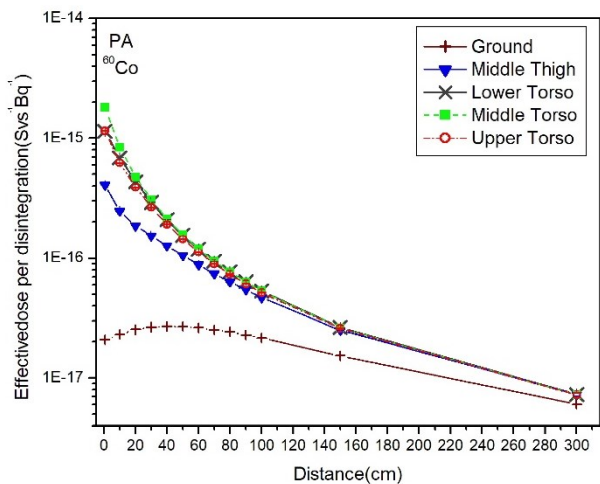
شکل (۳): مقادیر دز مؤثر در هندسه‌های تابشی مختلف برای چشمه ^{92}Ir .

۳.۱. دز مؤثر در ارتفاعها و هندسه‌های تابشی مختلف

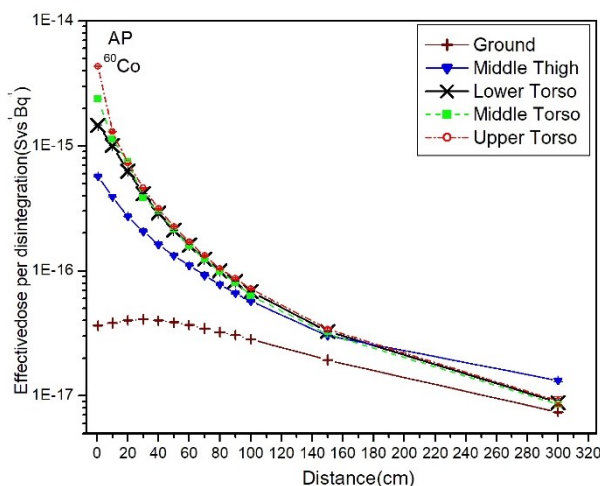
شکل‌های ۲ و ۳، مقادیر دز مؤثر بر حسب فاصله‌های مختلف چشمه از بدن در هندسه‌های تابشی قدامی-خلفی، خلفی-قدامی، راست جانبی و چپ جانبی را به ترتیب برای دو چشمه ^{60}Co و ^{192}Ir نشان می‌دهد. در هر هندسه تابشی، ۵ ارتفاع چشمه نمایش داده شده است. به‌طور کلی مقادیر با افزایش فاصله در ارتفاع‌های مختلف کاهش می‌یابند. البته اگر چشمه در سطح زمین قرار گرفته باشد تا فاصله ۴۰ cm رفتار متفاوتی را نشان

می‌دهد. در این ارتفاع در دو هندسه قدامی-خلفی و خلفی-قدامی تا ۴۰ cm ابتدا دز افزایش و سپس کاهش می‌یابد اما در دو هندسه راست و چپ جانبی ابتدا اندکی کاهش و سپس تغییر دز مؤثر روند مشابه دو هندسه قبلی را در پیش می‌گیرد.

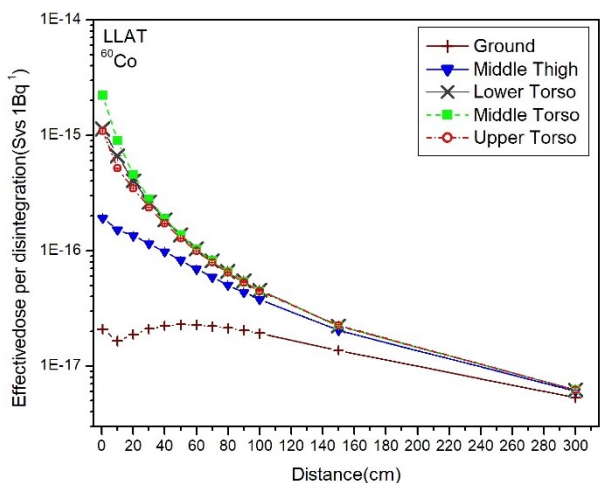
این رفتارها می‌تواند ناشی از پارامترهای تأثیرگذار متفاوتی باشد. با افزایش فاصله مقدار دز خصوصاً در سه ارتفاع بالا، وسط و پایین تنه تقریباً مطابق قانون عکس مجذور فاصله کاهش می‌یابد.



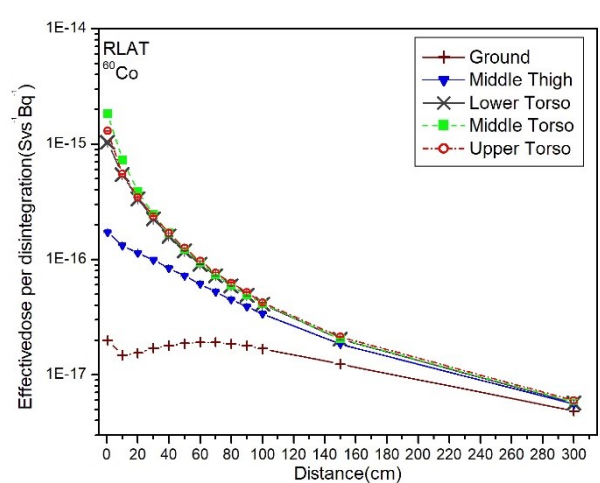
ب



الف



د



ج

شکل (۲): مقادیر دز مؤثر در هندسه‌های تابشی مختلف برای چشمه ⁶⁰Co.

به بافت نرم دارند، قطعاً قانون بیر-لامبرت نقش پررنگ‌تری را بازی می‌کند. بنابراین، در هر ارتفاع چشمه و هر هندسه تابشی ترکیبی از قانون عکس مجذور فاصله و بیر-لامبرت وجود دارد. در برخی حالات سهم یکی بسیار بزرگتر از دیگری است. اما حالت استثنای رفتار دز مؤثر که مربوط به قرارگیری چشمه در کف زمین است را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در این حالت چشمه به استخوان پا نزدیک است و از سایر اعضا اصلی شکمی و مغز دور است. با فاصله گرفتن چشمه از بدن، زاویه فضایی

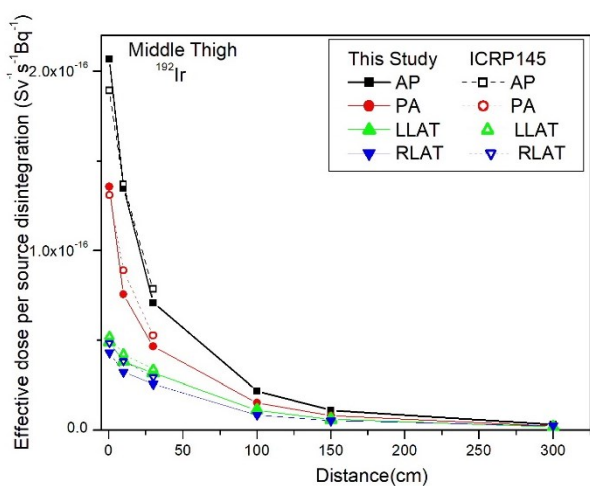
در واقع با افزایش فاصله شار ذرات رسیده به اعضا کاهش می‌یابد. اما روند کاهش کاملاً مطابق قانون عکس مجذور فاصله در هیچ‌کدام از ارتفاع‌ها نیست. زیرا در این مسئله اثر حفاظ بافت‌های دیگر نیز سهم هستند (قانون بیر-لامبرت^۱). این اثر به ارتفاع چشمه و هندسه تابشی کاملاً وابسته است. به‌عنوان نمونه، اگر شخص از سمت قدامی-خلفی تحت تابش قرار گیرد در مقایسه با تابش‌گیری از سمت راست جانبی به دلیل وجود دنده‌ها در جلوی بدن که ضرایب میرایی و جذب بالاتری نسبت

¹ $I = I_0 e^{-\mu x}$

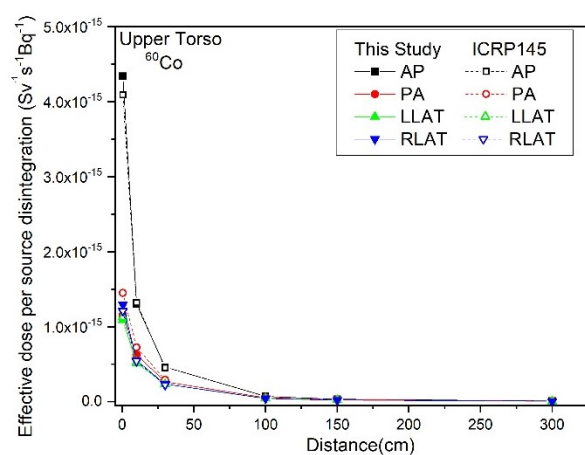
(اعضایی که بالاترین مقادیر W_T را دارا هستند) در جلوی بدن، این نتیجه قابل انتظار است. انتقال چشمه به قسمت راست یا چپ بدن باعث می‌شود که اعضای حساس از تیررس مستقیم تابش خارج شوند و در نتیجه دز کل بدن کاهش می‌یابد. در تمامی هندسه‌های تابشی زمانی که چشمه در ارتفاع‌های بالا، وسط و پایین تنه قرار دارد مقادیر دز مؤثر به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از زمانی است که چشمه در ارتفاع‌های وسط ران و کف زمین واقع است. با توجه به محل سه چشمه اول که در محدوده تنه قرار دارند خصوصاً زمانی که چشمه در وسط تنه است به دلیل این‌که اکثر اعضای داخلی تحت تابش قرار می‌گیرند، دز مؤثر بزرگتر به‌دست می‌آید. مقدار دز مؤثر در هندسه قدامی-خلفی در فاصله 0.5 cm در ارتفاع وسط تنه در مقایسه با ارتفاع‌های کف زمین و وسط ران پا برای هر دو چشمه ^{60}Co و ^{192}Ir به ترتیب 200 و 5 برابر است. مقادیر دز مؤثر برای چشمه ^{60}Co در تمامی ارتفاع‌های چشمه و هندسه‌های تابشی بزرگتر از مقادیر متناظر با ^{192}Ir است. که با توجه به مقدار انرژی چشمه‌ها قابل انتظار است.

افزایش و بنابراین ذرات چشمه می‌تواند به قسمت‌های بالاتر بدن برسند که این اثر تا 40 cm در دو هندسه تابش قدامی-خلفی و خلفی-قدامی غالب است با افزایش فاصله اثر تضعیف غالب می‌شود و شار کاهش یافته و بنابراین دز کاهش می‌یابد. کاهش در فواصل اولیه در دو هندسه تابش راست و چپ جانبی را می‌توان به ثابت ماندن انرژی جذب شده و افزایش حجم (ویا جرم) بیشتری از اعضای در معرض تابش نسبت داد.

همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ به‌طور مشخص دیده می‌شود در تمامی هندسه‌های تابش برای هر دو چشمه ^{60}Co و ^{192}Ir از فاصله 100 cm به بعد تقریباً مقدار دز مستقل از ارتفاع چشمه است. کف زمین مستثنی است. در 300 cm حتی در کف زمین نیز مقدار دز مؤثر با مقادیر سایر ارتفاع‌های چشمه تقریباً یکسان است. مقایسه مقادیر دز مؤثر در هندسه‌های تابشی مختلف نشان می‌دهد که بیشترین مقدار دز مؤثر مربوط به هندسه تابشی قدامی-خلفی و کمترین مقدار آن مربوط به هندسه تابشی راست جانبی است. و این روند در همه ارتفاع‌های چشمه مشاهده می‌شود. با توجه به قرار داشتن اعضای حساس به تابش



ب



الف

شکل (۴): مقادیر دز مؤثر به‌دست آمده در این مطالعه و داده‌های گزارش شده در ICRP145 در هندسه‌های تابشی مختلف برای چشمه ^{60}Co

تفاوت وجود داشته باشد، است. به‌طور کلی نتایج با توجه به متفاوت بودن نوع فانتوم (مش در برابر وکسل)، کد محاسباتی در اکثر هندسه‌های تابشی و ارتفاع‌ها تطبیق خوبی دارند.

۳.۳ برآورد دز مؤثر کل بدن بر اساس نتایج در برخی حوادث هسته‌ای رخ داده شده

تعداد حوادثی که تجزیه و تحلیل شدند و با شبیه سازی و یا نصب TLD و استفاده از روابط، دز مؤثر کل بدن برای قربانیان گزارش شده باشد، بسیار محدود است.

در این بخش چند نمونه از حوادث رادیوگرافی که با چشمه‌های ^{60}Co و ^{192}Ir رخ داده‌اند و دز مؤثر کل بدن برای آن‌ها گزارش شده، انتخاب شده است. بر حسب موقعیت پرتوکار نسبت به چشمه، تلاش شده که نزدیکترین حالت چشمه از نظر ارتفاع، فاصله تا بدن و جهت تابش در این مطالعه انتخاب شود تا بتوان مقایسه‌ای انجام داد. در همه این حوادث فرد در معرض تابش چشمه بدون حفاظ، قرار گرفته است. نتایج در جدول ۱ گزارش شده است. به‌عنوان مثال، ردیف اول جدول حادثه‌ای که در برزیل رخ داده و چشمه ^{192}Ir به مدت ۹ ساعت در پارکینگ رها شده و افراد زیادی در این مدت تحت تابش قرار گرفتند از جمله کارگران شرکت، معلم‌ها و بچه‌های مدرسه اطراف شرکت و یک مأمور امنیتی در شرکت که برای هر گروه برآوردهای دز صورت گرفته است [۲۰]. اطلاعات جدول مربوط به مأمور امنیتی است که به مدت ۹۰ ثانیه چشمه را در دست خود نگه داشته و سپس به جعبه بر می‌گرداند. با توجه به این که دست در جلو بدن نگه داشته شده بنابراین حالت قدامی-خلفی و ارتفاع پایین تنه برای چشمه در نظر گرفته شد. همچنین فاصله چشمه از بدن ۱۰ cm لحاظ شد. که در این حالت مقدار دز مؤثر به واحد اکتیویته $^{-1}\text{Sv Bq}^{-1}\text{s}^{-1} \times 10^{-16} \times 3.37$ به دست آمده است با لحاظ کردن زمان و اکتیویته چشمه مورد نظر، مقدار دز مؤثر برابر 99.4 mSv به دست می‌آید. به‌طور کلی داده‌ها با توجه به

۲.۳ مقایسه داده‌ها با داده‌های گزارش شده در ICRP

نتایج این مطالعه با نتایج ارائه شده در ICRP ۱۴۵ در تمامی هندسه‌های تابشی و ارتفاع‌های چشمه مقایسه شده است. برای این مقایسه فواصل مشترک چشمه از بدن انتخاب شد. شکل‌های ۴ الف و ب نمونه‌های انتخابی از این مقایسه به‌ترتیب برای چشمه ^{60}Co در ارتفاع بالا تنه و چشمه ^{192}Ir در ارتفاع وسط ران پا است. بزرگترین اختلاف‌ها در هندسه قدامی-خلفی-قدامی در ارتفاع‌های بالا و پایین تنه و هندسه قدامی-خلفی در ارتفاع پایین تنه برای چشمه‌های ^{60}Co و ^{192}Ir به‌ترتیب ۲۰٪ و ۲۳٪- است. این اختلاف در ۰.۵cm چشمه از بدن مشاهده می‌شود و با افزایش فاصله چشمه از بدن کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال در ارتفاع بالا تنه برای چشمه ^{60}Co در هندسه خلفی-قدامی در فاصله ۱۰ cm اختلاف به ۱۴٪- و در ۳۰ cm به ۹٪- می‌رسد.

این اختلاف‌ها سرچشمه‌های مختلفی دارند. از جمله در هندسه خلفی-قدامی زمانی که چشمه در ارتفاع بالا تنه قرار دارد، به دلیل این که سر فانتوم ICRP اندکی به جلو خم است بنابراین گردن از پشت قوس کوچکی دارد و وقتی چشمه در فاصله ۰.۵ cm از فانتوم قرار می‌گیرد این فاصله در مقایسه با فانتوم MRCP دورتر بوده و داده‌ها کوچکتر می‌شوند.

علاوه بر این نمودار توزیع عمقی فاصله اعضا از سطح بدن و مقایسه آن‌ها بین دو فانتوم MRCP و ICRP نشان از تفاوت بین عمق اعضا در دوفانتوم دارد که می‌تواند روی داده‌ها اثرگذار باشد. با توجه به متفاوت بودن کدهای محاسباتی مورد استفاده (در این مطالعه از کد ICRP ۱۴۵ و MCNPX ۲/۶ از کد GEANT ۴ استفاده شده است)، تفاوت در کتابخانه سطح مقطع‌های داده‌ها می‌تواند دلیل دیگری باشد که تأثیر آن‌ها به انرژی وابسته است. به‌علاوه در گزارش ICRP مختصات مکانی چشمه‌ها ذکر نشده و امکان این که اندکی در ارتفاع‌های انتخابی

این‌که نزدیک‌ترین موقعیت‌ها به فرد حادثه دیده انتخاب شده با نتایج گزارش شده تطبیق خوبی دارد. در سه حادثه هند، بنگلادش و ایران دز مؤثری گزارش نشده است اما با توجه به اطلاعات در دسترس داده‌های دز مؤثر به دست آمده از این مطالعه محاسبه شد که به ترتیب مقادیر ۵۰٫۷۲، ۹٫۲۰ و ۶۰۰ mSv به دست آمد.

جدول (۱): مقدار دز مؤثر در حوادث مختلف.

حادثه	سال	مدت زمان تابش (s)	چشمه اکتیویته (Bq)	دز مؤثر گزارش شده (mSv)	نتایج استخراج شده از مطالعه حاضر		
					ارتفاع چشمه	جهت تابش	فاصله چشمه (cm)
برزیل [۲۰]	۱۹۸۵	۹۰	^{192}Ir	۹۱٫۱	پایین تنه	قدامی-خلفی	۱۰
برزیل [۲۱]	۲۰۰۰	۳۰	^{60}Co	۸۸٫۱۰	وسط تنه	قدامی-خلفی	۱۰
تایوان [۷]	۱۹۹۹	۱۰۸۰۰	^{192}Ir	$18,9 \times 10^3$	وسط تنه	چپ جانبی	۰٫۵
هند [۲۲]	۱۹۶۸	۷۲۰۰	^{192}Ir	-	وسط ران پا	خلفی-قدامی	۰٫۵
بنگلادش [۲۳]	۱۹۸۹	۵	^{192}Ir	-	وسط تنه	قدامی-خلفی	۰٫۵
ایران [۲۴]	۱۹۹۶	۵۴۰۰	^{192}Ir	-	وسط تنه	راست جانبی	۰٫۵

۴. نتیجه‌گیری

مربوط به هندسه تابشی قدامی-خلفی و راست جانبی است. به‌علاوه زمانی که چشمه در ارتفاع وسط تنه قرار دارد دز مؤثر حدود ۲۰۰ برابر بیشتر از زمانی است که چشمه در کف زمین واقع شده است. با اضافه نمودن صدک‌های وزنی مختلف و سایر چشمه‌های پرکاربرد در رادیوگرافی صنعتی می‌توان مجموعه داده‌ها را کامل‌تر نمود. علاوه بر این اگر به‌جای اکتیویته مؤثر، اکتیویته فیزیکی چشمه در اختیار باشد باید مجدداً محاسبات انجام شود زیرا در این حالت باید اثر خود حفاظی چشمه به دلیل غلاف آن نیز در نظر گرفته شود.

سرعت و دقت در برآورد و توزیع دز در افراد حادثه دیده دو پارامتر مهم هستند. از این‌رو ایجاد کتابخانه داده‌ها از حالات مختلف چشمه‌های رادیوگرافی مفید است. هر چه مجموعه داده‌ها کامل‌تر باشد در مواقع اضطراری و مواقعی که با حوادث رادیوگرافی در اندازه‌های بزرگ که افراد زیادی تحت تابش قرار می‌گیرند، مواجه‌ایم می‌توان به‌سرعت میزان دزها را برآورد نمود و افراد را به لحاظ مداخلات پزشکی طبقه‌بندی کرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به استثنای ارتفاع کف زمین در سایر ارتفاع‌ها از فاصله ۱۰۰ cm به بعد تقریباً مقدار دز مؤثر مستقل از ارتفاع چشمه است. بیشترین و کمترین مقدار دز مؤثر به ترتیب

۵. مراجع

1. C. M. A. Lima, A. R. Lima, Ä. L. Degenhardt, N. J. Valverde, F. C. A. Da Silva. Reconstructive dosimetry for cutaneous radiation syndrome. *Braz. J. Med. Biol.* 48 (2015) 895-901.
2. IAEA, Radiation safety in industrial radiography, Safety Standards for protecting people and the environment No. SSG-11, 2011.
3. L. Cerezo, Radiation accidents and incidents. What do we know about the medical management of acute radiation syndrome?. *Rep. Pract. Oncol. Radiother.* 16 (2011) 119-122.
4. E. A. Ainsbury, E. Bakhanova, J. F. Barquinero, M. Brai, V Chumak, V Correcher, F Darroudi, P Fattibene, G Gruel, I Guclu, S Horn, A Jaworska, U Kulka, C Lindholm, D Lloyd, A Longo, M Marrale, O Monteiro Gil, U Oestreicher, J Pajic, B Rakic, H Romm, F Trompier, I Veronese, P Voisin, A Vral, C A Whitehouse, A Wieser, C Woda, A Wojcik, K Rothkamm. Review of retrospective dosimetry techniques for external ionising radiation exposures. *Radiat. Prot. Dosim.* 147 (4) (2011) 573-592.
5. M. E. Rea, R. M. Gougelet, R. J. Nicolalde, J. A. Geiling, H. M. Swartz. Proposed triage categories for large-scale radiation incidents using high-accuracy biodosimetry methods. *Health. Phys.* 98 (2010) 136-144.
6. X. G. Xu. Computational phantoms for radiation dosimetry: a 40-year history of evolution. In: *Handbook of Anatomical Models for Radiation Dosimetry*, (X. G. Xu, K. F. Eckerman, Eds.), chapter 1, pp. 3-41, Taylor and Francis, London, 2010.
7. C. Y. Ting, H. E. Wang, J. P. Lin, C. C. Lin, Evaluating the radiation from accidental exposure during a nondestructive testing event. *Health. Phys.* 109 (2015) 171-176.
8. M. S. Rahman, A. Begum, A. Hoque, R. K. Khan, M. M. M. Siraz. Assessment of whole-body occupational radiation exposure in industrial radiography practices in Bangladesh during 2010-2014. *Braz. J. Radiat. Sci.* 4 (2) (2016)1-17.
9. S. M. Hosseini Pooya, M. R. Dashtipour, R. Paydar, F. Mianji, B. Pourshahab. A comprehensive dose assessment of irradiated hand by iridium-192 source in industrial radiography. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 40 (2017) 611-616.
10. E. Massoud. Dose assessment for some industrial gamma sources with an application to a radiation accident. *J. Model. Simulat.* 2 (1) (2014) 1-8.
11. E. F. Salem. Risk Analysis for Overexposure Measurements Due to Radiological Accidents Using Computer Code and the Lessons Learned "Meet Halfa as a Case Study, Egypt". *Am. J. Phys. Appl.* 5 (2017) 13-19.
12. H. Han, Y. S. Yeom, C. Choi, H. Lee, B. Shin, X. Zhang, R. Qiu, N. Petoussi-Henss, C. H. Kim Dose Coefficients for Use in Rapid Dose Estimation in Industrial Radiography Accidents. In: S. Makarov, M. Horner, G. Noetscher, (eds). *Brain and Human Body Modeling: Computational Human Modeling at EMBC 2018*. Chapter 15. Cham (CH): Springer, (2019) p. 295-304.
13. C. H. Kim, Y. S. Yeom, N. Petoussi-Henss, M. Zankl, W. E. Bolch, C. Lee, C. Choi, T. T. Nguyen, K. Eckerman, H. S. Kim, M. C. Han, R. Qiu, B. S. Chung, H. Han, B. Shin. ICRP Publication 145: Adult Mesh-Type Reference Computational Phantoms. *Ann ICRP.* 49(3) (2020)13-201.
14. D. B. Pelowitz. Monte Carlo N-particle extended. United states: Los Alamos National Laboratory Report.
15. H. G. Menzel, C. Clement, P. DeLuca. ICRP Publication 110. Realistic reference phantoms: an ICRP/ICRU joint effort. A report of adult reference computational phantoms. *Ann ICRP.* 39 (2) (2009) 1-164.
16. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP publication 103. *Ann ICRP.* 37(2-4) (2007) 1-332.
17. N. Petoussi-Henss, W. E. Bolch, K. F. Eckerman, A. Endo, N. Hertel, J. Hunt, M. Pelliccioni, H. Schlattl, M. Zankl. International Commission on Radiological Protection; International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRP Publication 116. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. *Ann ICRP.* 40 (2-5) (2010) 1-257.
18. A. Pandey, P. S. Rawat, A. U. Sonawane. Risk assessment in the industrial radiography practice in India using probabilistic approach. *Int. J. Risk. Assess. Manag.* 21 (2018) 232-247.
19. National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory.
20. C. M. A. de Lima, T. A. de Almeida Silva, J. G. Hunt, F. C. A. Da Silva. Reconstructive dosimetry and radiation dose evaluation of workers and public due to a Brazilian radiological accident in industrial

- radiography. *J. Radiol. Protect.* 42 (1) (2022) 011505.
21. C. M. A. de Lima, F. C. A. Da Silva. Overview of Brazilian industrial radiography accidents with cutaneous radiation syndrome. *Braz. J. Radiat. Sci.* 6 (2B) (2018) 1-12.
22. M. Annamalai, P. S. Iyer, T. M. R. Panicker. Radiation injury from acute exposure to an iridium-192 source: case history. *Health. Phys.* 35 (1978) 387-389.
23. A. Jalil, M. R. Molla. An overexposure in industrial radiography using an ^{192}Ir radionuclide. *Health. Phys.* 57 (1989) 117-119.
24. J. Rouzitalab, A. Zamani, A. Yazdandout, L. Eshraghi. An Investigation to dose calculation in Gilan_Iran industrial radiography accident by using MCNP. Proceeding of 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, 16-20 April, 2012.