

دزیمتری یک سیستم بازرسی کانتینرها با پرتوهای فوتونی دوانرژی با شبیه سازی مونت کارلو

حمیدرضا همتی^{۱*} و روح الله عظیمی راد^۲

^۱گروه مهندسی پرتو پزشکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۲گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

*تهران، بزرگراه شهید چمران، خیابان یمن، دانشگاه شهید بهشتی، گروه مهندسی پرتو پزشکی، کدپستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

پست الکترونیکی: h_hemmati@sbu.ac.ir

چکیده

امروزه، سیستم های تصویربرداری با پرتوهای ایکس برای بازرسی کانتینرها در مبادی ورودی و خروجی کشورها بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. سامانه های تصویربرداری دو انرژی به دلیل استفاده از دو پرتو با طیف های انرژی مختلف، امکان به تصویر کشیدن اطلاعات بیشتری از مواد داخل کانتینر ها را دارا هستند. در استفاده از پرتوهای فوتونی به دلیل ایجاد یونیزاسیون، همواره می بایست سه اصل توجیه پذیری، بهینه سازی و حدود پرتوگیری را در نظر گرفت. در این پژوهش به منظور ارزیابی حدود پرتوگیری مواد داخل کانتینر، کارکنان و حدود پرتوگیری در اطراف این سیستم، از شبیه سازی آن با کد مونت کارلو بهره برده شد. با در نظر گرفتن چشمه های 750 mCi سزیم و 1 Ci کبالت، محدوده ی دز رسیده به مواد در مرکز کانتینر برای چشمه سزیم در حدود $10 \mu\text{Sv/h}$ و برای چشمه کبالت حدود $20 \mu\text{Sv/h}$ از شبیه سازی حاصل شد. همچنین بدون استفاده از حفاظ اضافی، در فاصله ی ۱۰ متری حول سیستم تقریباً پرتوگیری در مرتبه ی مناسبی قرار دارد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که با استفاده از سیستم پوشش خطی و طراحی مناسب حفاظ سربی چشمه، دز رسیده به مواد داخل کانتینر و همچنین دز در اطراف سیستم در مرتبه ی مناسبی می تواند قرار گیرد.

کلید واژگان: سیستم بازرسی کانتینرها، تصویربرداری دو انرژی، دزیمتری، کد مونت کارلو.

۱. مقدمه

خروج مواد مخدر، تجهیزات نظامی، مواد هسته ای و بمب برای انجام هرگونه عملیات تروریستی در داخل کشور دوچندان می شود. از روش های معمول و مؤثر گمرک ها، ایست بازرسی های مرزی و ارگان های تفتیش برای بازرسی محتویات درون وسایل نقلیه باربری، استفاده از پرتوگاما یا ایکس است. پرتوهای فوتونی به راحتی در داخل کانتینرهای درب بسته نفوذ می کنند و تصویری از محتویات داخل آن فراهم می کنند

امروزه بندرها، فرودگاه ها، راه آهن و خطوط زمینی بخش مهمی از اقتصاد جهانی را در خود جای می دهند. سالانه حجم زیادی از محموله هایی چون غذا، اجزای صنعتی و ... در جهان از طریق کشتی، هواپیما، راه آهن و یا به طور زمینی بین کشورها مبادله می شود. از این رو دولت های ما بایست کنترل کاملی روی این مبادلات داشته باشند تا از ورود و خروج هرگونه کالای غیرمجاز جلوگیری کنند. اهمیت این موضوع در زمینه ورود و

صورتی که مجبور به استفاده از شار بالا برای حصول کیفیت مناسب تصویر باشیم، می‌بایست محیط عملکرد دستگاه کاملاً محدود باشد و افراد اجازه رفت‌وآمد به آن را نداشته باشند. در این پژوهش، به بررسی و دزیمتری یک سیستم معمول تصویربرداری کانتینرها با چشمه‌های سزیم و کبالت می‌پردازیم.

۲. مواد و روش‌ها

سامانه‌های بازرسی به کمک پرتو ایکس شامل یک مولد پرتو ایکس، کلمیاتورها برای محدود کردن پرتو ایکس در راستای موردنظر، یک سیستم آشکارساز، تجهیزات رایانه‌ای و ... است. سامانه‌های تصویربرداری دو انرژی، برای استخراج اطلاعات بیشتر از مواد داخل کانتینر، از دو پرتو ایکس با طیف انرژی‌های متفاوتی استفاده می‌کنند. انتخاب این دو پرتو ایکس همواره به نحوی است که یکی از آن‌ها در گستره‌ی انرژی پایین قرار گیرد تا بتواند مواد با عدد اتمی و چگالی پایین‌تر را به تصویر بکشد و دیگری در محدوده‌ی انرژی بالاتری قرار می‌گیرد تا امکان گذر از مواد با عدد اتمی بالا، چگالی بالا و یا موادی که ضخامت زیادی دارند، نیز فراهم باشد. از این رو سیستم تصویربرداری دو انرژی گستره‌ی دینامیکی بیشتری برای نمایش مواد داخل کانتینر نسبت به سامانه‌های تک انرژی دارد. همچنین این سامانه‌های بازرسی نیازمند فضای زیادی به سبب بزرگ بودن ابعاد کانتینرها، برای به تصویر کشیدن آن‌ها هستند. استفاده از دو پرتو فوتونی و وجود فضای بزرگ ناحیه‌ی تصویربرداری سبب می‌شود تا دزیمتری چنین سامانه‌ای اهمیت بالایی داشته باشد. یکی از معمول‌ترین چشمه‌های مورد استفاده در سامانه‌های تصویربرداری دو انرژی کانتینرها، چشمه سزیم و کبالت است. این چشمه‌ها با توجه به اکتیویته‌ی ویژه‌ی بالا و انرژی مناسب جهت تصویربرداری موارد داخل کانتینر، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. در

[۱]. مزیت عمده‌ی چنین سامانه‌هایی دقت بسیار بالای بازرسی، سرعت پویش بالا و نیاز به خدمه بسیار کم برای بازرسی است. دقت این سامانه‌ها به قدری بالا است که روش‌های مخفی سازی مواد داخل مواد، سمی کردن مواد جهت غیرقابل شناسایی کردن مواد توسط سگ‌های جستجوگر و ... در مورد آن‌ها کاراً نیست. از این رو این سامانه‌ها به عنوان بهترین نوع پوششگر در سراسر جهان مطرح می‌باشند.

در این سامانه‌ها عمق نفوذ به محتویات درونی کانتینر، بستگی به انرژی پرتو مورد استفاده دارد. منبع تولید پرتو در سامانه‌های تصویربرداری چشمه‌های رادیواکتیو و یا شتابدهنده‌های خطی هستند. در سامانه‌های مبتنی بر چشمه، از چشمه‌های رادیواکتیو با انرژی مناسب و اکتیویته بالا همچون سزیم و کبالت استفاده می‌کنند.

مزیت سامانه‌های مبتنی بر چشمه، پایین بودن هزینه آن‌ها نسبت به شتابدهنده‌ها و کوچک‌تر بودن ابعاد آن‌هاست، هرچند در مقابل به دلیل استفاده از چشمه رادیواکتیو، حتی در صورت عدم استفاده از دستگاه نیز تشعشع وجود دارد و نیاز به حفاظ سازی بیشتری دارند. جابجایی این سامانه‌ها به همین دلیل خیلی سخت صورت می‌گیرد و بیشتر برای مناطقی که سیستم بازرسی به صورت دائم مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارجحیت دارد.

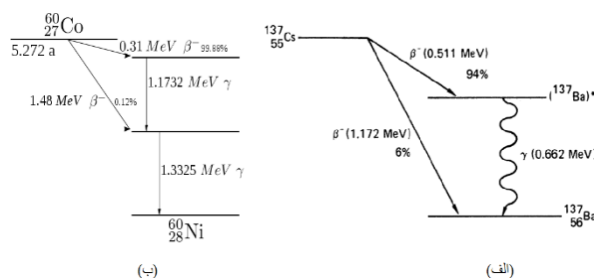
امروزه، سامانه‌های تصویربرداری دو انرژی به دلیل اینکه می‌توانند اطلاعات بیشتری از مواد موجود در کانتینر را به تصویر بکشند، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. در استفاده از پرتوهای فوتونی از لحاظ حفاظت همواره می‌بایست سه اصل توجه‌پذیری، بهینه‌سازی و حدود پرتوگیری را مورد توجه قرار داد [۳ و ۴]. هر سیستم تصویربرداری می‌بایست از جهت پرتوگیری محیط (دزکارکنان) و پرتوگیری مواد داخل کالبره و بررسی گردد، زیرا مقادیر بالای پرتوگیری می‌توند موجب بروز اثرات بیولوژیک غیر قابل جبرانی شود [۵ و ۶]. در

برای شبیه‌سازی سیستم تصویربرداری و دزیمتری آن از نرم‌افزار MCNPX نسخه ۲/۶ و از تالی ۴ استفاده شده است. برای نمایش هندسه در حالت سه‌بعدی از نرم‌افزار visual mcnpX کمک گرفته شد. برای تصحیح و نزدیک شدن هر چه بیشتر نتایج شبیه‌سازی به واقعیت، اجزای سیستم در هوا قرار گرفتند. بنابراین در برنامه MCNPX یک کره بسیار بزرگ حاوی هوا در نظر گرفته شد و بقیه‌ی اجزای سیستم داخل این کره قرار گرفتند. در برنامه هوا به صورت مخلوطی از کربن، نیتروژن و هیدروژن در نظر گرفته شد.

۲.۱. طراحی سیستم

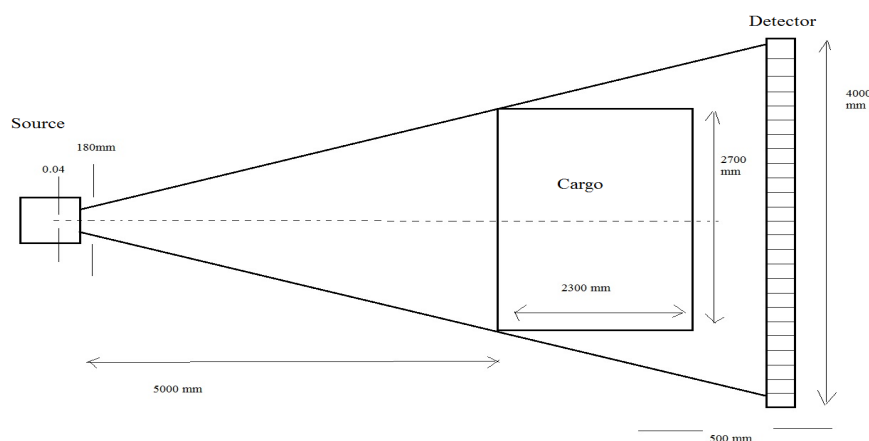
با توجه به ابعاد کانتینرهای موجود و دقت موردنیاز یک سیستم تصویربرداری به شکل زیر طراحی گشت. چشمه در یک محفظه‌ی سربی قرار داده می‌شود. فواصل و اندازه‌ی آشکارساز مطابق مدل‌های تجاری [8] طوری انتخاب شده است تا کانتینر را پوشش دهد. تمامی ابعاد در شکل به صورت میلی‌متری باشند. شکل ۲ نمای بیرونی اجزا را نشان می‌دهد و جزئیات مربوط به هر بخش در ادامه آورده شده‌اند.

شکل زیر می‌توانید نحوه‌ی واپاشی هر یک از این دو چشمه را ببینید.



شکل (۱): نحوه‌ی واپاشی چشمه‌های سزیم و کبالت [۲].

کد مونت کارلو یا به اختصار MCNP یک بسته نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی فرآیندها و واکنش‌های هسته‌ای است. این کد توسط آزمایشگاه ملی Los Alamos توسعه یافته است. بعدها MCNPX توسط همین آزمایشگاه توسعه داده شد. MCNPX قادر است تا اندرکنش ۳۴ نوع ذره مختلف (شامل هسته‌ها و یونها) را در مواد مختلف در تقریباً تمامی انرژی‌ها شبیه‌سازی کند [۷].



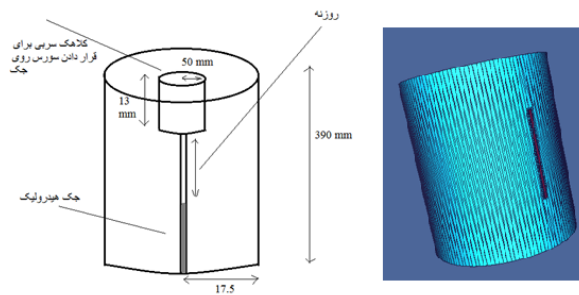
شکل (۲): ابعاد سیستم تصویربرداری در نظر گرفته شده.

یک با پیکسل‌های ۴*۴ میلی‌متر مربع است. توجه داشته باشید که به دلیل قیمت بسیار بالای آشکارسازهای انرژی بالا، تقریباً اکثر سامانه‌های بازرسی به صورت پوشش خطی ساخته

این سیستم تصویربرداری به صورت پوشش خطی بوده و آشکارساز استفاده شده در آن به صورت آرایه‌ی خطی ۱۰۰۰ در

¹Line scan

برای خروج پرتو است. در قسمت پایینی استوانه یک سوراخ طویل در نظر گرفته شده است تا چشمه بتواند توسط جک هیدرولیکی حرکت کرده و در زمان تصویربرداری روبروی شکاف قرار می‌گیرد و در زمان‌های دیگر توسط جک هیدرولیک پایین کشیده می‌شود. در اینجا فرض بر آن است که عملیات جایگذاری هر یک از چشمه‌ها توسط جک هیدرولیک صورت می‌گیرد و بنا به برنامه کامپیوتری، جک هیدرولیکی اقدام به جایگذاری چشمه مربوطه خواهد کرد.



شکل (۳): ساختار و ابعاد محفظه‌ی سربی برای محدود کردن جهت و حفاظ سازی پرتو.

۲.۳ منبع پرتو مورد استفاده

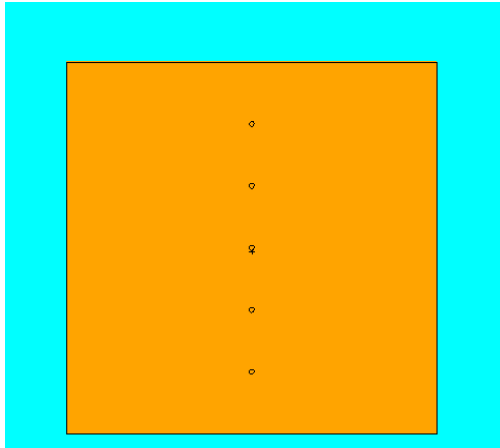
در نحوه‌ی طراحی چشمه می‌بایست از چشمه‌های تجاری موجود استفاده گردد و از این رو چشمه پیشنهادی به صورت یک استوانه با قطر یک سانتی‌متر که توسط سازمان انرژی اتمی ایران پیشنهاد شده است، در نظر گرفته شد. از آنجایی که کیفیت تصویر کاملاً وابسته به تعداد ذرات است، بنابراین در هر سیستم تصویربرداری، دز سیستم (تعداد ذرات) یک عامل محدودکننده در کیفیت تصویر است. هرچند در صورت کم بودن تعداد ذرات، تصویر مناسبی نخواهیم داشت ولی با افزایش شار ذرات، دز نیز بالاتر می‌رود [۹]. انتخاب اکتیویته‌ی مناسب جهت تصویربرداری برای هر یک از چشمه‌ها توسط عواملی چون مقدار بازدهی آشکار به آن انرژی و فاصله‌ی بین چشمه و آشکار ساز تعیین می‌گردد. در این پژوهش، به منظور کیفیت مناسب تصاویر، برای چشمه سزیم اکتیویته‌ی 750 mCi و برای چشمه کبالت اکتیویته‌ی 1 Ci در نظر گرفته شد (مطابق با

می‌شوند. در این سامانه‌ها عرض آشکار ساز در مقابل طول آشکار ساز بسیار کم بوده و لذا جسم آزمون می‌بایست حرکت داده شود (یا اینکه مولد پرتو و آشکار ساز حرکت کند). سیستم پیشنهادی برای کانترهایی طراحی شده است که حداکثر دارای 2.7 متر عرض و 2.3 متر ارتفاع باشند ولی با توجه به اینکه سیستم بازرسی از مد پوش خطی استفاده می‌کند، هیچ گونه محدودیتی برای طول کانتینر وجود ندارد. آشکار ساز آرایه‌ای انتخاب شده در این طراحی مدل X-Scan LCS از شرکت Detection Technology می‌باشد. کانتینر به صورت ورقه‌هایی از جنس آهن با ضخامت 2 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. طبق کاتالوگ شرکت این آشکار ساز دارای زمان عملکرد سریع حدود 120 میلی ثانیه برای مد پیوسته است. در نتیجه با توجه به این که در هر بار تصویربرداری کمتر از 4 میلی متر از کانتینر به صورت عرضی پوش می‌شود، بنابراین پوش هر متر از کانتینر (250) تا قسمت 4 میلی متری) با یک پرتو با طیف انرژی مشخص حدود 30 ثانیه زمان خواهد برد. البته باید توجه داشت که این زمان، حداقل زمان لازم برای قسمت آشکار ساز بوده و زمان لازم برای پردازش تصویر در آن لحاظ نشده است. در شبیه سازی جسم آزمون (فانتوم مواد غذایی یا فرد) در مرکز کانتینر قرار گرفت.

۲.۲ طراحی محفظه‌ی سربی برای نگه‌داری چشمه

به دلیل اینکه چشمه‌های پرتوزا دارای توزیع گسیل یکنواخت در تمامی جهات هستند، می‌بایست محفظه‌ای جهت حفاظ سازی چشمه در نظر گرفته شود تا جهت پرتو محدود به زاویه مورد نظر آشکار ساز باشد و همچنین کارکنان تابش اضافی نبینند. همچنین باید چشمه‌ها در زمان غیر تصویربرداری کاملاً در حفاظ قرار گیرند. محفظه چشمه به صورت یک استوانه سربی با شعاع 16 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین یک لایه یک سانتی‌متری از استیل نیز روی این استوانه قرار دارد. در یکی از سمت‌ها این استوانه دارای شکافی به عرض 4 میلی‌متر

را داشته باشد. داخل این فانتوم ۵ کره بسیار کوچک (با شعاع $0.2/4$ سانتی متر) در ارتفاعهای متفاوتی در نظر گرفته شده است. میانگین آهنگ دز داخل هر یک از این کره‌ها به عنوان آهنگ دز در همان نقطه در بدن فرد در نظر گرفته می‌شود.



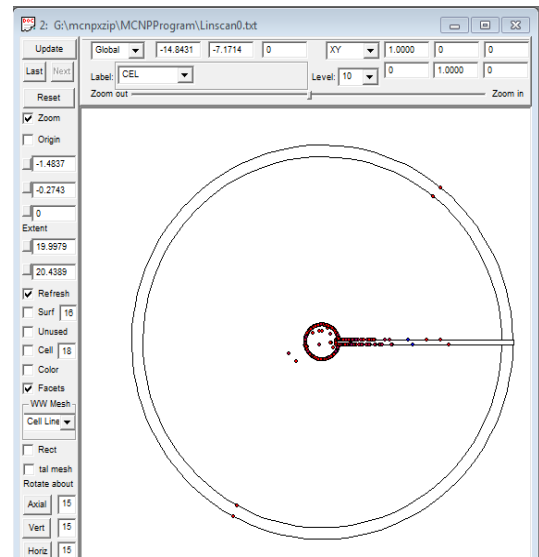
شکل (۵): فانتوم آب و کره‌های بسیار کوچک برای اندازه‌گیری دز در داخل کانتینر.

با توجه به اینکه برای تصویربرداری، جسم آزمون می‌بایست از میان پرتو و آشکارساز حرکت داده شود تا تمامی نقاط آن مورد پوشش قرار گیرد، لذا در اینجا کمیت آهنگ دز (تغییرات دز در واحد زمان) مورد اهمیت است. سرعت حرکت جسم بسته به نوع آشکارساز و سامانه‌های الکترونیکی اکتساب داده تعیین می‌شود. از این رو که معمولاً سرعت تصویربرداری در سامانه‌های کنونی بسیار بالا بوده، مقدار آهنگ دز برحسب نانو سیورت در ثانیه نیز آورده شده است. جدول ۱ و ۲ مقادیر آهنگ دز را برای هر یک از این میکرو کره‌ها نمایش می‌دهد.

جدول (۱): مقدار آهنگ دز در خط مرکزی فانتوم آب برای چشمه سزیم.

فاصله از مرکز فانتوم (cm)	مقدار دز ($\mu\text{Sv/h}$)	مقدار دز (nSv/s)
-۱۰	۱۰/۷۲	۲/۹۷
-۵	۸/۶۶	۲/۴۱

آزمایش‌های عملی). شکل زیر نحوه قرارگیری چشمه و همچنین چگونگی گسیل پرتو را در محفظه‌ی سربی نمایش می‌دهد.



شکل (۴): نوع حفاظ‌سازی چشمه، اجازه می‌دهد تا پرتو تنها از یک ناحیه و جهت محدود از حفاظ خارج شود. در نتیجه حفاظ‌سازی، سبب عدم پرتوگیری کارکنان در محوطه می‌شود.

۳. یافته‌ها و بحث

۳.۱ دز رسیده به فرد یا مواد غذایی داخل کانتینر

برای اینکه سیستم تصویربرداری بتواند برای بازرسی کانتینرها مورد استفاده قرار گیرد می‌بایست به دزیمتری مواد داخل کانتینر توجه ویژه‌ای داشت، زیرا ممکن است مواد داخل آن همواره جزو مواد غذایی باشد یا موادی باشند که نسبت به پرتوگیری حساس باشند. همچنین این احتمال نیز وجود که افرادی جهت ورود و خروج از مبادی کشور داخل کانتینر مخفی شده باشند. چون اساس تشکیل تصویر در سیستم جاری بر مبنای گذر پرتوهای فوتونی از مواد مختلف است، اهمیت دزیمتری فرد پنهان‌شده در کامیون یا مواد غذایی بسیار بالا است [۱۰].

جهت بررسی دز رسیده به این فرد، از یک فانتوم آب با ابعاد $30 * 30 * 30$ سانتی متر استفاده شده است. جنس این فانتوم، آب در نظر گرفته شده است تا بیشترین مطابقت با بدن انسان

۳.۲ دز در اطراف سیستم

فضای اطراف هر سیستم تصویربرداری به‌طورکلی به سه ناحیه‌ی کنترل‌شده، تحت نظارت و کنترل نشده تقسیم می‌گردد. ناحیه‌ی کنترل‌شده، ناحیه‌ای است که با علائم مشخصی علامت‌گذاری شده و تنها افراد خاص و در صورت لزوم، اجازه رفت‌وآمد به آن رادارند، در حالی که ناحیه تحت نظارت خارج از ناحیه‌ی کنترل قرار می‌گیرد ولی امکان افزایش دز تا ۲ میکرو سیورت در ساعت برای آن وجود دارد. در ناحیه‌ی تحت نظارت، هیچ‌گونه محدودیت حفاظت پرتویی وجود ندارد و همهی افراد می‌توانند در آن رفت‌وآمد داشته باشند [۱۱ و ۱۲].

یکی از الزامات اساسی در حفاظت در برابر پرتو برای کارکنان سیستم و راننده‌های کامیون و تریلرهای موجود در محل بازرسی، تعیین دقیق مناطقی حول سیستم مورد بازرسی (به‌ویژه حول چشمه) است که دز بالاتر از حد مجاز در آن به هنگام تصویربرداری وجود دارد. این مناطق می‌بایست کاملاً محصور گردند و از ورود افراد به داخل آن جلوگیری گردد [۹].

جهت تعیین این مناطق، در فواصل معینی از چشمه به شرح زیرکره‌های بسیار کوچک از جنس هوا برای تعیین دز در نظر گرفته شده است. دزیمتری حول سیستم بازرسی به صورت محدوده‌های کروی شکلی حول چشمه با چندین شعاع مختلف نواحی کروی در نظر گرفته شده است. در هر یک از نواحی کروی، ۶ میکرو کره در ۶ جهت اصلی (بالا-پایین، چپ-راست و جلو-عقب) وجود دارند (شکل ۶). دز هر نقطه مربوط به دز داخل این میکروکره‌ها است. با توجه به طراحی مناسب حفاظ چشمه و با توجه به انرژی بالای پرتوهای مورد استفاده که احتمال کمی برای پراکندگی کامپتون دارد، آهنگ دز در پنج جهت (بالا-پایین، چپ-راست و عقب) محفظه در شبیه‌سازی تقریباً صفر به دست آمد. از این رو تنها

۰	۹/۳۹	۲/۶۱
۵	۱۰/۷۰	۲/۹۷
۱۰	۱۰/۷۴	۲/۹۸

جدول (۲): مقدار آهنگ دز در خط مرکزی فانتوم آب برای چشمه کبالت

فاصله از مرکز کانتینر (cm)	مقدار دز ($\mu\text{Sv/h}$)	مقدار دز (nSv/s)
-۱۰	۲۰/۸۱	۵/۷۸
-۵	۲۰/۹۲	۵/۸۱
۰	۱۸/۷۷	۵/۲۱
۵	۲۲/۰۱	۶/۱۱
۱۰	۱۸/۸۶	۵/۲۴

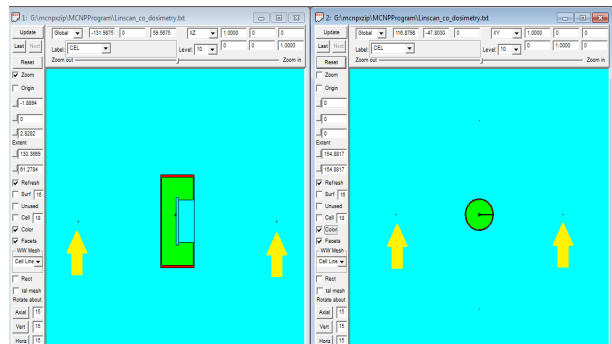
دز (دز تجمعی) رسیده به مواد داخل کانتینر بستگی به زمان تصویربرداری و جنس مواد دارد. با توجه به زمان عملکرد آشکارساز در نظر گرفته شده و استفاده از سیستم‌های سریع پردازش داده، پیش بینی می‌شود که زمان تصویربرداری هر قسمت از محموله کمتر از یک ثانیه باشد. در سیستم پیشنهادی محدوده‌ی آهنگ دز رسیده به فانتوم آب (معادل بافت بدن) در مرکز کانتینر برای چشمه سزیم در حدود 3 nSv/s و برای چشمه کبالت حدود 6 nSv/s از شبیه‌سازی حاصل شد. در نتیجه در یک پویش دو انرژی، دز رسیده به فانتوم آب داخل کانتینر در صورتی که زمان پویش هر قسمت محموله یک ثانیه باشد، حدود 9 nSv خواهد بود. در صورتی که مواد داخل کانتینر از جنس دیگری باشند، طبق رابطه‌ی زیر می‌توان آهنگ دز رسیده به آن ماده را محاسبه کرد [۵].

$$\dot{D}_m = \frac{\mu_{m}/\rho_m}{\mu_{\text{water}}/\rho_{\text{water}}} \dot{D}_{\text{water}} \quad (1)$$

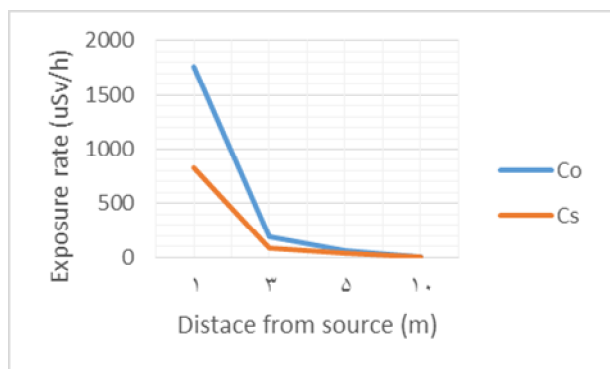
که در آن μ_m به ضریب جذب ماده در آن انرژی و ρ_m به چگالی ماده اشاره دارد.

آشکارساز آرایه‌ای در نظر گرفت نشد، در حالی که در عمل آشکارساز برای محافظت در برابر عوامل محیطی در یک حفاظ قرار می‌گیرد. وجود همین حفاظ نیز سبب کاهش دز در پشت آشکارساز خواهد شد. نکته‌ی دیگری که می‌بایست به آن توجه کرد، این است که به دلیل ساختار مناسب حفاظ سازی چشمه، حول چشمه منطقه امنی وجود داشته و تنها پرتوهای پراکنده در این قسمت وجود دارد. در نتیجه حول چشمه نیاز به هیچ‌گونه حفاظ سازی اضافی برای کارکنان و یا افراد وجود ندارد و این منطقه از لحاظ پرتوی، ایمن می‌باشد.

مقادیر مربوط به آهنگ دز در میکرو کره‌های جلوی پرتو در فواصل مختلف در جدول ۳ آورده شده است.



شکل (۶): محل قرارگیری کره‌های کوچک برای اندازه‌گیری پرتوگیری حول سیستم.



شکل (۷): مقایسه‌ی آهنگ پرتوهای در فواصل مختلف برای هریک از چشمه‌ها.

جدول (۳): مقادیر آهنگ پرتوهای در فاصله‌های متفاوتی از محفظه‌ی

سربی		فاصله از چشمه (متر)
چشمه کبالت	چشمه سزیم	
۱۷۵۸/۰۰ (μSv/h)	۸۳۴/۱۹ (μSv/h)	۱
۴۸۸/۱۳ (nSv/s)	۲۳۱/۷۲ (nSv/s)	
۱۹۳/۹۹ (μSv/h)	۸۸/۵۹ (μSv/h)	۳
۵۳/۸۹ (nSv/s)	۲۴/۶۱ (nSv/s)	
۶۵/۴۵ (μSv/h)	۳۳/۴۹ (μSv/h)	۵
۱۸/۱۸ (nSv/s)	۹/۳۰ (nSv/s)	
۴/۹۶ (μSv/h)	۰/۷۳۲ (μSv/h)	۱۰
۱/۳۷ (nSv/s)	۰/۲۰ (nSv/s)	

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، از کد MCNPX به منظور ارزیابی پرتوگیری در یک سیستم تصویربرداری دو انرژی برای بازرسی کانتینرها استفاده شد. سیستم تصویربرداری شبیه سازی شده شامل چشمه‌ی پرتو، محفظه‌ی سربی برای محدود کردن و حفاظ سازی چشمه، کانتینر با دیواره‌های آهنی با ضخامت ۲ میلی‌متر و آشکارساز آرایه‌ای بود. چشمه‌های مورد استفاده در این سیستم بازرسی که از نوع پویش خطی می‌باشد، چشمه‌های سزیم و کبالت با اکتیویته‌های ۷۵۰ mci و ۱۰۰۰ mci می‌باشند. جهت ارزیابی پرتوگیری مواد داخل کانتینر، یک فانتوم آب $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از تالی f4 آهنگ پرتوگیری در ۵ نقطه‌ی متفاوت (۵ کره‌ی کوچک داخل فانتوم آب) برای هر یک از چشمه‌ها اندازه

جهت ارزیابی بهتر نتایج، این مقادیر در شکل ۷ به تصویر کشیده شده‌اند. هرچند بعد از حدود ۱۰ متر از چشمه (تقریباً ۲ متر پس از آشکارساز) دز نسبت به حالت اولیه کاهش زیادی داشته است ولی همچنان مقدار آن بالاتر از $2 \mu\text{Sv/h}$ در مورد کبالت بوده، در نتیجه توصیه می‌گردد فضای پشت آشکارساز از نظر رفت و آمد افراد محدود گردد و یا اینکه از دیوارهای بتنی جهت حفاظ سازی در ناحیه‌ی پشت آشکارساز استفاده گردد. البته باید توجه داشت که در این پروژه هیچ‌گونه حفاظی برای

حدود $0.7 \mu\text{Sv/h}$ و برای چشمه ی کبالت در حدود $1 \mu\text{Sv/h}$ $4/9$ حاصل شد. با توجه به در نظر گرفتن مقدار $2 \mu\text{Sv/h}$ مقدار پرتوگیری مجاز در ناحیه ی کنترل شده (طبق استانداردهای بین المللی)، می توان بعد از این فاصله را به عنوان ناحیه ی کنترل شده در نظر گرفت. به این صورت که نباید هیچ‌گونه رفت و آمدی تا حداقل دو متری آشکارساز در خلال تصویربرداری صورت گیرد. تمامی نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده در این پژوهش، با توجه به خطای آماری کمتر از 4% صورت گرفته است.

گرفته شد. مقدار آهنگ پرتوگیری در هر نقطه در مرکز کانتینر برای چشمه سزیم در حدود $10 \mu\text{Sv/h}$ و برای چشمه کبالت حدود $20 \mu\text{Sv/h}$ از شبیه‌سازی حاصل شد. همچنین جهت ارزیابی پرتوگیری در فضای حول سیستم که احتمال تردد کارکنان سیستم بازرسی در آن وجود دارد، کره های بسیار کوچکی در شش جهت اصلی و در فواصل متفاوتی از چشمه قرار گرفت. در این پژوهش، بدون در نظر گرفتن هیچ‌گونه حفاظی در پشت آشکارساز در محدوده ی 10 متری از چشمه (۲ متر بعد از آشکارساز)، پرتوگیری برای چشمه ی سزیم

۵. مراجع

- [1] B.G. Brown. X-rays and Their Applications. Springer Science & Business Media, (2012).
- [2] G.F. Knoll. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, (2010).
- [3] ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60, Annals of the ICRP, Pergamon Press, Oxford, 21 (1991)1-3.
- [4] IAEA. TECDOC-953. International Atomic Energy Agency, Vienna. IAEA (2006).
- [5] H. Cember. Introduction to health physics. McGrawHill, New York, (1969).
- [6] R.L. Brent. The effect of embryonic and fetal exposure to x-ray, microwaves, and ultrasound: counseling the pregnant and nonpregnant patient about these risks. Semin Oncol, 16 (1989) 347-368.
- [7] J. Hendricks, G. McKinney, L. Waters, MCNPX User's Manual, version 2.5. 0, Los Alamos National Laboratory, (2005).
- [8] J. Eberhardt, S. Rainey, R. Stevens, B. Sowerby, and J. Tickner. Fast neutron radiography scanner for the detection of contraband in air cargo containers. Applied Radiation and Isotopes, 63 (2005) 179-188.
- [9] J.T. Bushberg, and J. M. Boone. The essential physics of medical imaging. Lippincott Williams & Wilkins, (2011).
- [10] F. Hsu, W. Lee, C. Tung, J. Lee, T. Wu, S. Hsu, H. Su, and T. Chen. Ambient and personal dose assessment of a container inspection site using a mobile X-ray system. Applied Radiation and Isotopes, 70 (2012) 456-461.
- [11] J. Rodier, and J. Chassany. Manual de Radio Protection. Malonie. SA Editor, (2007).
- [12] B.R. Archer. History of the shielding of diagnostic x-ray facilities. Health physics, 69 (1995) 750-758.