

Research Paper

Determination of the Maximum Permissible Activity of ^{60}Co Line Source for Different Application Modes of Lead Cell¹

Reza Bagheri*² and Michael Yeganeh³

Received: 2020.02.16

Accepted: 2020.07.27

Abstract

Isolation of radiation sources is one of the most important methods of the radiation protection in order to prevent harm to human beings. Usually, lead cells with plumbic brick walls are used for isolation of medium and low radiation level sources. In this research, the maximum permissible activity of ^{60}Co line source was calculated using both the analytical and Monte Carlo methods, such that the handling of this amount of activity inside the lead cell with 5 cm standard plumbic brick walls, could fulfill the accepted international criteria for lead cells application in restricted areas. The difference between the analytical and Monte Carlo results was obtained less than 16% in average. The results showed that, the activity of ^{60}Co source should be less than 5.61 and 48.25 mCi for the analytical method and less than 6.67 and 56.36 mCi for Monte Carlo method respectively at irradiate/storage and load/unload (as well as transient) operation modes. The proposed analytical method could generate MCNPX code data with relatively good approximation.

Keywords: *Lead Cell, Cobalt-60, Shielding, Buildup Factor, MCNPX.*

¹ DOI: 10.22051/jap.2020.30327.1150

² Assistant Professor, Northwest Research Complex (Bonab), Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran (Corresponding Author). Email: rzbagheri@aeoi.org.ir, reza_bagheri@aut.ac.ir.

³ Ph. D. in Electrical Engineering, Northwest Research Complex (Bonab), Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: myeganeh@aeoi.org.ir

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال دهم، پیاپی ۲۰، بهار ۱۳۹۹

مقاله پژوهشی

تعیین بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ برای وجه‌های کاربردی مختلف در داخل اتاقک سربی^۱

رضا باقری^۲ و میکائیل یگانه^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

چکیده

محصورسازی چشمه‌های تابش یکی از مهمترین روش‌های کنترل خطرات بهداشت محیط برای جلوگیری از آسیب‌رسانی به انسان‌هاست. معمولاً از اتاقک سربی با دیوارهایی از آجر سربی برای محصورسازی چشمه‌های دارای خطر پرتو زایی متوسط و کم استفاده می‌شود. در این پژوهش، بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ به دو روش تحلیلی و مونت کارلویی با استفاده از کد شبیه‌ساز MCNPX، طوری محاسبه شد که کار با این میزان از فعالیت در داخل یک اتاقک سربی با دیوارهایی از آجرهای سربی استاندارد به ضخامت ۵ سانتی‌متر، توانست استانداردهای پذیرفته‌شده بین‌المللی برای کار با اتاقک سربی در نواحی محصورشده را برآورده کند. اختلاف بین نتایج روش تحلیلی و مونت کارلو به طور میانگین کمتر از ۱۶ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که

^۱ DOI: 10.22051/jap.2020.30327.1150

^۲ استادیار، مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب)، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای،

تهران، ایران (نویسنده مسئول). reza_bagheri@aut.ac.ir, rzbagheri@aeoi.org.ir

^۳ دانش آموخته دکترا، مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب)، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون

هسته‌ای، تهران، ایران. myeganeh@aeoi.org.ir

۱۶ / تعیین بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ برای وجه‌های کاربردی مختلف در داخل ...

برای کار در وجه‌های کاربردی پرتودهی/ذخیره و نمونه‌گذاری/نمونه‌برداری و همینطور انتقال، باید میزان فعالیت چشمه در روش تحلیلی به ترتیب از ۵,۶۱ و ۴۸,۲۵ میلی کوری و در روش مونت کارلو از ۶,۶۷ و ۵۶,۳۶ میلی کوری کمتر باشد. این روش تحلیلی با تقریب نسبتاً خوبی داده‌های حاصل از کد قدرتمند MCNPX را تولید کرد.

واژگان کلیدی: اتاقک سربی، کبالت-۶۰، حفاظ‌گذاری، ضریب تولید و تابش دز، MCNPX.

۱. مقدمه

با کاربرد گسترده چشمه‌های تابش و مواد رادیواکتیو در پزشکی و صنعت و کشاورزی، مطالعه تضعیف و جذب پرتوهای ایکس و گاما و همچنین حفاظ‌گذاری در برابر آن‌ها به شاخه‌ای ضروری و مهم در زمینه حفاظت در برابر پرتوها تبدیل شده است [۱-۴].

محصورسازی چشمه‌های تابش یکی از مهمترین روش‌های کنترل خطرات بهداشت محیط برای جلوگیری از آسیب‌رسانی به انسان‌هاست [۵]. بنا بر میزان فعالیت چشمه و نوع تابش گسیل شده و حالت فیزیکی چشمه، از اشکال مختلف حفاظ از قبیل ظروف استوانه‌ای سربی و فولادی و پلی اتیلنی، محفظه دستکش دار، اتاقک سربی و یاخته داغ برای محصورسازی چشمه‌ها استفاده می‌شود [۶].

کارهای پژوهشی زیادی در ایران در زمینه حفاظت در برابر تابش‌های یونیزان انجام گرفته است. عادل و همکاران [۷]، با به‌کارگیری روش‌های نظری و شبیه‌سازی از ترکیبات مختلف بور برای حفاظ‌گذاری نوترون‌های کم‌انرژی استفاده کردند. آن‌ها همچنین با استفاده از روش مونت کارلو، قدرت تضعیف فوتون‌های ثانویه حفاظ پلیمری بر پایه رزین اپوکسی تقویت‌شده با درصد‌های وزنی مختلفی از ریزذرات اکسید تنگستن و اکسید سرب را بدون حضور جاذب نوترونی مطالعه کردند [۸]. ضرایب تضعیف جرمی ذرات نانو سرب در برابر پرتوهای گاما چشمه‌های مختلف به صورت تجربی توسط شفایی [۹] اندازه‌گیری شد. سلیمانی‌نیا و همکاران [۱۰]، حفاظ سامانه پرتودهی صنعتی چندمنظوره بناب را با استفاده از کد MCNP4C شبیه‌سازی و محاسبه کردند.

معمولاً برای نگهداری و تعویض و جابه‌جایی چشمه‌های به‌کاررفته در صنعت رادیوگرافی از قبیل چشمه‌های کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷، ایریدیم-۱۹۲، که پرتوایی آن‌ها خیلی هم شدید نباشد از اتاقک‌های سربی با دیوارهایی از جنس سرب استفاده می‌شود. چشمه کبالت-۶۰ با نیمه عمر ۵/۲۷

سال و با دو پرتوی گامای نافذ ۱/۱۷ و ۱/۳۳ مگاالکترونولت، برای استریل کردن تجهیزات پزشکی، به عنوان چشمه تابش در رادیوتراپی و رادیوگرافی صنعتی، برای تجهیزات سطح و ضخامت و چگالی سنجی و همچنین جهت پرتودهی مواد غذایی و خون و ... استفاده می شود [۱۱]. متأسفانه، کارهای تحقیقاتی زیادی در زمینه شبیه سازی و طراحی و ساخت اتاقک های سربی در کشور انجام نگرفته است. در این مقاله برای اولین بار بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله ای کبالت-۶۰ به دو روش تحلیلی و مونت کارلویی (با استفاده از کد شبیه ساز MCNPX) طوری محاسبه می شود که کار با این میزان از فعالیت در داخل یک اتاقک سربی با دیوارهایی از آجرهای سربی استاندارد (به ضخامت ۵ سانتی متر) و دربرگیرنده شیشه سربی، دستک های فولادی، دستکش ها، دریچه ها و درها و درپوش ها، بتواند استانداردهای مقبول بین المللی را برای کار با اتاقک سربی در نواحی محصور شده برآورده کند.

به منظور ترابرد پرتوهای گامای گسیل شده از چشمه و مقایسه آن با روش تحلیلی، کد محاسباتی MCNPX برای شبیه سازی در نظر گرفته شد. این کد محاسباتی چندمنظوره که بر پایه فن مونت کارلو استوار است، برای شبیه سازی برهمکنش انواع تابش ها با ماده و ترابرد آن ها در تمام انرژی ها به کار می رود. این کد از کتابخانه های مربوط به سطح مقطع هسته ای و مدل های فیزیکی برای برهمکنش های ذرات بهره می برد و کمیت های مدنظر را با خطای معینی محاسبه می کند [۱۲].

۲. مواد و روش ها

الف. محاسبات تحلیلی

اگر تراکم خطی فعالیت چشمه گامای گسیلی با قدرت Γ ، برابر با C_1 مگابکرل یا کوری در واحد طول باشد، نواخت دز در نقطه p که به فاصله h از طول بی نهایت کوچک dl قرار دارد (شکل ۱)، عبارت خواهد شد از:

$$dD_p = \frac{\Gamma \times C_1 \times dl}{l^2 + h^2} \quad (1)$$

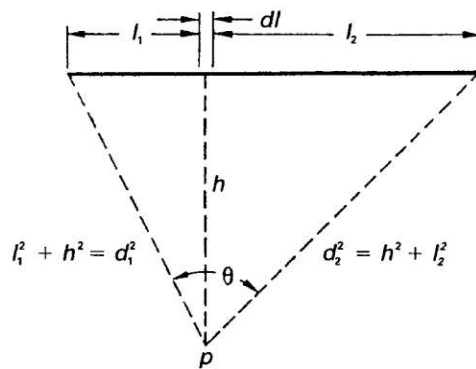
و نواخت دز ناشی از فعالیت کل طول لوله برابر می شود با [۶]:

$$D_p = \Gamma \times C_1 \left(\int_0^{l_1} \frac{dl}{l^2 + h^2} + \int_0^{l_2} \frac{dl}{l^2 + h^2} \right) = \frac{\Gamma \times C_1}{h} \times (\tan^{-1} \frac{l_1}{h} + \tan^{-1} \frac{l_2}{h}) = \frac{\Gamma \times C_1 \times \theta}{h} \quad (2)$$

۱۸ / تعیین بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ برای وجه‌های کاربردی مختلف در داخل ...

در این رابطه، θ بر حسب رادیان است. تراکم خطی فعالیت چشمه از رابطه زیر به دست می‌آید که A و l به ترتیب فعالیت و طول چشمه میله‌ای هستند:

$$C_l = \frac{A}{l} \quad (3)$$



شکل ۱ نمایش هندسی چشمه خطی برای محاسبه نواخت دز در نقطه p.

در شرایط هندسی خوب، تضعیف باریکه‌ای موازی از پرتوهای گاما از رابطه زیر به دست می‌آید:

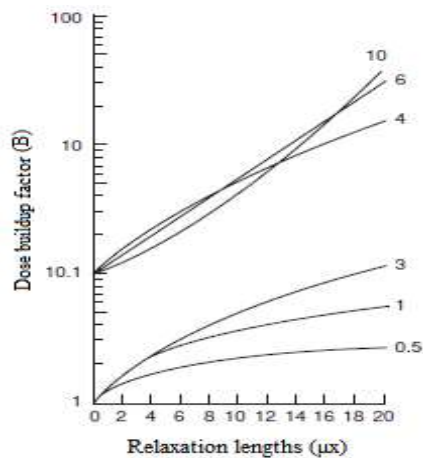
$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (4)$$

که در آن، I_0 و I شدت پرتوهای فرودی و خروجی از جاذب و μ ضریب تضعیف خطی و t ضخامت جاذب است. اما در شرایط هندسی بد یعنی در حالتی که با باریکه‌ای گسترده یا جذب کننده‌ای خیلی ضخیم کار می‌کنیم، این معادله ضخامت حفاظ را کمتر از مقدار لازم برآورد می‌کند. لذا در شرایط هندسی بد با تعدیل معادله (۴) به صورت زیر و استفاده از ضریب تولید و انباشت دز، B ، می‌توان ضخامت حفاظ لازم را برآورد کرد [۶]،

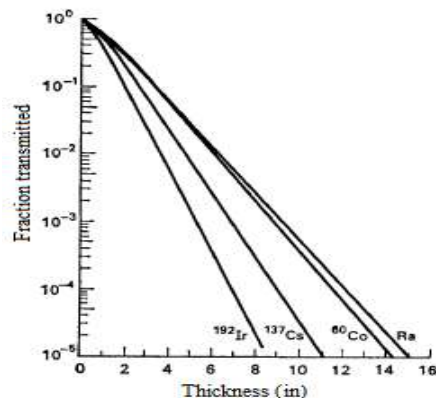
$$I = B \times I_0 e^{-\mu t} \quad (5)$$

ضرایب تولید و انباشت دز برای انرژی‌های مختلف پرتو گاما و جاذب‌های مختلف محاسبه شده و در منحنی‌هایی بر حسب طول واهلش ارائه شده است. شکل ۲ ضریب تولید و انباشت دز را در سرب برای چشمه همسانگرد پرتو گاما با انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد.

همچنین، شکل ۳ تضعیف باریکه‌های پهن پرتوهای گامای ناشی از چشمه‌های کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷، ایریدیم-۱۹۲ و رادیوم را در حفاظ آهنی (مشابه استیل‌های استفاده شده در این مسئله) نشان می‌دهد.



شکل ۲ ضریب تولید و انباشت در سرب برای چشمه همسانگرد پرتو گاما [۶].



شکل ۳ عبور نسبی پرتوهای گامای ناشی از چشمه‌های کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷، ایریدیم-۱۹۲ و رادیوم در حفاظ آهنی [۶].

۵. شبیه‌سازی با کد MCNPX

برای مقایسه با نتایج تحلیلی سعی کردیم با استفاده از کد قدرتمند MCNPX نیز، مقدار دز معادل دریافتی را در بیرون از اتاقک سربی و در فواصل ۵ و ۳۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از دیواره بیرونی یاخته سربی شبیه‌سازی کنیم. بدین منظور، به ترتیب از داخل به خارج از یک لایه پلکسی گلس به ضخامت ۱ سانتی‌متر، لایه هوا به ضخامت ۲ سانتی‌متر، لایه استیل شماره ۳۰۴ به ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر به عنوان فضای داخلی اتاقک، دیوار آجر سربی استاندارد به ضخامت ۵ سانتی‌متر و ۰/۵ سانتی‌متر استیل معمولی به عنوان روکش بیرونی اتاقک استفاده کردیم. همچنین پنجره از جنس

۲۰ / تعیین بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ برای وجه‌های کاربردی مختلف در داخل ...

شیشه سربی به ضخامت ۱۱ سانتی‌متر، توپک‌های فولادی دستک‌ها، درپچه‌های درها و دستکش‌های راست و چپ روی دیواره اتاقک سربی همراه با درپوش‌های مربوط (به‌منظور جابه‌جایی چشمه در داخل اتاقک سربی) شبیه‌سازی شد. علاوه بر این، یک فضای خالی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در بالای اتاقک سربی برای تعبیه روشنایی و سایر تجهیزات الکتریکی همراه با درپچه هود مطابق با شرایط استاندارد اتاقک سربی طراحی شد. ابعاد داخلی اتاقک سربی حدود ۱/۵×۱/۵×۱ مترمکعب در نظر گرفته شد. جدول ۱ ترکیب عنصری مواد به کاررفته را در کارت مواد کد MCNPX و چگالی آن‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۱ درصد وزنی عناصر در مواد به کاررفته در شبیه‌سازی.

مواد	چگالی (g/cm ^۳)	H	C	N	O	Si	Ar	Cr	Mn	Fe	Ni	Pb
هوا	۰/۰۰۱۲	---	۰/۰۱	۲۳/۱۸۷۵/۵۳	---	۱/۲۸	---	---	---	---	---	---
پلکسی گلس	۱/۱۹	۸/۰۵	۵۹/۹۸	---	۳۱/۹۶	---	---	---	---	---	---	---
شیشه سربی	۵/۲	---	---	---	---	۲۸/۰۵۳۴/۸۲	---	---	---	---	---	۳۷/۱۳
استیل ۳۰۴	۷/۹۲	---	---	---	---	---	---	---	۹/۵۰۶۹/۵۰۲/۰۰۱۹/۰۰	---	---	---
استیل معمولی	۷/۸۲	---	۰/۵۰	---	---	---	---	---	---	---	---	۹۹/۵۰

چشمه را به صورت پوسته‌ای استوانه‌ای از جنس کبالت و به ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۱۸۷ میلی‌متر حاوی رادیویزوتوپ کبالت-۶۰ در نظر گرفتیم، که روی میله فولادی (به شعاع ۳/۵ میلی‌متر) و زیر پوسته استوانه‌ای از جنس استیل معمولی (به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر) به عنوان نگهدارنده چشمه قرار گرفته است. فرض کردیم که چشمه به طور همگن در پوسته استوانه‌ای توزیع شده و به صورت همسانگرد در تمامی جهت‌ها پرتوی گاما گسیل می‌کند. به منظور محاسبه مقدار دز دریافتی معادل نیز از کره‌ای به شعاع ۲ سانتی‌متر (حدود حجم حساس یک دزیمتر) پر شده از آب و همچنین تالی F8* استفاده کردیم. این تالی میزان انرژی جذب شده در یاخته را بر حسب مگاالکترون‌ولت محاسبه می‌کند [۱۲]. شبیه‌سازی با استفاده از حدود ۱ میلیون تاریخچه دنبال شد و نتایج با خطای کمتر از ۱ درصد گزارش شد.

ج. استاندارد دز معادل در طراحی اتاقک سربی

با توجه به سند مؤسسه استانداردهای ملی آمریکا به شماره ۴۳,۷-۲۰۰۷ ANSI/HPS N و تحت عنوان طراحی و به کارگیری ایمن پرتودهنده‌های خودنگهدارنده و ذخیره کننده چشمه خشک

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهراء، سال دهم، پیاپی ۲۰، بهار ۱۳۹۹ / ۲۱

(دسته شماره ۱)، میزان دز مجاز در اطراف اتاقک سربی برای نواحی محصور شده و محصور نشده در فواصل مختلف از اتاقک سربی به شرح جدول ۲ می باشد [۱۳].
در ادامه، از این سند استاندارد برای محاسبه بیشترین فعالیت مجاز چشمه کبالت-۶۰ با قابلیت به کارگیری در وجه های کاربردی مختلف در داخل اتاقک سربی با دیوارهایی از آجر سربی استاندارد به ضخامت ۵ سانتی متر و برای نواحی محصور شده (حیطه کاری پرتوکاران) استفاده خواهیم کرد.

جدول ۲ میزان دز معادل مجاز برای وجه های کاربردی مختلف [۱۳].

وجه کاربرد ^۱	فاصله از سطح اتاقک سربی (سانتی متر)	بیشترین سطح تابش مجاز (میلی سیورت در ساعت)	
		نواحی محصور نشده	نواحی محصور شده
پرتو دهی / ذخیره	۱۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۲
	۳۰	۰/۰۰۵	۰/۰۵
	۵	۰/۰۲	۰/۲
نمونه گذاری / نمونه برداری	۱۰۰	۰/۰۱	۰/۱
	۳۰	۰/۰۲۵	۰/۲۵
	۵	۰/۲	۲
انتقال	۱۰۰	۰/۰۱	۰/۱
	۳۰	۰/۰۲۵	۰/۲۵
	۵	۰/۲	۲

۳. نتایج

الف. روش تحلیلی

ضریب تضعیف خطی سرب برای پرتوی گامای ۱/۳۳ مگاالکترون ولت تقریباً برابر با 0.66 cm^{-1} است [۶]. طول واهلش که به صورت عکس ضریب تضعیف خطی تعریف می شود برابر $1/515$ سانتی متر خواهد شد. همچنین، ضخامت دیواره سربی استاندارد به کاررفته $3/3 (= 1/515 \times 5)$ برابر طول واهلش خواهد بود. لذا ضریب تولید و انباشت دز با استفاده از شکل ۲ و برای پرتوهای گامای ۱/۳۳ مگاالکترون ولت برابر $2/2$ به دست می آید.

پس از قرار دادن مقادیر ضریب تولید و انباشت دز و ضخامت دیواره سربی در معادله ۵ و همچنین مقدار نواخت دز معادل مجاز (I) از جدول ۲ در نقطه p و در فواصل ۵ و ۳۰ و ۱۰۰

¹ Operation mode

۲۲ / تعیین بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ برای وجه‌های کاربردی مختلف در داخل ...

سانتی‌متری از دیواره بیرونی اتاقک سربی، مقدار نواخت دز معادل فرودی (I_0) در این فواصل و بدون حضور حفاظ سربی به دست خواهد آمد. از آنجا که، حدود یک سانتی‌متر حفاظ فولادی اضافه نیز جلوی پرتوهای گاما قرار دارد (لایه استیل شماره ۳۰۴ به عنوان فضای داخلی اتاقک سربی و استیل معمولی به عنوان روکش بیرونی هر دو به ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر)، اثر تضعیف آن را نیز باید لحاظ کنیم. از شکل ۳، میزان عبور نسبی پرتوهای گامای چشمه کبالت-۶۰ از حفاظ آهنی به ضخامت ۱ سانتی‌متر حدود ۸۰٪ به دست می‌آید. با اعمال ضریب تصحیح مناسب ($1/25 = 80 \div 100$) در مقدار نواخت دز معادل فرودی (I_0) به دست آمده از حضور دیوار سربی، اثر حفاظ فولادی نیز لحاظ می‌شود. شایان ذکر است که در جدول ۲ مقدار نواخت دز معادل مجاز (I) برای وجه‌های کاربردی مختلف مقادیر متفاوتی است، لذا مقدار نواخت دز معادل فرودی (I_0) برای وجه‌های کاربردی متفاوت محاسبه شده و در جدول ۳ آورده شده است. به علت یکسان بودن مقدار نواخت دز معادل وجه‌های کاربردی نمونه‌گذاری/نمونه‌برداری و انتقال، نتایج آن‌ها در یک ردیف آورده شده است.

جدول ۳ نواخت دز معادل فرودی (I_0) و نواخت پرتوگیری (D_p)

متناظر برای وجه‌های کاربردی مختلف.

وجه کاربرد	فاصله از سطح اتاقک سربی (سانتی‌متر)	I_0 (mSv/h)	D_p (R/h)
پرتودهی/ذخیره	۱۰۰	۰/۳۰۸	۰/۰۳۲
	۳۰	۰/۷۷۰	۰/۰۸۱
	۵	۳/۰۸۱	۰/۳۲۴
نمونه‌گذاری/نمونه‌برداری و انتقال	۱۰۰	۱/۵۴۰	۰/۱۶۲
	۳۰	۳/۸۵۱	۰/۴۰۵
	۵	۳۰/۸۱۰	۳/۲۴۳

در امور مربوط به حفاظت در برابر تابش، دز معادل ۹/۵ میلی‌سیورت (۰/۹۵ رم) برای بافت نرم معادل ۱ رونتگن (R) پرتوگیری در هواست [۶]. با استفاده از این ضریب تبدیل، مقادیر پرتوگیری (D_p) متناظر دز معادل نیز در جدول ۳ برحسب رونتگن در ساعت محاسبه شده است. در این کار تحقیقاتی، نقطه p از وسط میله کبالت-۶۰ و در فواصل ۵ و ۳۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خارجی اتاقک سربی در نظر گرفته شد. همچنین در محاسبات محافظه کارانه‌ترین حالت ممکن لحاظ شد، یعنی حالتی که در آن میله کبالت-۶۰ موجود در داخل اتاقک سربی در کمترین

فاصله ممکن از پرتوکار قرار داشته باشد (چشمه چسبیده به سطح داخلی اتاقک سربی). تحت این شرایط فاصله نقطه p از وسط چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ (h) به طول (l) ۰/۱۸۷ متر از مجموع ضخامت‌های پلکسی گلس (۱ سانتی‌متر)، لایه هوا (۲ سانتی‌متر)، استیل شماره ۳۰۴ داخلی (۰/۵ سانتی‌متر)، دیواره آجر سربی استاندارد (۵ سانتی‌متر)، استیل معمولی به عنوان روکش بیرونی (۰/۵ سانتی‌متر) و فاصله نقطه p مدنظر از سطح بیرونی اتاقک سربی به دست می‌آید. بنابراین، فاصله نقطه p از وسط میله خطی تابش (h) برای فواصل ۵ و ۳۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح بیرونی اتاقک سربی به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۳۹ و ۱/۰۹ متر به دست خواهد آمد. همچنین زوایای θ بر حسب رادیان برای سه فاصله مذکور از سطح خارجی اتاقک سربی به ترتیب برابر با ۱/۱۴۵ و ۰/۴۶۵ و ۰/۱۷۰ رادیان به دست می‌آید. گسیل ویژه پرتوی گاما نیز برای چشمه کبالت-۶۰ برابر است با [۶]:

$$\Gamma = 1.32 \frac{R.m^2}{Ci.h}$$

با قرار دادن کمیت‌های محاسبه‌شده در رابطه ۲، تراکم خطی فعالیت چشمه گامای گسیلی (G_1) و در نتیجه بیشترین فعالیت مجاز چشمه میله‌ای مدنظر مسئله (به طول ۰/۱۸۷ متر) مطابق با استانداردهای پذیرفته بین‌المللی برای کاربرد در داخل اتاقک سربی (اینجا با دیوارهایی از آجر سربی استاندارد به ضخامت ۵ سانتی‌متر) و برای نواحی محصورشده به دست خواهد آمد. جدول ۴، تراکم خطی فعالیت چشمه و بیشینه مقدار فعالیت مجاز چشمه را در وجه‌های مختلف به کارگیری چشمه نشان می‌دهد.

جدول ۴ تراکم خطی فعالیت چشمه و بیشینه مقدار فعالیت مجاز چشمه کبالت-۶۰

در وجه‌های کاربردی مختلف.

وجه کاربرد	فاصله از سطح اتاقک سربی (سانتی‌متر)	C_1 (Ci/m)	A (mCi)
پرتودهی/ذخیره	۱۰۰	۰/۱۵۸	۲۹/۵۵
	۳۰	۰/۰۵۱	۹/۵۴
	۵	۰/۰۳۰	۵/۶۱
نمونه‌گذاری/نمونه‌برداری و انتقال	۱۰۰	۰/۷۹۰	۱۴۷/۷۳
	۳۰	۰/۲۵۸	۴۸/۲۵
	۵	۰/۳۰۱	۵۶/۲۹

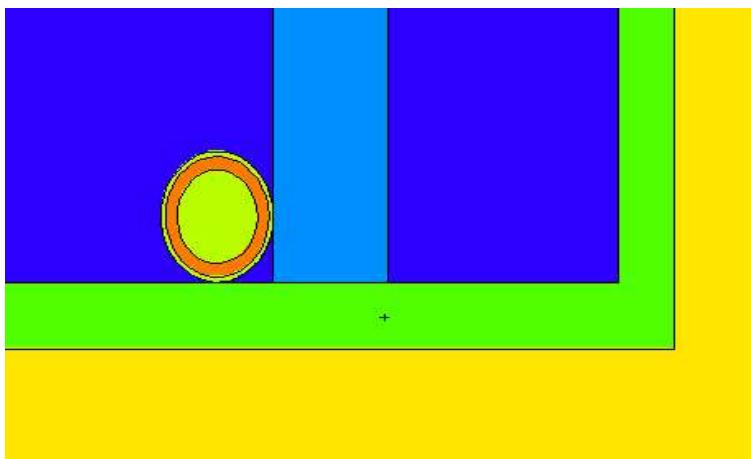
همانطور که نتایج به دست آمده از روش تحلیلی در جدول ۴ نشان می‌دهد، برای کار با چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ به طول ۱۸۷ میلی‌متر در داخل اتاقک سربی با دیوارهایی از آجرهای سربی

۲۴ / تعیین بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ برای وجه‌های کاربردی مختلف در داخل ...

استاندارد با ضخامت ۵ سانتی‌متر لازم است که برای کار در وجه‌های کاربردی پرتودهی/ذخیره و نمونه‌گذاری/نمونه‌برداری و همینطور انتقال، میزان فعالیت چشمه به ترتیب از ۵/۶۱ و ۴۸/۲۵ میلی کوری کمتر باشد تا در هر سه فاصله ۵ و ۳۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری شرایط قیدشده در استانداردهای مربوطه برآورده شده و کار کردن با چنین چشمه‌ای از لحاظ فیزیک بهداشت بدون مشکل باشد.

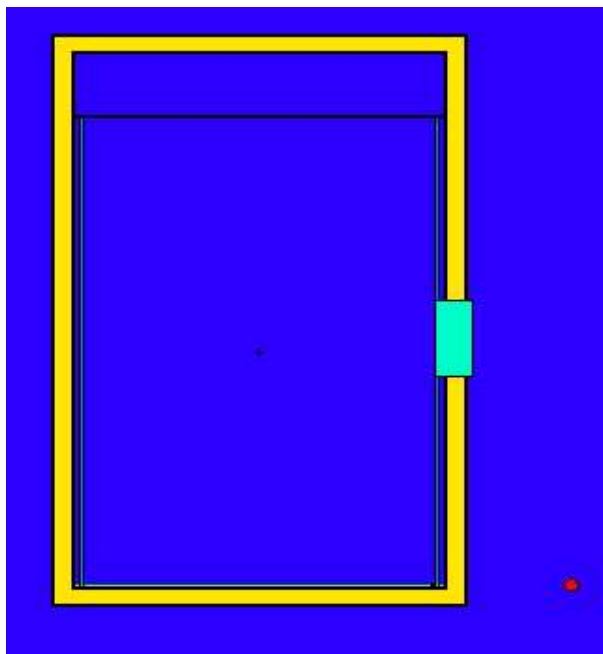
ب. روش مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX

در این روش نیز چشم I میله‌ای کبالت-۶۰ در کمترین فاصله ممکن از پرتوکار (چسبیده به سطح داخلی اتاقک سربی) قرار داده شد. مکان چشمه شامل میله فولادی مرکزی، پوسته استوانه‌ای حاوی کبالت-۶۰ و پوسته استیل بیرونی محافظ همراه با پلکسی گلس، استیل شماره ۳۰۴، فضای داخلی اتاقک و بخشی از دیواره سربی در شکل ۴ نشان داده شده است.

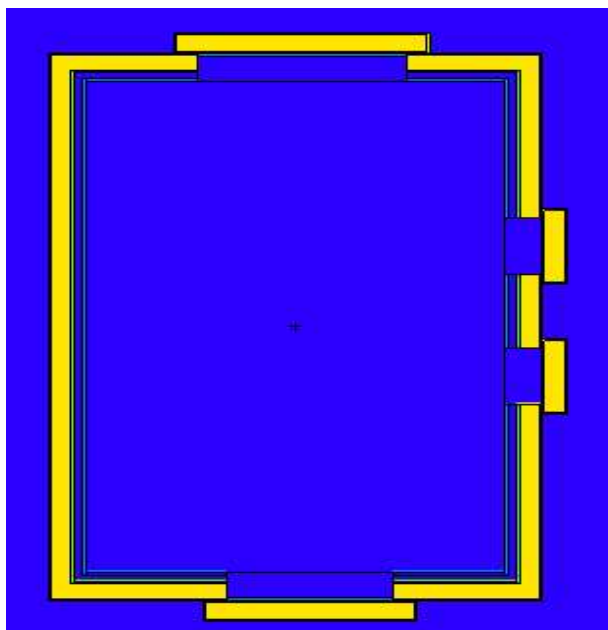


شکل ۴ مکان قرارگیری چشمه در داخل اتاقک سربی.

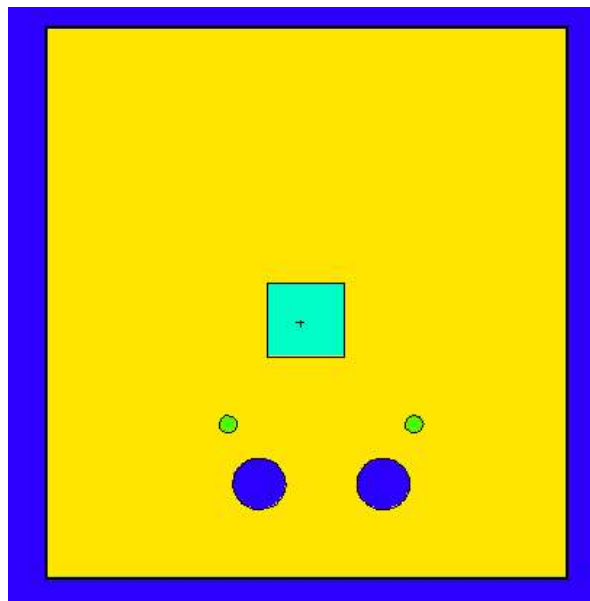
شکل‌های ۵ و ۶ و ۷ نمای اتاقک سربی را از مقطع‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۵، محل قرارگیری محفظه خالی بالای اتاقک سربی، پنجره سربی، پلکسی گلس و کره دزیتری دیده می‌شود. درهای سمت راست و چپ و محل قرارگیری دریچه دستکش‌ها همراه با درپوش‌های مربوط در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین مکان دستکش‌ها و توپک‌های فولادی دستکش‌ها همراه با پنجره سربی در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۵ برش مقطعی XZ از یاخته سربی.



شکل ۶ برش مقطعی XY از یاخته سربی.



شکل (۷): برش مقطعی YZ از یاخته سربی.

مقادیر خروجی کد (میزان انرژی انباشته شده در کره دزیمتری بر حسب مگاالکترون‌ولت) در فواصل ۵ و ۳۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خارجی اتاقک سربی به ترتیب برابر $۲/۳۵ \times ۱۰^{-۵}$ و $۳/۴۹ \times ۱۰^{-۷}$ و $۴/۴۱ \times ۱۰^{-۷}$ به دست می‌آید. با تبدیل مقادیر به دست آمده بر حسب ژول ($۱ \text{ MeV} = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۳} \text{ J}$) و تقسیم بر جرم یاخته دزیمتری مدنظر ($۳۳/۴۹ \times ۱۰^{-۳}$ کیلوگرم)، مقدار دز جذبی بر حسب گری^۱ بر تاریخچه به دست خواهد آمد. چون در این مسئله با پرتوهای گاما سروکار داریم، لذا ضریب کیفیت (Q) برای این پرتوها برابر یک بوده و نتایج مستقیماً برابر مقدار دز معادل بر حسب سیورت بر تاریخچه خواهند بود.

از آنجا که کد MCNPX خروجی مدنظر را بر پایه میزان متوسط ترابرد فقط یک ذره (یا تاریخچه) به دست می‌دهد و رادیوایزوتوپ کبالت-۶۰ نیز در هر واپاشی دو پرتو گاما به صورت آنی گسیل می‌کند، لذا خروجی کد باید در عدد ۲ ضرب شود تا دز معادل بر حسب سیورت به‌ازای هر واپاشی به دست آید. با تقسیم دز مجاز در فواصل مختلف اطراف اتاقک سربی برای نواحی محصورشده از جدول ۲، بر مقادیر دز معادل به دست آمده از کد بر حسب میلی‌سیورت بر واپاشی و استفاده از ضریب تبدیل مناسب ($۱ \text{ mCi} = ۱/۳۷ \times ۱۰^۷ \text{ Bq}$)، بیشترین فعالیت مجاز چشمه میله‌ای در وجه‌های کاربردی مختلف در داخل اتاقک سربی (با دیوارهایی از آجر سربی استاندارد

^۱ Gray

به ضخامت ۵ سانتی متر) برای نواحی محصور شده به دست خواهد آمد. جدول ۵، دز معادل بر حسب میلی سیورت به ازای هر واپاشی (H) و بیشینه مقدار فعالیت مجاز چشمه را در وجه‌های مختلف به کارگیری چشمه نشان می‌دهد. همچنین اختلاف بین مقادیر روش تحلیلی و مونت کارلو بر حسب درصد در ستون آخر جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵ دز معادل بر حسب سیورت به ازای هر واپاشی (H) و بیشینه مقدار فعالیت مجاز چشمه در وجه‌های کاربردی مختلف.

RD (%)	A (mCi)	H (mSv/decay)	فاصله از سطح اتاقک سربی (سانتی متر)	وجه کاربرد
۱۷/۱۳	۳۵/۶۶	$4/21 \times 10^{-15}$	۱۰۰	پرتودهی/ذخیره
۱۵/۳۵	۱۱/۲۷	$3/33 \times 10^{-14}$	۳۰	
۱۵/۸۹	۶/۶۷	$2/25 \times 10^{-13}$	۵	
۱۷/۱۵	۱۷۸/۳۲	$4/21 \times 10^{-15}$	۱۰۰	نمونه‌گذاری/نمونه‌برداری و انتقال
۱۴/۳۹	۵۶/۳۶	$3/33 \times 10^{-14}$	۳۰	
۱۵/۶۴	۶۶/۷۳	$2/25 \times 10^{-13}$	۵	

همانطور که نتایج روش مونت کارلو در جدول ۵ نشان می‌دهد، برای کار با چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ به طول ۱۸۷ میلی‌متر در داخل اتاقک سربی با دیوارهایی از آجرهای سربی استاندارد با ضخامت ۵ سانتی‌متر و در وجه‌های کاربردی پرتودهی/ذخیره و نمونه‌گذاری/نمونه‌برداری و همینطور انتقال، لازم است که میزان فعالیت چشمه به ترتیب از ۶/۶۷ و ۵۶/۳۶ میلی کوری کمتر باشد تا در هر سه فاصله ۵ و ۳۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری شرایط قیدشده در استانداردهای مربوط برآورده شده و کار کردن با چنین چشمه‌ای از لحاظ فیزیک بهداشت بدون مشکل باشد. اختلاف بین مقادیر روش تحلیلی و مونت کارلو به طور میانگین کمتر از ۱۶ درصد به دست آمد. همچنین نتایج جداول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که به دلیل ساده‌سازی‌های اجتناب‌ناپذیر روش تحلیلی، روش مونت کارلو فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ را در تمامی وجه‌های کاربردی و فواصل از سطح اتاقک سربی، بیشتر از مقادیر روش تحلیلی به دست می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

همانطور که نتایج نشان می‌دهند، اختلاف نسبتاً چشمگیری بین داده‌های حاصل از روش تحلیلی و روش مونت کارلو مشاهده می‌شود (به طور میانگین کمتر از ۱۶ درصد). اختلاف نتایج به دست

۲۸ / تعیین بیشترین میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ برای وجه‌های کاربردی مختلف در داخل ...

آمده از دو روش تحلیلی و مونت کارلو اساساً به برخی ساده‌سازی‌های انجام گرفته در روش تحلیلی مربوط می‌شود تا بتوان از پیچیدگی محاسبات تا جای ممکن کاست. با این ساده‌سازی‌های اجتناب‌ناپذیر انجام گرفته در روش تحلیلی، عملاً از میزان حفاظ واقعی و مؤثر در مقابل پرتوهای گاما کاسته می‌شود که به نوبه خود میزان فعالیت مجاز چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ را کمتر از مقادیر روش مونت کارلو پیش‌بینی می‌کند.

از سوی دیگر، سعی کردیم تا حد امکان شرایط واقعی را در روش شبیه‌سازی با کد MCNPX پیاده‌سازی کرد، تا ترابرد ذرات و در نتیجه خروجی کد در شرایط مشابه حالت واقعی انجام گیرد. از جمله مهمترین ساده‌سازی‌های انجام گرفته در روش تحلیلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- چشم پوشی از غلاف استیل به ضخامت تقریبی نیم میلی‌متر به عنوان محافظ چشمه و همچنین میله فولادی نگهدارنده چشمه.
- چشم پوشی از ضخامت خود چشمه کبالت-۶۰ و اثر خودجذبی چشمه.
- چشم پوشی از پرتوهای پراکنده از سایر دیوارها و قسمت‌های اتاقک سربی.
- محاسبه ضریب تولید و انباشت دز از روی نمودار چشمه‌های نقطه‌ای به جای چشمه‌های میله‌ای به علت در دسترس نبودن.
- چشم پوشی از ضخامت ۱ سانتی‌متر پلکسی گلس و ۲ سانتی‌متر لایه هوا.

همچنین شایان ذکر است که در هر دو روش، محافظه کارانه‌ترین حالت ممکن یعنی حالتی که در آن میله کبالت-۶۰ موجود در داخل اتاقک سربی در کمترین فاصله ممکن از پرتوکار قرار داشته باشد (چشمه چسبیده به سطح داخلی اتاقک سربی) لحاظ گردید. بنابراین در حالت واقعی و با افزایش فاصله چشمه داخل اتاقک سربی از پرتوکار در حین کار، میزان آهنگ دز معادل تحویلی به پرتوکار از مقادیر محاسبه شده در فواصل ۵ و ۳۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری نیز به مراتب کمتر خواهد بود و در نتیجه، بیشینه فعالیت مجاز چشمه میله‌ای نیز افزایش خواهد یافت.

۵. منابع

- [1] Akkurt I, Akyldrm H, Mavi B., Kilincarslan S, Basyigit C., "Photon attenuation coefficients of concrete include barite in different rate", *Ann. Nucl. Energy* 37 (2010) 910-914.
- [2] Sharifi S., Bagheri R., Shirmardi S.P., "Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental Results", *Ann. Nucl. Energy* 53 (2013) 529-534.
- [3] Bootjomchai C., Laopaiboon J., Yenchai C., Laopaiboon R., "Gamma-ray shielding and structural properties of barium-bismuth-borosilicate glasses", *Radiat. Phys. Chem.* 81 (2012) 785-790.

- [4] Singh V.P., Badiger N.M., "Effective atomic numbers, electron densities, and tissue equivalence of some gases and mixtures for dosimetry of radiation detectors", *Nucl. Technol. Radiat.* 27 (2012) 117-124.
- [5] Demir F., Budak G., Sahin R., Karabulut A., Oltulu M., Un A., "Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight- and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 MeV c-rays," *Ann. Nucl. Energy* 38 (2011) 1274-1278.
- [6] Cember H., Johnson T.E., *Introduction to Health Physics*, (McGraw-Hill Companies, Inc. 2009).
- [7] Adeli R., Bagheri R., Shirmardi S.P., "Theory and simulation investigation of low-energy neutron shielding for different boron compounds", *J. Test. Eval.* 45 (2017) 1570-1576.
- [8] Adeli R., Shirmardi S.P., Ahmadi S.J., Mazinani S., "High energetic gamma attenuating from a neutron field using a lead free reinforced composite", *J. Nucl. Sci. Tehnol.* 15 (2016) 22-29 (In Persian).
- [9] Shafaei M.A., "Assessment of mass attenuation coefficient of lead nanoparticles for variety of gamma source", *J. Radiat. Nucl. Technol.* 2 (2016) 38-47 (In Persian).
- [10] Soleimaninia M., Ahmadi M., Zarei S., "Calculation and simulation of the designed shield for gamma industrial irradiator in Bonab", *J. Radiat. Nucl. Technol.* 2 (2015) 55-62 (In Persian).
- [11] Stankovic S.J., Ilic R.D., Jankovic K., Bojovic D., Longar B., "Gamma radiation absorption characteristics of concrete with components of different type materials", *Acta Phys. Pol. A* 117 (2010) 812-816.
- [12] Shultis J.K., Faw R.E., "An MCNP primer", Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University, Manhattan, KS 66506, (2004).
- [13] ANSI, American National Standards Institute, Inc., Safe Design and Use of Self-Contained, Dry Source Storage Irradiators (Category I). Health Physics Society, ANSI/HPS N43.7 (2007).