

طراحی و تجزیه و تحلیل حفاظ اتاقک سربی و سلول داغ نوعی مورد استفاده در تولید رادیوایزوتوپ

ابوذر کیانی^{۱*}، رضا پور ایمانی^۱، علی بهرامی سامانی^۲ و سید میلاد میرعماد^۳

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، ایران.

^۲ پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران.

* اراک، دانشگاه اراک، گروه فیزیک، کد پستی: ۳۸۴۸۱۷۷۵۸۴

پست الکترونیکی: Aboo_kiyani @ gmail.com

چکیده

برای انجام فرآیندهای شیمی تابشی جهت استحصال رادیوایزوتوپ مدنظر از هدف داغ، به تجهیزاتی موسوم به اتاقک سربی و سلول داغ نیاز است. طراحی و حفاظ گذاری صحیح این تجهیزات، با هدف کاهش پرتوگیری کارکنان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، بر اساس گام‌آزایی هدف داغ مورد استفاده در فرآیند تولید مولیبدن-۹۹، محاسبات مربوط به طراحی حفاظ مناسب برای اتاقکی با ابعاد معین، از جنس بتون-باریت جهت ساخت سلول داغ و از جنس سرب جهت ساخت اتاقک سربی، انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی با کد مونت کارلوی MCNP۶.۲ نشان می‌دهد که ضخامت حفاظ جهت محدود نمودن نرخ دز به $10 \mu\text{Sv/h}$ ، به ترتیب برای ساخت سلول داغ و اتاقک سربی برابر 90 cm و 24 cm می‌باشد.

کلیدواژگان: حفاظ سازی، MCNP۶.۲، سلول داغ، اتاقک سربی، مولیبدن-۹۹.

۱. مقدمه

چشمه‌ی پرتوزا و کاهش زمان کار با چشمه، نقش مهم‌تری در حفاظت پرتویی ایفا می‌کند [۱، ۲]. در واقع لازم است که پردازش و انجام فرآیند بر روی مواد پرتوزا جهت تولید محصول خاص، در محفظه‌های کنترل^۱، سلول داغ^۲ و یا اتاقک سربی^۳ انجام شود. محفظه‌ی کنترل، محفظه‌ای با قاب استیل و دیواره‌های شیشه‌ای است که به دستکش‌های مخصوصی مجهز شده است. معمولاً

به‌منظور ساخت چشمه‌های پرتوزا برای کاربردهای پزشکی و صنعتی و یا تولید رادیوداروها که الزاماً در این موارد پردازشی بر روی مواد پرتوزا انجام می‌گیرد، قبل از هر اقدامی باید ایمنی پرتویی اپراتورها و کارکنان مطابق با الزامات بین‌المللی و ملی تأمین گردد. در این شرایط حفاظ گذاری ناحیه‌ی انجام فرآیند و منابع پرتوزا، نسبت به دو عامل افزایش فاصله اپراتور تا

² Hot cell

³ Lead cell

¹ Glovebox

بازرسی سوخت مصرف‌شده، بررسی مواد پس از تابش^۴ و ساخت سوخت استفاده می‌شوند [۵، ۴].

نوع فرآیند و تجهیزات لازم، سطح پرتوایی مواد دخیل در فرآیند، فضای مورد نیاز و چگونگی دسترسی به تجهیزات، از جمله مواردی هستند که در انتخاب محفظه‌ی کنترل، اتاقک سربی و سلول داغ دارای اهمیت هستند. برای تولید رادیوایزوتوپ مولیبدن-۹۹ به روش شکافت، لازم است هدف‌های LEU در راکتور پرتودهی شوند، که در نتیجه آن محصولات شکافت متعددی در هدف‌ها شکل می‌گیرد. به‌علاوه فرآیند شیمی تابشی^۵ مرتبط با استحصال مولیبدن-۹۹ از هدف‌های داغ طی چندین مرحله، شامل انحلال، جداسازی و تخلیص انجام می‌گیرد که هر بخش به تجهیزات و فضای خاصی نیاز دارد. در چنین تأسیساتی، پسماندهای جامد، مایع و گاز با سطوح فعالیت متوسط و کم تولید می‌شوند که بعضاً نیاز است به‌منظور تأخیر واپاشی در مجموعه نگهداری شوند. با این توضیحات، می‌توان نتیجه گرفت که برای تولید مولیبدن-۹۹ به روش شکافت، به سلول داغ و اتاقک سربی مجهز نیاز است.

حفاظ سازی ایمن محل کار برای کار کردن با منابع پرتوزا، کنترل و هدایت خودکار فعالیت‌ها، داشتن میزان دز ایمن در فضایی مراقبت شده، به حداقل رساندن پرتوهای پرخطر، ابعاد اختیاری، طراحی سفارشی و امکان پیکربندی چندین سلول، وجود ابزارهایی برای تسریع کردن و کاربردی کردن فعالیت‌ها و اندازه‌گیری دز داخل و خارج سلول داغ با سیستم مانیتورینگ، از جمله مزیت‌های استفاده از سلول‌های داغ هستند [۸-۶].

فضای داخلی سلول‌های داغ متناسب با فرآیند تولید و تجهیزات مرتبط با آن و همچنین توجه به رویکردهای مدیریت

حفاظ گذاری محفظه‌های کنترل، بسته به نوع و فعالیت ماده‌ی پرتوزای مورد استفاده، به‌صورت موضعی و با آجرها و شیشه‌های سربی انجام می‌شود. اتاقک‌های سربی، محفظه‌هایی هستند که اتاقک استیل آن‌ها با ضخامت مشخصی از سرب به‌صورت دائمی احاطه شده است. اتاقک‌های سربی معمولاً مجهز به دستواره‌هایی می‌باشند که انجام فرآیند در اتاقک سربی را برای اپراتور راحت‌تر می‌کند. چگونگی انجام فرآیند از پنجره‌ی سربی اتاقک‌های سربی قابل رؤیت است. هرچند سلول‌های داغ از برخی جهات شبیه اتاقک‌های سربی هستند، اما دارای ابعاد بزرگ‌تر و ساختار به‌مراتب پیچیده‌تری هستند. در واقع سلول داغ یک محفظه‌ی حفاظ گذاری شده‌ی مجهز به دستواره‌های الکترومکانیکی و پنجره‌های سربی مناسب است که ضمن تضمین اجرایی نمودن فرآیند، از پرتوگیری بیش‌ازحد مجاز اپراتورها جلوگیری می‌کند [۳]. چندین نوع سلول داغ مانند سلول‌های آلفا-گاما، بتا-گاما و آلفا-بتا-گاما وجود دارند. این نوع سلول‌های داغ با حفاظ زیست محیطی در برابر پرتوهای آلفا، بتا و گاما شناسایی می‌شوند [۴]. علاوه بر این، زیرساخت سلول‌های داغ، آن‌ها را قادر می‌سازد تا مقادیر و انواع رادیوایزوتوپ‌های خطرناک را در داخل فضای بسته کنترل کنند. به‌طورکلی هدف اصلی از طراحی و توسعه سلول داغ و اتاقک سربی، فراهم کردن ابزاری برای تولید رادیوایزوتوپ‌های کاربردی می‌باشد. در آژانس هسته‌ای مالزی از یک سلول داغ موقت برای تولید ایزوتوپ‌های ^{99m}Tc و ^{131}I همچنین کارهای تحقیقاتی دیگر استفاده می‌شود [۴]. همچنین از سلول داغ دائمی در کنار راکتورهای تحقیقاتی نیز استفاده می‌شود که برای نمونه می‌توان به سلول داغ راکتور آزمایشی مواد ژاپن^۱، آزمایشگاه رودخانه چالک^۲ و راکتور کاربردی کره^۳ اشاره کرد. این سلول‌های داغ معمولاً برای فعالیت‌های تحقیقاتی مانند

⁴ Post Irradiation Material Examination (PIE)

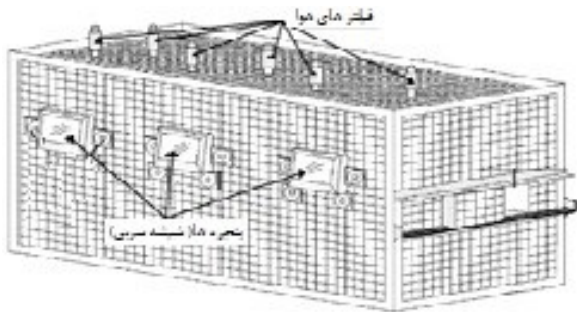
⁵ Radiochemistry

¹ Japan Material Testing Reactor (JMTR)

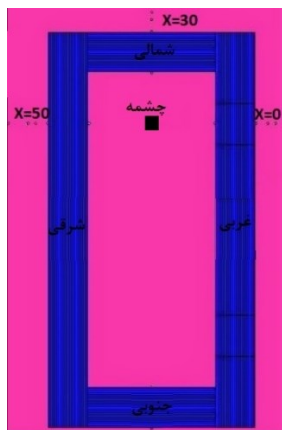
² Chalk River Laboratories (CRL)

³ HANARO (KAERI)

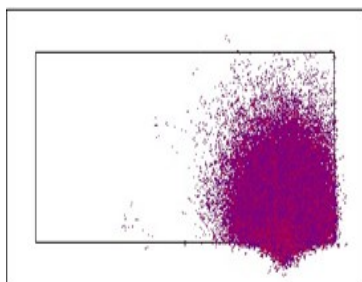
۹۹ در نظر گرفته شد. هندسه دیوارها و پنجره در **Error!** Reference source not found. آورده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱): (الف) طرحواره هات سل های ۱ تا ۳ ب) شبیه سازی هات سل و چشمه در کد MCNP ج) نمایی از تراپرد ذرات گامای گسیلی از چشمه.

پسماند، تخمین زده خواهد شد. سامانه های قفل هوا^۱ برای ورود و خروج مواد فرآیندی، واحدهای اتصال دریچه ها^۲ برای خروج پسماندها و محصولات، سیستم تهویه و پالایش^۳ مناسب جهت ورود هوای تمیز و خروج هوای به احتمال زیاد آلوده به گازهای پرتوزا و سمی از آن، دستواره های مناسب، سیستم تنظیم فشار، منبع توان الکتریکی و ... از جمله مواردی هستند که باید در طراحی به آنها توجه نمود. در این بین تخمین نرخ دز و تعیین حفاظ مناسب و یا تجزیه و تحلیل حفاظ با توجه به منبع پرتوزا و تابش های گامای گسیلی از آن، از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۹]. پیش از اقدام به ساخت، انجام این محاسبات امری ضروری است که می تواند منجر به کاهش خطا و هزینه ها شود. در تجزیه و تحلیل ها باید توجه داشت که تحت شرایط عادی میزان دز عموم و اپراتورهای واحد تولید نباید از حدود مجاز تجاوز کند [۱۰].

در این مقاله، حفاظ اتاقک سربی و سلول داغ مورد استفاده جهت استحصال مولیبدن-۹۹ از هدف های داغ LEU بومی، بررسی شده است. در این راستا رویکرد پرتو دهی بر اساس تأمین تقاضای داخلی کشور در نظر گرفته شد و طیف تابش گاما و قدرت چشمه با توجه به آن تخمین زده شد. سپس اثر تضعیفی ماده نسبت به چشمه مذکور بررسی و اتاقک سربی و سلول داغ با دیواره های مناسب برای چنین هدفی طراحی و تجزیه و تحلیل شد.

۲. مواد و روش ها

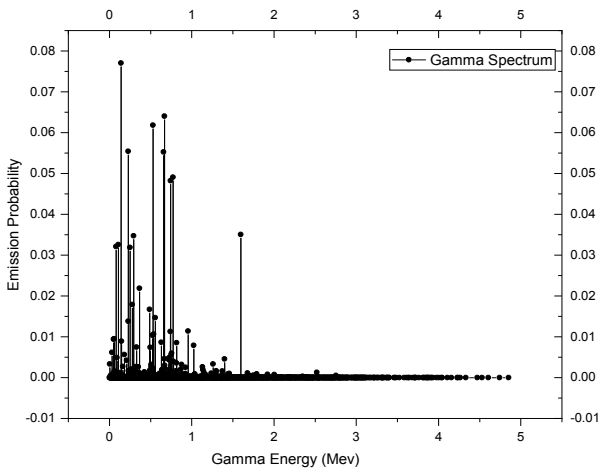
در این مقاله از کد MCNP، نسخه ۶.۲ برای شبیه سازی و محاسبه نرخ دز گاما استفاده شد. اتاقکی با ابعاد (ارتفاع×عرض×طول) ۲۷۰cm×۸۰۰cm×۳۳۰cm جهت انجام فرآیند شیمی تابشی جهت استحصال رادیوایزوتوپ مولیبدن-

³ Filtration

¹ Airlock

² Docking

تخمین زده شود. این طیف در شکل ۲ نشان داده شده است. از طیف مذکور در تخمین حفاظ استفاده شد.



شکل (۲): طیف گاماها ی گسیلی چشمه.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، لازم است پیش از هر اقدام عملی جهت ساخت، طراحی مناسبی از تجهیزات با توجه به نرخ دزهای محاسباتی و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر استاندارد انجام شود. بدین منظور می‌توان از کد مونت‌کارلو MCNP استفاده نمود. برای محاسبات از دو تالی F_2 و F_4 استفاده شد. تالی‌های مورد استفاده، مقدار میانگین شار روی سطح و حجم را مطابق رابطه‌ی (۱) نتیجه می‌دهد:

$$F_2 = \iiint_{A,t,E} \phi(r,E,t) dEdt \frac{dA}{A} \quad (1)$$

$$F_4 = \frac{1}{V} \iiint_{A,E,4\pi} d\Omega \phi(r,s,E,\Omega)$$

که در این روابط Φ شار عبوری، r مکان، E انرژی، t زمان، A مساحت سطح یک ناحیه، V حجم یک ناحیه و Ω زاویه فضایی هستند.

انواع بتن و فلز سرب از جمله مواد رایجی هستند که در ساخت سلول داغ و اتاقک سربی به کار می‌روند. مشخصات مواد مورد استفاده در ساخت این تجهیزات که در شبیه‌سازی کد MCNP از آن‌ها استفاده شده است در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): مواد رایج در ساخت اتاقک سربی و سلول داغ.

عنصر	بتون باریت	سرب
درصد وزنی		
H	۰/۰۰۳۵۹	-
O	۰/۳۱۱۶۲	
Si	۰/۰۱۰۴۶	
Ca	۰/۰۵۰۲۰	
Mg	۰/۰۰۱۲۰	
Al	۰/۰۰۴۱۸	
S	۰/۱۰۷۸۶	
Ba	۰/۴۶۳۴۰	
As	-	۰/۰۰۰۰۰۵
Fe	۰/۰۴۷۵۰	۰/۰۰۰۰۰۲
Pb	-	۰/۹۹۹۹۹
مرجع	[۱۲، ۱۱]	[۱۱]

چشمه مورد استفاده در این مقاله، مجموعه‌ی ۹ عددی از هدف‌های داغ (مشابه سوخت راکتور تحقیقاتی تهران با مغزی U_2O_8 (۲۰%) و غلاف $Al-6061$ و ابعاد کوچک‌تر) و همچنین هولستر نگه‌دارنده آن‌ها می‌باشد که به مدت ۶ روز در کانال D6 با توان ۴ MW پرتودهی و سپس به مدت ۱ روز در استخر راکتور خنک شده است. تخمین رادیوایزوتوپی هدف داغ با استفاده از کارت BURN کد MCNP انجام شد. متناسب با فعالیت هر رادیوایزوتوپ و تابش‌های گامای گسسته از آن‌ها (انرژی و فراوانی مشخص استخراج شده از کتابخانه ENDF-B-VIII برنامه JANIS) کدی در نرم‌افزار متلب نوشته شد تا طیف بهنجار شده^۱ گامای گسیلی از این منبع پرتوزا

^۱ Normalize

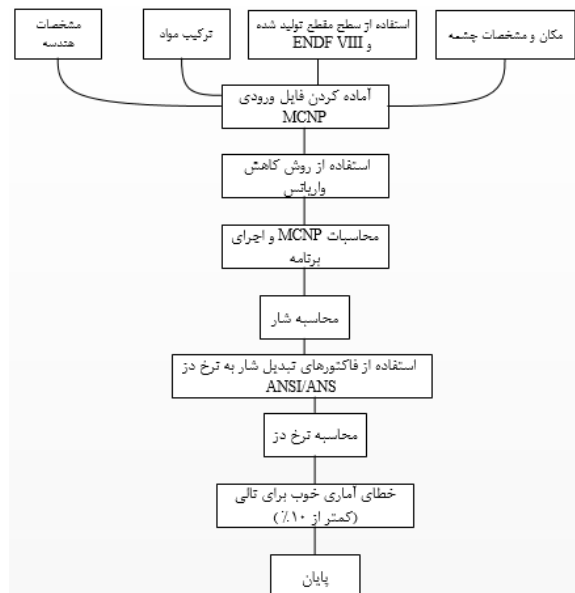
در محاسبات تالی F_2 ، حفاظ به چند بخش^۱ متناسب با مسافت آزاد میانگین^۲ تابش گاما در ماده حفاظ، تقسیم بندی و نرخ دز در سطوح مذکور ارزیابی شد. مسافت آزاد میانگین مرتبط با تابش های گامای گسیلی از چشمه را می توان با توجه به انرژی میانگین طیف و ضریب تضعیف ماده ی حفاظ به دست آورد. همچنین کد MCNP در پرونجا خروجی این مقدار را نشان خواهد داد. از ضرایب تبدیل شار به دز موجود در استاندارد ANSI/ANS-۲۰۲۰ برای محاسبه ی نرخ دز روی هر سطح استفاده شد [۱۳]. این ضرایب با استفاده از کارت های DE و DF در کد تعریف شدند.

۳. نتایج و بحث

پس از محاسبه و داشتن ضخامت های متغیر حفاظ و با استفاده از نرم افزار OriginPro نمودارهای تضعیف رسم شدند. به این منظور حفاظ گذاری با بتن-باریت و سرب با ضخامت های متفاوت برای دستیابی به دز مجاز پرتوگیری شغلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است.

خطوط افقی نشان داده شده روی شکل، نمایانگر دز مجاز می باشند. اپراتور شاغل در خط تولید مولیدن-۹۹، به شرط اشتغال کامل، حدوداً ۲۰۰۰ ساعت در سال در محیط سلول داغ قرار خواهد گرفت. مقدار دز مجاز پرتوگیری شغلی برای چنین فردی طبق استاندارد ICRP ۶۰ [۱۴] نباید بیش تر از $10 \mu\text{Sv/h}$ باشد. انتخاب این مقدار تا حد زیادی در چنین تأسیساتی محافظه کارانه تلقی خواهد شد.

در محاسبات تالی F_2 ، حفاظ به چند بخش^۱ متناسب با مسافت آزاد میانگین^۲ تابش گاما در ماده حفاظ، تقسیم بندی و نرخ دز در سطوح مذکور ارزیابی شد. مسافت آزاد میانگین مرتبط با تابش های گامای گسیلی از چشمه را می توان با توجه به انرژی میانگین طیف و ضریب تضعیف ماده ی حفاظ به دست آورد. همچنین کد MCNP در پرونجا خروجی این مقدار را نشان خواهد داد. از ضرایب تبدیل شار به دز موجود در استاندارد ANSI/ANS-۲۰۲۰ برای محاسبه ی نرخ دز روی هر سطح استفاده شد [۱۳]. این ضرایب با استفاده از کارت های DE و DF در کد تعریف شدند.



شکل (۳): مراحل روش محاسبات طراحی حفاظ مورد استفاده در مونت کارلو.

با ضرب قدرت چشمه در مقادیر خروجی با استفاده از کارت FM، منحنی نرخ دز برحسب ضخامت در شرایط مختلف رسم شد. با برازش تابع مناسب بر روی داده ها، برای هر حالت، ضخامت مناسب جهت محدود کردن نرخ دز به مقدار توصیه شده، به دست آمد. به علاوه شبکه هایی^۳ با ابعاد $5 \text{ cm} \times$

³ Mesh

⁴ Zone

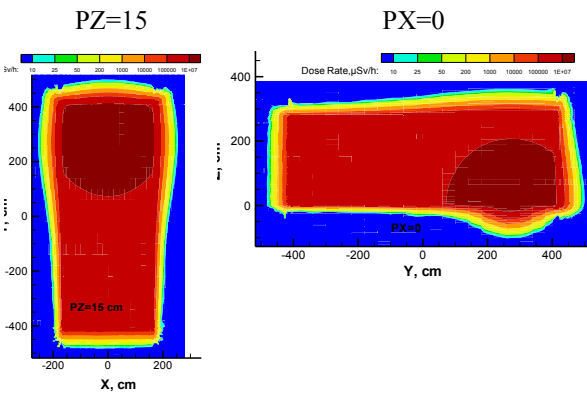
¹ Segment

² Mean free path

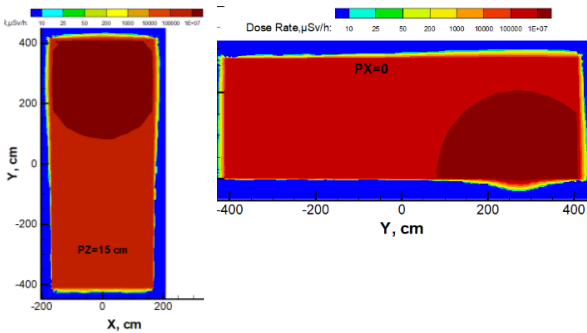
جدول (۲): ضخامت بهینه و مقادیر نرخ دز در فواصل و مواد مختلف.

نرخ دز در فواصل مختلف اپراتور از دیوار سلول داغ (μSv/h)				ضخامت بهینه (cm)	تجهیز
۱۰۰	۵۰	۳۰	چسبیده به دیوار خارجی		
۲/۶۹	۳/۹۵	۴/۹۰	۷/۰۳	۹۰	سلول داغ
۲/۲۹	۳/۹۱	۴/۸۴	۷/۶۴	۲۴	اتاقک سربی

برای محاسبات ایزو-دز^۱، هندسه‌ی ورودی با شبکه بندی‌های ۵cm × ۵cm × ۵cm تقسیم‌بندی و دز میانگین گاما با کارت تالی FMESH^۴ محاسبه شد. نتایج با نرم‌افزار Tecplot رسم شدند. نتایج برای سلول داغ و اتاقک سربی طراحی شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

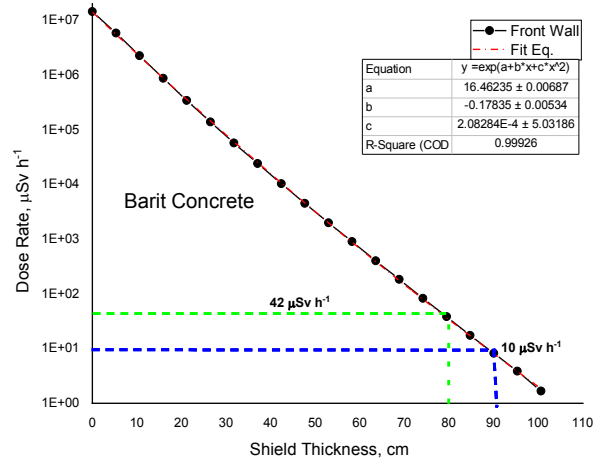


حفاظ بتن-باریت سلول داغ.

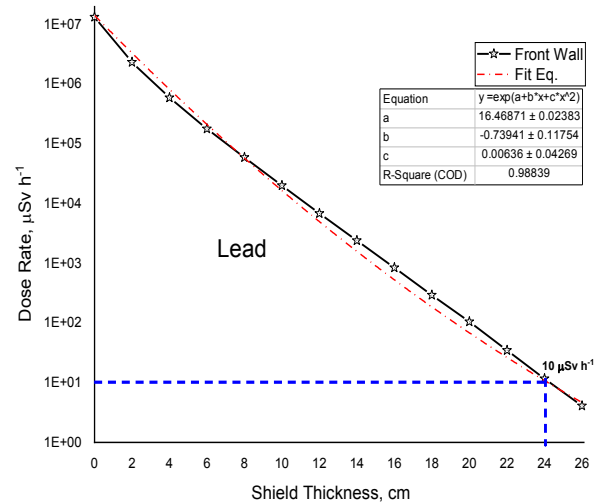


حفاظ سرب اتاقک سربی.

شکل (۴): نمودار ایزو-دز سلول داغ و اتاقک سربی انتخابی.



الف



ب

شکل (۴): نرخ دز تابش‌های گاما برحسب ضخامت حفاظ (الف) بتن-باریت سلول داغ (ب) سرب اتاقک سربی.

مشاهده می‌شود که برای سلول داغ، بتن باریت با ضخامت ۹۰ cm و برای اتاقک سربی، سرب با ضخامت ۲۴ cm مورد نیاز است. برای هر ضخامت بهینه، نرخ دز در فواصل مختلف محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شد. لازم به ذکر است که خطای آماری در کد MCNP^۴ برای مش تالی‌ها و تالی‌های F_2 و F_4 در شرایط مختلف زیر ۱۰ درصد بود.

¹ Isodose

۴. نتیجه گیری

به عنوان یک چشمه گسیلنده گاما در نظر گرفته شد. طیف تابش های گامای گسسته از این چشمه توسط شبیه سازی با کد MCNP تخمین زده شد. از طرفی حفاظ هایی از مواد بتون باریت و سرب، به ترتیب برای ساخت سلول داغ و اتاقک سربی، با محدود کردن نرخ دز سطح بیرونی به مقدار $10 \mu\text{Sv/h}$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضخامت بهینه برای سلول داغ و اتاقک سربی به ترتیب ۹۰ و ۲۴ است. همچنین برای سلول داغ و اتاقک سربی انتخابی نمودارهای ایزو-دز در سطح مقاطع مختلف رسم شدند تا توزیع کانتوری نرخ دز در اطراف آن ها نشان داده شود.

به منظور کاهش اثرات مخرب تابش های هسته ای بر سلامت پرتوکاران، استفاده از حفاظ های مناسب حین کار با مواد پرتوزا امری حیاتی است. یکی از ابزارهای قدرتمند در حوزه طراحی حفاظ، کد MCNP است. در این کد ترابرد پرتو به روش مونت کارلو انجام می شود. مشخصات چشمه ی گسیلنده پرتوهای یونیزان و همچنین نوع و ضخامت ماده حفاظ، مهم ترین عوامل در تخمین یک حفاظ مناسب به شمار می روند. در این مقاله، مجموعه ی هدف های داغ و نگه دارنده ی آن ها که در فرآیند تولید مولیبدن-۹۹ به روش شکافت استفاده می شوند،

۵. مراجع

- G. F. Knoll. *Radiation detection and measurement*. 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 2010.
- A. B. Chilton, J. K. Shultis, and R. E. Faw. *Principles of radiation shielding*. Prentice Hall Inc, Old Tappan, NJ (USA), 1984.
- I. A. E. Agency. *Manual on safety aspects of the design and equipment of hot laboratories*. Safety series No. 30. IAEA, Vienna, 1969.
- M. H. Bahrin, H. Hasan, A. A. Rahman, M. Hamzah, M. Z. Hassan, M. Rizal M. Ibrahim, M. H. Rabir, J. A. Karim. The design of a Hot Cell with interlocking concrete wall. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 555 (1) (2019) 012019
- S. Sipaun. Thorium fueled reactor. *AIP Conf.* 1799 (1) (2017) 050012.
- S. Kurien, V. Anandaraj, T. Ulaganathan, T. Johny, Jojo Joseph, S. Venugopal, T. Jayakumar. Design & development of a machine for dimensional measurement-cum-dismantling of irradiated fuel subassemblies. *Procedia Eng.* 64 (2013) 1572-1581.
- T. Zhang, S. Li, W. Zhang. Design of Power Manipulator for Hot Cell Facility. 2021 *IEEE Int. Conf. Robotics Biomimetics (ROBIO)*, Sanya, China (2021) 458-462.
- F. B. Larsen. *Manual on safety aspects of the design and equipment of hot laboratories*. Safety series No. 30. IAEA, Vienna, 1969.
- H. Glen, A general purpose alpha-gamma hot laboratory. *Nucl. Struct. Eng.* 1 (1) (1965) 98-107,.
- M. Durazzo, J. A. B. Souza, R. F. Ianelli, E. M. Takara, J. S. Garcia Neto, A. M. Saliba-Silva, E. F. Urano de Carvalho. Manufacturing LEU-foil annular target in Brazil, *Ann. Nucl. Energy* 165 (2022) 108646.
- R. S. Detwiler, R. J. McConn, T. F. Grimes, S. A. Upton, E. J. Engel. Compendium of material composition data for radiation transport modeling, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2021.
- ASTM, Standard specification for aggregates for radiation-shielding concrete, 2009.
- A. Laptev, O.N. Beloousova, C.J. Bianconi, M.A. Griffin, P.S. Hoover, B.T. Keller, G.R. Murrell, R.T. Perry, Jr. *Photon and neutron fluence-to-dose conversion factors for external radiation: A comparison of the new ICRP DCFs with those currently in use at LANL-paper 10*. American Nuclear Society-ANS, USA, 2014.
- R. Vishwakarma, P. Subrahmanyam, G. J. B. o. R. P. Venkataraman, Implementation of the recommendations of ICRP-60 dose limits in industrial radiography practice, *Bull. Radiat. Prot.* 15(1) (1992) 1-2.