



بررسی حفاظ رادیولوژیکی و توزیع دز محافظه‌ی ویژه‌ی حمل پسمان‌های پرتوزای میانی نیروگاه اتمی بوشهر

سیدمحمد مهدی ابطی*^۱، سیدمحمود رضا آقامیری^۱، حسین خلفی^۲، حمیدرضا مهاجرانی^۳
۱. گروه پرتو پزشکی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران
۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران
۳. شرکت پسمانداری صنعت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۷۶۴۳۵۳۱، تهران - ایران

چکیده: در عملکرد نیروگاه‌های اتمی سالانه مقادیر قابل توجهی پسمان پرتوزا تولید می‌شود. برای حمل و نقل و دفع این پسمان‌ها لازم است تدابیر خاصی اندیشیده شود. بنابر استانداردهای موجود لازم است محافظه‌ی ویژه‌ی حمل پسمان‌ها به گونه‌ای طراحی شود که مقدار دز معادل بر روی سطح خارجی آن از 2mSv/hr و در فاصله ۲ متری از آن از 0.1mSv/hr تجاوز نکند. هدف این پژوهش طراحی حفاظ رادیولوژیکی برای محافظه‌های مخصوص حمل پسمان‌های گروه II نیروگاه اتمی بوشهر می‌باشد. محاسبات توزیع دز و طراحی محافظه با استفاده از روش مونت کارلو و با بهره‌گیری از کد MCNP5 انجام پذیرفته است. برای محاسبات از ۸ پردازنده به صورت موازی استفاده شده است. میزان فعالیت کل یک بشکه برای پسمان‌های نمک تغلیظ شده $4.248 \times 10^{11}\text{Bq}$ ، برآورد شد. هم‌چنین چگالی ترکیبات بر طبق اسناد موجود 2000kg/m^3 می‌باشد. این مواد در بشکه‌های استوانه‌ای به طول 79.5cm و شعاع 28.55cm ، با ضخامت پوسته‌ی 3mm و از جنس فولاد قرار دارند. توزیع دز برای یک بشکه‌ی حاوی پسمان نمک تغلیظ شده به دست آمد. آهنگ دز در فاصله‌ی 10cm از سطح، برابر 15.67mSv/hr تعیین گردید که ۱۰٪ بیش‌تر از پیش‌بینی FSAR بود. به منظور کاهش دز، بشکه‌های حاوی پسمان‌های پرتوزا در درون بسته‌بندی‌های سربی با ظرفیت ۴ بشکه قرار داده می‌شوند. ضخامت مناسب برای کاهش آهنگ دز به مقدار توصیه شده در استانداردهای موجود، برای وجوه جانبی 2cm برای وجه پایینی 2cm و برای وجه بالایی 1.5cm به دست آمد. با این ضخامت سرب آهنگ دز معادل بر روی سطح و در فاصله‌ی ۲ متری از محافظه‌ی ۱۲ بشکه‌ای به ترتیب $550\mu\text{Sv/hr}$ و $94\mu\text{Sv/hr}$ می‌باشد.

کلید واژه‌ها: پسمان‌های پرتوزا، نیروگاه اتمی، توزیع دز، حفاظ رادیولوژیکی، MCNP5

An Investigation into the Radiological Shielding and Dose Distribution of Containers for Transportation of Intermediate Radioactive Waste of Boushehr Nuclear Power Plant

S.M. Abtahi*¹, S.M. Aghamiri¹, H. Khalafi², H. Mohajerani³

1. Radiation Medicine Department, Nuclear Engineering Faculty, University of Shahid Beheshti, P.O.Box: 1983963113, Tehran – Iran
2. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran – Iran
3. Radioactive Waste Management Department, AEOL, P.O.Box: 1437643531, Tehran – Iran

Abstract: In operation of nuclear power plants, significant amounts of radioactive wastes are produced annually so that it is necessary to determine special ways for transportation and disposal of the radioactive wastes. According to the related standards, containers for transportation of radioactive materials should be designed in such a way that the equivalent dose rates on the outer surface and at a distance of 2m from the container do not exceed 2mSv/hr and 0.1mSv/hr , respectively. The purpose of this research is to design a radiological shielding for containers to transport the group II radioactive wastes of Boushehr Nuclear Power Plant. The dose distribution calculations and the container design were implemented through the Monte Carlo method using MCNP5 code. The code was run by the use of 8 processors in a parallel way. The total activity of one drum and inventory density were estimated to be 4.248Bq and 2000kg/m^3 , respectively. A steel drum with a dimension of 79.5cm in height, 28.55cm of radius and 0.3cm in thickness was filled with the cemented inventory. The dose distribution for the bottom rest wastes was calculated. The simulation result showed a value of 15.67mSv/hr for the equivalent dose rate on the surface of the drum. The result was 10% higher than the FSAR prediction. In order to decrease the dose rate, 3 leaden packages with 4 drums in each were put on the trailer for the transportation. The suitable lead thickness for reducing the equivalent dose rate in order to meet the required standards for the lateral parts, floor and top were 2.2cm , 2cm and 1.5cm , respectively. With this calculated thickness, the equivalent dose rates on the surface and at a distance of 2m from the surface were $550\mu\text{Sv/hr}$ and $94\mu\text{Sv/hr}$, respectively.

Keywords: Radioactive Waste, Nuclear Power Plant, Dose Distribution, Radiological Shielding, MCNP5

**۱. مقدمه**

در عمل نیروگاه‌های اتمی سالانه مقادیر قابل توجهی پسمان پرتوزا تولید می‌کنند. برای دفع این پسمان‌ها لازم است تدابیر خاصی اندیشیده شود. پسمان‌های تولید شده در نیروگاه‌های اتمی به سه دسته‌ی پسمان‌های سطح پایین، پسمان‌های سطح میانی و پسمان‌های سطح بالا تقسیم می‌شوند [۱]. موضوعات مربوط به پسمان‌های حاصل از شکافت به سه قسمت تقسیم می‌شوند: (۱) انتقال به انبار موقت یا جای‌گاه بازیافت، (۲) دفع و دفن پسمان، (۳) بازیافت در صورت امکان [۲]. نگهداری در انبار موقت برای کاهش فعالیت در قبل از دفن دایم ممکن است تا پنجاه سال به طول بیانجامد [۳]. بنابر استانداردهای موجود لازم است محفظه‌ی ویژه‌ی حمل پسمان‌ها به گونه‌ای طراحی شود که مقدار دز معادل در سطح خارجی آن از 2mSv/hr و در فاصله‌ی ۲ متری از آن از 0.1mSv/hr تجاوز نکند [۴ و ۵]. همچنین اگر لازم باشد در محفظه در طول مسیر حمل و نقل باز شود آهنگ دز بر روی سطح بسته‌ها نباید از 10mSv/hr تجاوز کند [۴ و ۵]. پسمان‌های گروه II برحسب روش تولید به چهار نوع نمک تغلیظ شده، فیلترهای پودر تیتانیوم-دما-بالا، صافی‌های تبادل یون و پسمان لجن تقسیم‌بندی می‌شوند [۶]. هدف این پژوهش محاسبه‌ی توزیع دز معادل بشکه‌ی حاوی پسمان نمک تغلیظ شده، به عنوان فعال‌ترین پسمان گروه II و سپس طراحی حفاظ رادیولوژیکی برای محفظه‌های مخصوص حمل پسمان‌های از این نوع می‌باشد که برای دیگر پسمان‌های گروه II نیروگاه اتمی نیز قابل استفاده است. کیم و همکارانش برای طرح ۸ بشکه‌ای حمل پسمان‌های تولیدی نیروگاه‌های اتمی در شرکت هیدرو و هسته‌ای^(۱) کشور کره، ضخامت حفاظ محفظه را 12mm فولاد به دست آوردند [۷]. در این پژوهش ابتدا آهنگ دز بر روی بسته‌های پسمان تحویلی نیروگاه اتمی بوشهر محاسبه شده است که در صورت فراتر رفتن از مقدار 10mSv/hr لازم است قبل از قرارگیری در درون محفظه‌ی اصلی برای حمل و نقل جاده‌ای، درون حفاظ‌های سربی باز بسته‌بندی شوند، به طوری که آهنگ دز بر روی سطح بسته‌های مذکور از 10mSv/hr کم‌تر شود. اما با توجه به این که محفظه‌ای که قابلیت بارگیری در ساختمان ZC نیروگاه را دارد حداکثر می‌تواند ۴ بشکه را در خود جای دهد بنابراین بشکه‌ها در ساختمان ZC درون این محفظه سربی قرار

داده می‌شوند و سپس این محفظه درون محفظه‌ی اصلی قرار می‌گیرد. پس لازم است این محفظه نیز ضوابط حمل و نقل را رعایت کند چون درون نیروگاه حمل می‌شود. این پژوهش که قسمتی از طراحی مکان پسمانداری پرتوزا برای نیروگاه‌های اتمی می‌باشد در کشور برای اولین بار صورت پذیرفت.

۲. مواد و روش‌ها

محاسبات توزیع دز و طراحی محفظه با استفاده از روش مونت کارلو و با بهره‌گیری از کد MCNP5 [۸] انجام پذیرفته است. برای انجام محاسبات از یک سیستم سرور^(۲) با دو پردازنده‌ی مرکزی مدل زنون^(۳) هر کدام شامل ۴ هسته با اجرای موازی استفاده شد.

۲.۱. ترکیبات موجود در بشکه‌های حاوی پسمان نمک تغلیظ شده
مقدار فعالیت کل یک بشکه‌ی حاوی پسمان‌های نمک تغلیظ شده، $4.248 \times 10^{11}\text{Bq}$ برآورد شد [۶]. همچنین چگالی ترکیبات، برطبق اسناد موجود 2000kg/m^3 می‌باشد [۶]. مواد تشکیل‌دهنده‌ی پسمان نمک تغلیظ شده برای غلظت نمک 600gr/lit به صورت جدول ۱ می‌باشد [۶]. با توجه به داده‌های FSAR حداکثر غلظت نمک موجود در بشکه‌ها 500.3gr/lit می‌باشد [۶].

۲.۲. فرضیات مربوط به فیزیک بشکه

هندسه‌ی بشکه، استوانه‌ای به ارتفاع 79.5cm و شعاع 28.55cm در نظر گرفته شد که دارای ضخامت پوسته‌ی 3mm و از جنس فولاد می‌باشد. سطح بالایی و پایینی استوانه با ورقه‌هایی از جنس فولاد به ضخامت به ترتیب 10mm و 5mm پوشانده شده بود [۶]. لازم به ذکر است که حجمی که توسط پسمان سیمانی شده پر می‌شود، 0.15m^3 می‌باشد. شکل ۱ نمایی از بشکه را نشان می‌دهد. این بشکه با درپوش متحرک و با ظرفیت کل 0.2m^3 دارای وزن 29 کیلوگرم و از جنس ورق استیل نورد سرد شده می‌باشد. این بشکه متعلق به طبقه‌ی ۴ ایمنی (PNAE 6-01-011-97) و گروه ۳ پایداری لرزه‌ای (PNAE 0-S-006-87) می‌باشد [۶].

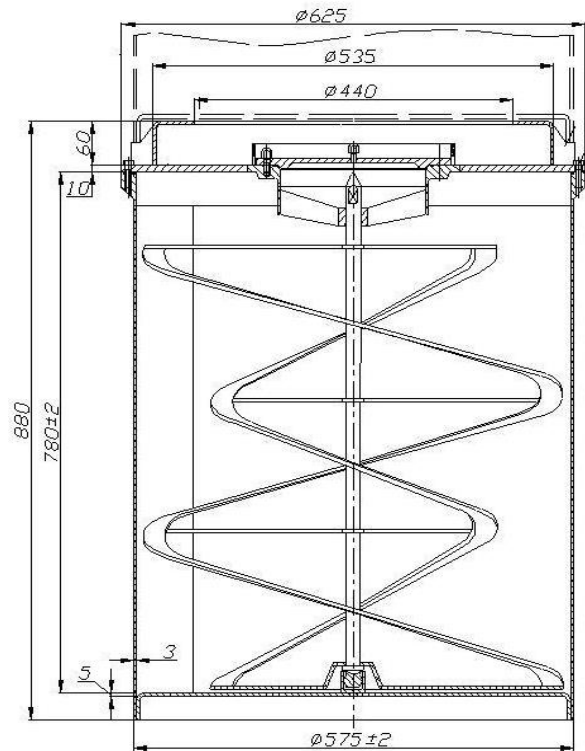


۳.۲ فرضیات محفظه‌ی پسمان

بشکه‌های پسمان پس از طی مراحل سیمانی شدن در ساختمانی موسوم به ZC در محفظه‌ی ویژه‌ی حمل بارگیری می‌شوند. با توجه به ابعاد ساختمان مذکور حداکثر حجم محفظه‌ای که وارد ساختمان ZC می‌شود، نمی‌تواند بیش از ۴ بشکه باشد. این محفظه‌های سربی به وسیله‌ی یک کامیونت به بیرون ساختمان ZC منتقل شده و در آن‌جا سه عدد از این بسته‌های سربی در یک محفظه بزرگ‌تر از جنس فولاد قرار می‌گیرند. سپس به وسیله یک تریلر این بسته‌ها به طرف انبار موقت نگهداری پسمان‌های پرتوزا حمل می‌شوند (شکل ۲). بنابراین بسته‌های حاوی مواد پرتوزا در حقیقت این محفظه‌های سربی ۴ بشکه‌ای هستند. پس با توجه به این موضوع که بسته‌های سربی به عنوان یک بسته‌ی ترکیبی در نظر گرفته می‌شوند، ضخامت حفاظ سربی آن‌ها باید طوری طراحی شود که آهنگ دز بر روی سطح این بسته‌ی ترکیبی از 10 mSv/hr تجاوز نکند [۴] و هم‌چنین محفظه‌ی مربوط به کامیونی که این بسته‌ی سربی ۴ بشکه‌ای را حمل می‌کند استانداردهای مربوط به حمل و نقل [۴] را رعایت نماید. فواصل بین این بسته‌های سربی در محفظه‌ی فولادی 585 mm می‌باشد. نمایی از بسته‌ی سربی در شکل (۳-۳) نشان داده شده است و فاصله بشکه‌ها از یک‌دیگر و از دیواره‌ی محفظه‌ی سربی در شکل (۳-۳) نمایش داده شده است. به منظور طراحی حفاظ مناسب ابتدا ضخامت‌های مختلف حفاظ برای بسته‌ی سربی شبیه‌سازی می‌شود و ضخامتی که آهنگ دز بر روی سطح بسته‌ی سربی را به کم‌تر از 10 mSv/hr کاهش می‌دهد انتخاب می‌گردد. از آن‌جایی که بسته‌ی سربی توسط یک کامیونت درون نیروگاه حمل می‌شود و هیچ‌گونه محفظه‌ای برای حمل و نقل درون نیروگاهی در نظر گرفته نشده است، بنابراین بسته‌ی سربی باید طوری طراحی شود که استانداردهای حمل و نقل را برآورده کند [۴]. یعنی آهنگ دز بر روی سطح و در فاصله‌ی 2 m از بسته‌ی سربی نباید به ترتیب از 2 و 0.1 mSv/hr تجاوز نماید. سپس با توجه به این حفاظ بسته‌ی سربی، آهنگ دز بر روی سطح محفظه‌ی حمل و نقل جاده‌ای و هم‌چنین در فاصله‌ی 2 m از آن به دست می‌آید. اگر ضخامت حفاظ سرب، استانداردهای آهنگ دز مربوط به این نقاط را نیز برآورده کند، این ضخامت به عنوان ضخامت مطلوب انتخاب می‌گردد. در غیر این صورت ضخامت سرب تا آن‌جا که آهنگ دز را در دو نقطه‌ی روی سطح محفظه فاصله‌ی 2 متری از آن به مقدار مطلوب کاهش دهد، افزایش داده می‌شود.

جدول ۱. مواد تشکیل دهنده‌ی پسمان نمک تغلیظ شده

رادونوکلید	فعالیت ویژه‌ی (یکرل بر مترمکعب) پسمان نمک تغلیظ شده (مقدار نمک 600 گرم بر لیتر)
استرانسیم-۸۹	9.48×10^4
استرانسیم-۹۰	3.51×10^6
مولیبدن-۹۹	2.23×10^7
روتنیم-۱۰۳	2.98×10^8
روتنیم-۱۰۶	7.26×10^6
ید-۱۳۱	1.98×10^{10}
تلوریم-۱۳۲	3.45×10^8
سزیم-۱۳۴	7.41×10^{10}
سزیم-۱۳۷	1.23×10^{11}
باریم-۱۴۰	6.00×10^8
لانتانیم-۱۴۰	7.14×10^7
سرب-۱۴۴	1.95×10^8
زیرکونیم-۹۵	8.13×10^8
نیوبیم-۹۵	1.55×10^8
آهن-۵۹	7.05×10^8
کیالت-۵۸	5.37×10^9
کرم-۵۱	7.74×10^9
منگنز-۵۴	4.23×10^9
کیالت-۶۰	4.38×10^{10}



شکل ۱. نمایی از بشکه‌ی حمل پسمان گروه ۲ (فاصله‌ها به میلی‌متر نشان داده شده‌اند).



۳. نتایج و بحث

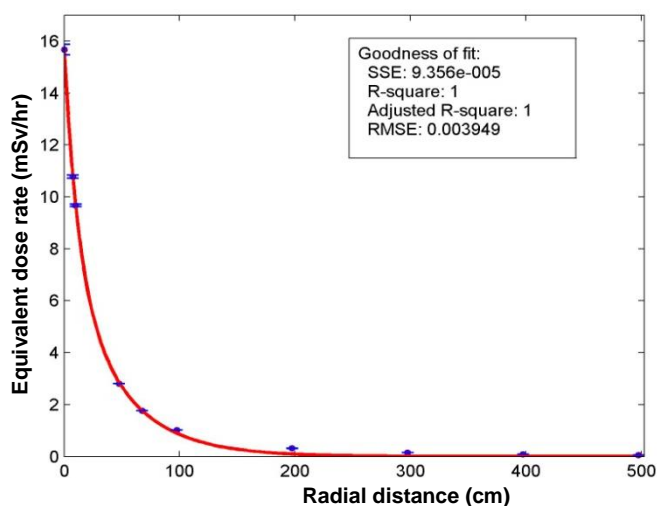
۱.۳ توزیع دز بشکه‌های پسمان نمک تغلیظ شده

نتایج توزیع آهنگ دز معادل برحسب فاصله از سطح بشکه در جدول ۲ آورده شده است. آهنگ دز معادل برحسب فاصله شعاعی از سطح یک بشکه‌ی حاوی پسمان پرتوزا به صورت نمودار در شکل ۴ آورده شده است. داده‌ها در معادله‌ی (۱) صدق می‌کنند و میزان پرازش منحنی با داده‌های عددی در شکل ۴ نشان داده شده است.

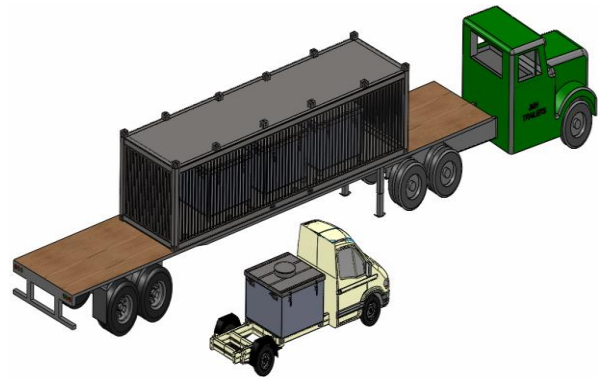
$$\text{equivalent dose rate (mSv/hr)} = 7.863e^{-0.08404x} + 7.812e^{-0.02222x} \quad (1)$$

جدول ۲. توزیع آهنگ دز معادل برحسب فاصله از سطح بشکه

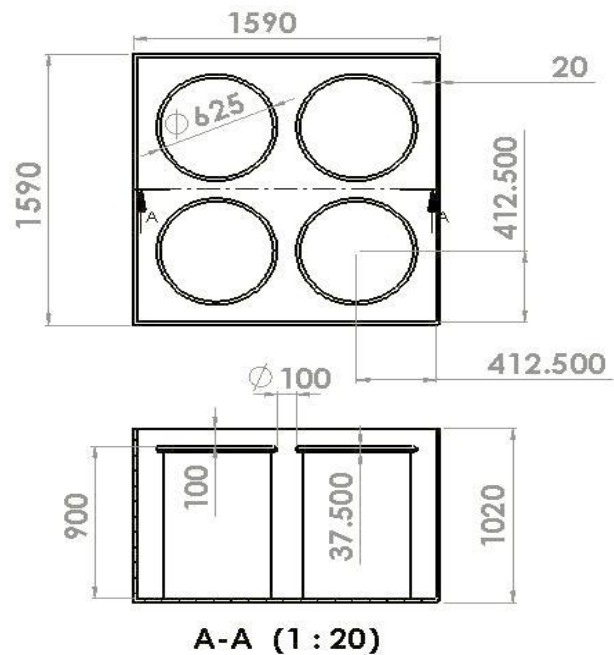
فاصله‌ی شعاعی (cm)	آهنگ دز (mSv/hr)	خطا (mSv/hr)
۰.۱	۱۵,۶۷۵	۰.۱۳
۷.۵	۱۰,۷۸۰	۰.۰۰۶
۱۰	۹,۶۷۲	۰.۰۰۵
۴۷.۵	۲,۸۰۳	۰.۰۰۱
۶۷.۵	۱,۷۶۲	۰.۰۰۱
۹۷.۵	۱,۰۱۸	<۰.۰۰۱
۱۹۷.۵	۰.۳۱۱	<۰.۰۰۱
۲۹۷.۵	۰.۱۴۸	<۰.۰۰۱
۳۹۷.۵	۰.۰۸۶	<۰.۰۰۱
۴۹۷.۵	۰.۰۵۶	<۰.۰۰۱



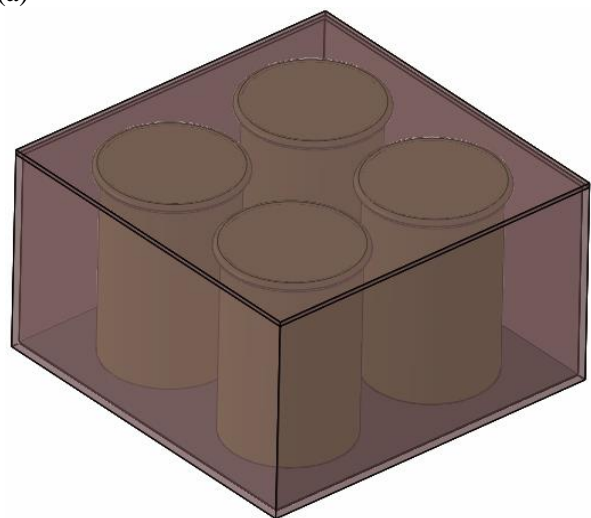
شکل ۴. تغییرات آهنگ دز معادل برحسب فاصله از سطح بشکه؛ خطای آماری به صورت خط خطا^(۴) در شکل نمایش داده شده است.



شکل ۲. کامیونت حمل و نقل درون نیروگاهی در کنار تریلر حمل و نقل پسمان‌های پرتوزا از نیروگاه اتمی بوشهر به سمت ساختمان انبار موقت.



(a)



(b)

شکل ۳. (a) فواصل در یک محفظه‌ی سری، (b) نمایی از بسته‌ی سری حاوی بشکه‌های پسمان.

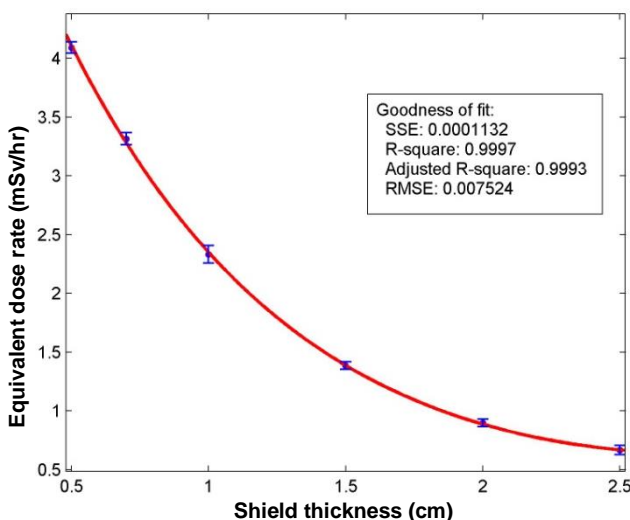


لازم نیست دز در فاصله‌ی ۲ متری به کم‌تر از ۰٫۱ میلی‌سیورت در ساعت کاهش یابد [۴]. به منظور تأمین این استانداردها آهنگ دز در این سه نقطه (روی سطح بسته‌ی سربی، روی سطح بسته و در فاصله‌ی ۲ متری از آن)، برای ضخامت‌های مختلف سرب، تعیین گردید. نمودار تغییرات آهنگ دز معادل برحسب ضخامت سرب جداری فوقانی، در شکل ۵ نمایش داده شده است. رابطه‌ی دو نمایی آهنگ دز با ضخامت حفاظ در بالای محفظه‌ی سربی چنین است.

$$\text{Equivalent dose rate (mSv/hr)} = 7.242e^{-1.155t} + 0.02711e^{0.9122t} \quad (2)$$

که در آن، t ضخامت حفاظ سربی می‌باشد. نتیجه‌ی برازش داده‌های عددی با رابطه‌ی (۲) در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۵ و معادله‌ی (۲) ضخامت ۱٫۱۵cm سرب در جداری فوقانی بسته‌ی ترکیبی، آهنگ دز را به ۲mSv/hr کاهش می‌دهد. تغییرات آهنگ دز معادل برحسب ضخامت سرب جداری زیرین بسته‌ی سربی که از رابطه‌ی دونمایی زیر پیروی می‌کند در شکل ۶ نشان داده شده است

$$\text{Equivalent dose rate (mSv/hr)} = 6.313e^{-2.263t} + 6.61e^{-0.8334t} \quad (3)$$

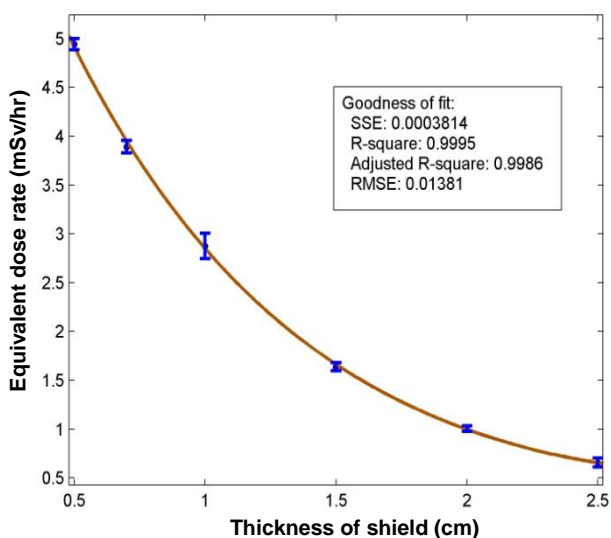


شکل ۵. تغییرات آهنگ دز معادل در بالای بسته‌ی سربی برحسب ضخامت جداری فوقانی حفاظ. خوبی برازش بیانگر مطابقت نمودار با داده‌های عددی می‌باشد.

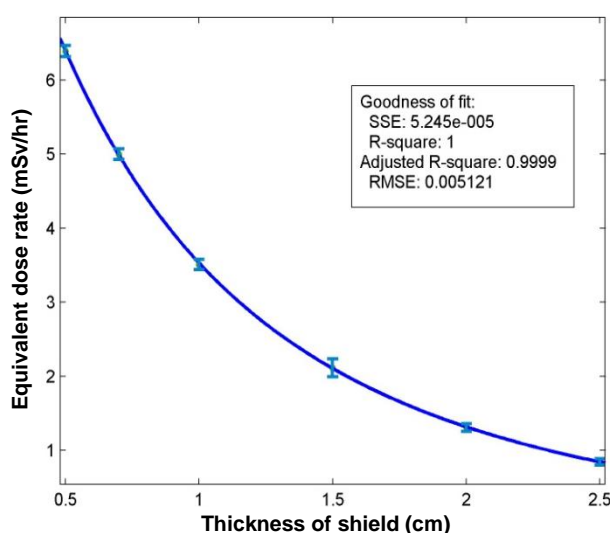
در گزارش FSAR نیروگاه اتمی بوشهر، آهنگ دز برای شبکه‌های پسمان نمک تغلیظ شده و شبکه‌های حاوی پسمان میانی، در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب، حداکثر ۸ و ۱۰mSv/hr ذکر شده است [۶]. اما همان‌طور که ملاحظه می‌شود آهنگ دز محاسبه شده بر روی سطح شبکه‌ها ۱۵mSv/hr محاسبه شده است یعنی محاسبات با استفاده از داده‌های FSAR، آهنگ دز را حدود ۱۰ درصد بیش از پیش‌بینی FSAR تقریب می‌زند. از طرف دیگر برای حمل و نقل آهنگ دز بر روی سطح باید کم‌تر از ۱۰mSv/hr باشد [۴] که این موضوع برای حمل شبکه‌های پسمان موجود محدودیت ایجاد می‌کند. اما همان‌طور که پیش از این ذکر شد این شبکه‌ها نیستند که در جاده در درون محفظه‌ی فولادی حمل و نقل قرار می‌گیرند بلکه بسته‌های سربی در آن جای داده می‌شوند. بنابراین کافی است حفاظ سربی بسته‌های داخل محفظه به گونه‌ای باشد که ضوابط حمل و نقل برای آن‌ها رعایت شود. اما برای این که کار حفاظ‌سازی یک‌بار انجام شود در طراحی این بسته‌های سربی باید ضوابط حمل و نقل درون نیروگاهی نیز بررسی گردد. بنابراین در طراحی این بسته‌ها باید به این مسئله توجه داشت که برای یک بسته‌ی سربی آهنگ دز بر روی سطح حداکثر ۲mSv/hr و در فاصله‌ی ۲ متری از آن حداکثر ۰٫۱mSv/hr باشد.

۲.۳ ضخامت حفاظ رادیولوژیکی برای یک بسته سربی

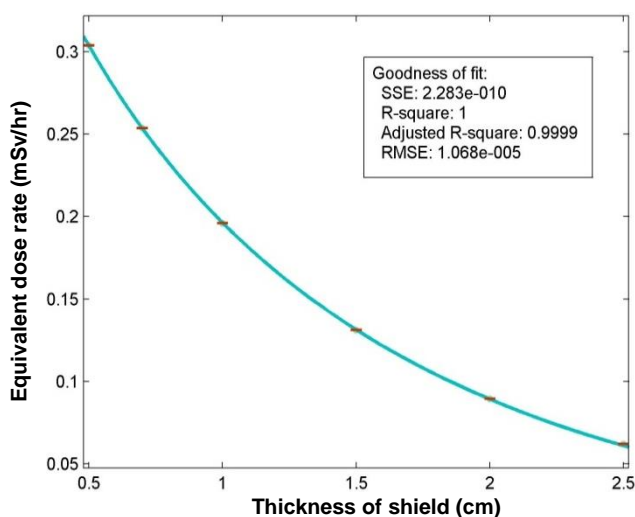
همان‌طور که گفته شد بسته‌های سربی در درون نیروگاه، از ساختمان ZC تا تریلر در نظر گرفته شده برای حمل و نقل جاده‌ای، توسط یک کامیونت حمل می‌شوند و سپس سه عدد از این بسته‌ها برای انتقال به انبار موقت در درون محفظه‌ی بزرگ قرار داده می‌شوند. از آنجایی که در حمل و نقل، بسته‌های سربی به عنوان بسته‌های پرتوزا در نظر گرفته می‌شوند، آهنگ دز بر روی سطح آن‌ها نباید از ۱۰mSv/hr فراتر رود [۴]. از طرفی چون استاندارد خاصی از طرف نیروگاه برای حمل و نقل درون نیروگاهی ارایه نشده است، استانداردهای موجود برای حمل و نقل جاده‌ای [۴] و [۵]، برای حمل و نقل درون نیروگاهی نیز در نظر گرفته می‌شود. بنابر استاندارد مذکور، لازم است آهنگ دز بر روی سطوح محفظه ۲mSv/hr و در فاصله‌ی ۲ متری از سطوح جانبی آن ۰٫۱mSv/hr شود. البته لازم به ذکر است در بالا و پایین محفظه



شکل ۷. نمودار تغییرات آهنگ دز معادل بر روی سطح جانبی بسته‌ی ترکیبی با ضخامت حفاظ سربی، و برازش آن با داده‌های عددی.



شکل ۶. تغییرات آهنگ دز معادل در زیر بسته‌ی سربی با ضخامت جداری زیرین حفاظ؛ خوبی برازش حاکی از تطابق خوب نمودار با داده‌های عددی می‌باشد.



شکل ۸. تغییرات آهنگ دز معادل در فاصله‌ی ۲ متری با ضخامت سرب به کار رفته در جداری جانبی.

براساس رابطه‌ی ۵، ۱٫۸۶cm سرب آهنگ دز در فاصله‌ی ۲ متری از دیواره‌های جانبی را به کم‌تر از ۰٫۱mSv/hr کاهش می‌دهد. بنابراین حداقل ضخامت دیواره‌های جانبی ۱٫۸۶cm باید باشد.

با توجه به روابط ۳، ۴ و ۵، برای حفاظ‌سازی بسته‌ی ترکیبی برای حمل و نقل از ساختمان ZC به سمت محفظه‌ی بارگیری ۲cm سرب برای وجوه جانبی، ۱٫۵cm برای وجه بالایی و ۲cm برای وجه زیرین پیشنهاد شد. با این میزان سرب، داده‌های عددی آهنگ دز معادل بر روی سطح و در فاصله‌ی ۲ متری از وجوه جانبی محفظه در جدول ۳ آورده شده است.

که در آن، t ضخامت حفاظ سربی می‌باشد. نتیجه‌ی برازش داده‌های عددی با رابطه‌ی (۳) در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۶ و معادله‌ی (۳) برای کاهش آهنگ دز به کم‌تر از ۲mSv/hr حداقل ضخامت سرب لازم ۱٫۵۵cm می‌باشد. در پشت جداری جانبی نیز آهنگ دز معادل با ضخامت سرب مطابق رابطه‌ی زیر به صورت دونمایی تغییر می‌کند. نمودار تغییرات آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$\text{Equivalent dose rate (mSv/hr)} = 8.491e^{-1.095t} + 0.001809e^{1.631t} \quad (۴)$$

که در آن، t ضخامت حفاظ سربی می‌باشد. با توجه به نمودار شکل ۷ و معادله‌ی ۴، ۱٫۳۳cm سرب در جداری جانبی، آهنگ دز بر روی سطح را به ۲mSv/hr کاهش می‌دهد. اما در مورد جداره‌های جانبی علاوه بر آهنگ دز بر روی سطح لازم است آهنگ دز در فاصله‌ی ۲ متری نیز بررسی گردد. نمودار تغییرات آهنگ دز معادل برحسب ضخامت حفاظ سربی در فاصله‌ی ۲ متری از جداری بسته‌ی سربی در شکل ۸ نمایش داده شده است. روند تغییرات بر رابطه‌ی زیر مبتنی است

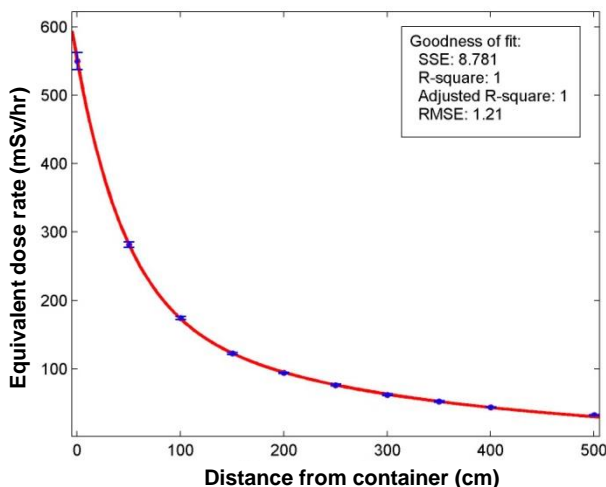
$$\text{Equivalent dose rate (mSv/hr)} = 0.1068e^{-2.54t} + 0.3987e^{-0.7523t} \quad (۵)$$



همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۹ نشان داده شده است آهنگ دز بر روی سطح محفظه و در فاصله‌ی ۲ متری از آن از مقدار توصیه شده بیش تر نمی‌باشد. پس از شبیه‌سازی بشکه‌ها و بسته‌ها نقشه‌ی دز در فواصل مختلف از سطح محفظه و روی آن به دست آمد. شکل ۱۰ نتیجه‌ی محاسبات نقشه‌ی دز را به صورت لگاریتمی نمایش می‌دهد. با استفاده از نقشه‌ی رنگ که در کنار تصویر داده شده است می‌توان آهنگ دز در نقاط مختلف را استخراج نمود. آنچه قابل توجه است نقاط بسیار داغ در داخل بسته می‌باشد که به دلیل پراکندگی و برگشت پرتو رخ می‌دهد. آهنگ دز تا ۲ متری از سطح محفظه در راستای عرضی و تا ۲ متری از سطح در راستای طولی نشان داده شده است. همان‌طور که در نقشه‌ی دز مشاهده می‌شود در حین توقف کامیون در جاده لازم است افراد غیر پرتو کار و پرتو کار فاصله‌ی لازم از محفظه را رعایت نمایند.

جدول ۴. آهنگ دز برحسب فاصله از سطح جانبی محفظه‌ی حمل پسمان

فاصله‌ی شعاعی (cm)	آهنگ دز (μSv/hr)	خطا (μSv/hr)
۰,۳۵۰۰	۵۵۰,۲۷	۱۲,۴۹
۵۰,۳۵۰۰	۲۸۱,۴	۴,۰۰
۱۰۰,۳۵۰۰	۱۷۴,۴	۲,۱۱
۱۵۰,۳۵۰۰	۱۲۲,۵	۱,۴۳
۲۰۰,۰۰۰	۹۴,۰	۱,۰۶
۲۵۰,۳۵۰۰	۷۶,۳	۱,۵۹
۳۰۰,۳۵۰۰	۶۲,۲	۱,۲۴
۳۵۰,۳۵۰۰	۵۲,۳	۰,۸۸
۴۰۰,۳۵۰۰	۴۳,۹	۰,۵۷
۵۰۰,۳۵۰۰	۳۲,۵	۰,۵۰



شکل ۹. تغییرات آهنگ دز معادل برحسب فاصله از سطح جانبی محفظه‌ی ویژه‌ی حمل پسمان.

جدول ۳. آهنگ دز بیشینه بر روی سطح و در فاصله‌ی ۲ متری از بسته‌ی سربی برای حمل و نقل درون نیروگاهی

موقعیت آشکارساز	آهنگ دز (mSv/hr)	خطای نسبی	آهنگ دز توصیه شده (mSv/hr)
بالای محفظه‌ی سربی	۱,۴	۰,۰۲	۲
زیر محفظه‌ی سربی	۱,۳	۰,۰۳	۲
روی وجه جانبی محفظه	۱	۰,۰۲	۲
۲ متری وجه جانبی محفظه	۰,۰۹	۰,۰۱	۰,۱

۳.۳ توزیع دز محفظه‌ی حامل پسمان

همان‌طور که پیش از این گفته شد، بسته‌های سربی پس از انتقال به بیرون ساختمان ZC نیروگاه اتمی بوشهر در درون یک محفظه‌ی فولادی بارگیری می‌شوند. همان‌سان که در شکل ۲ نشان داده شده است، درون هر محفظه‌ی فولادی ۳ بسته‌ی سربی قرار دارد. در بخش قبل ضخامت مناسب بسته‌ی سربی برای حمل و نقل درون نیروگاهی به دست آمد. از آنجایی که مقرر شده است سه عدد از این بسته‌ها درون محفظه‌ی فولادی قرار داده شود و به سمت انبار موقت حمل گردد، لذا لازم است آهنگ دز بر روی سطح محفظه و در فاصله‌ی ۲ متری از آن به ترتیب از ۲mSv/hr و ۰,۱mSv/hr تجاوز نکند. با ضخامت‌های مطرح شده برای بسته‌ی سربی آهنگ دز بر روی سطوح بالایی، زیرین و جانبی محفظه به ترتیب $۰,۶۴ \pm ۰,۰۱$ ، $۰,۴۰ \pm ۰,۰۰۸$ ، $۰,۶۹ \pm ۰,۰۳$ و $۰,۶۳ \pm ۰,۰۱$ میلی‌سیورت بر ساعت می‌باشند. اما آهنگ دز در فاصله‌ی ۲m از سطح جانبی محفظه‌ی فولادی $۰,۱۱ \pm ۰,۰۰۰$ mSv/h بود (خطا کم‌تر از $۰,۰۰۱$ mSv/h بود). این آهنگ دز مقدار اندکی بیش‌تر از استاندارد توصیه شده یعنی $۰,۱۰ \pm ۰,۰۰۰$ mSv/h می‌باشد. این افزایش در فاصله‌ی ۲ متری برای محفظه‌ی بزرگ به دلیل جمع شدن آهنگ دز ۳ بسته می‌باشد. با توجه به نتیجه‌ی به دست آمده، ضخامت وجوه جانبی به $۲,۲$ cm افزایش داده شد و آهنگ دز مجدداً بررسی گردید. برای این ضخامت، نتایج عددی آهنگ دز برحسب فاصله از وجه جانبی محفظه‌ی فولادی در جدول ۴ آورده شده است. نمودار کاهش دز برحسب فاصله از سطح جانبی محفظه در شکل ۹ نشان داده شده است. رابطه‌ی کاهش دز برحسب فاصله از محفظه به صورت زیر می‌باشد

$$\text{Equivalent dose rate (mSv/hr)} = 369e^{-0.02099x} + 184.1e^{-0.003611x} \quad (۶)$$

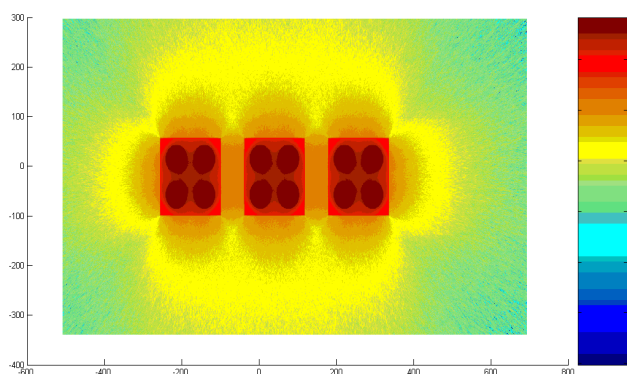


پی‌نوشت‌ها:

۱. Hydro & Nuclear Co. Ltd
۲. Server
۳. Xenon
۴. Error Bar

References:

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Classification of Radioactive Waste. Safety Series No. 111-G-I.I Vienna (1994).
2. E.T. Cheng, "Waste management aspect of low activation materials," Fusion Engineering and Design. 48: 455-465 (2000).
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. INTERIM STORAGE OF RADIOACTIVE WASTE PACKAGES. TECHNICAL REPORTS SERIES 390 VIENNA (1998).
4. نظام ایمنی هسته‌ای کشور، "ضوابط ایمن ترابری مواد پرتوزا،" سازمان انرژی اتمی ایران، INRA-RP-RE-100-70/3-0-Aza (۱۳۸۶).
5. International Atomic Energy Organization (IAEO). Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. TS-R-1 VIENNA (2009).
6. Atomic Energy Organisation Of Iran. Nuclear Power Plant Division. 49. BU. 1.0.0.OO. FSAR. RDR001 Tehran (2007).
7. Minchul Kim, Jongrak Choi, Sunghwan Chung, and Jaehoon Ko, "Radiation shielding evaluation of IP-2 packages for low- and intermediate- level radioactive waste," Nuclear Engineering and Technology, 40 (6): 511-516 (2008).
8. LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, "User's Guide" (2003).



شکل ۱۰. نقشه‌ی لگاریتمی دز محفظه‌ی بارگیری شده با پسمان‌های پرتوزای سطح میانی.

۴. نتیجه‌گیری

آهنگ دز برحسب فاصله از بشکه‌های حامل پسمان نمک تغلیظ شده تعیین شد. اگرچه آهنگ دز بر روی بشکه‌ها بیش از 10 mSv/hr به دست آمد ولی با استفاده از بسته‌بندی مجدد، این مسئله حل شد. برای جلوگیری از پیچیدگی کار ساخت، بسته‌های سربی طوری طراحی شدند که علاوه بر شرایط حمل و نقل تک بسته‌ای درون نیروگاهی، شرایط حمل و نقل سه بسته‌ای در جاده‌ی بین نیروگاه تا انبار موقت را هم فراهم می‌آورند. برای این منظور پس از شبیه‌سازی ضخامت‌های مختلف برای بسته‌ی سربی، ضخامت بهینه 2.2 cm برای وجوه جانبی و 1.5 cm برای وجه بالایی و 2 cm برای وجه زیرین پیشنهاد شد. با این ضخامت آهنگ دز بر روی سطح تک بسته‌ی سربی درون نیروگاه و فاصله 2 متری از وجوه جانبی آن به ترتیب $0.80 \pm 0.02 \text{ mSv/hr}$ و $0.77 \pm 0.00 \text{ mSv/hr}$ می‌باشد. هم‌چنین برای ضخامت مذکور، آهنگ دز بر روی سطح و در فاصله‌ی 2 متری از محفظه‌ی فولادی که برای حمل و نقل بسته‌ها از محل نیروگاه تا انبار موقت نگهداری پسمان‌ها در نظر گرفته شده بود به ترتیب $0.55 \pm 0.012 \text{ mSv/hr}$ و $0.94 \pm 0.01 \text{ mSv/hr}$ به دست آمد که ضوابط حمل و نقل مواد پرتوزا را به خوبی رعایت می‌کند.

تقدیر و تشکر

برخود لازم می‌دانیم از زنده یاد استاد عزیز پرفسور شهید مجید شهریاری که بنیان‌گذار شبیه‌سازی با کد MCNP در ایران بود یاد کنیم و از آقای دکتر اصغر مالکی به خاطر بحث‌های مفیدی که داشتیم قدردانی نماییم. از مهندس مهدی نجات به خاطر همکاری‌های ارزنده‌ای که در استفاده از AutoCAD داشتند تشکر می‌کنیم. از پرسنل دفتر تحلیل ایمنی شرکت پسمان‌داری صنعت هسته‌ای به خاطر همکاری مفیدی که در طی این پژوهش داشتند صمیمانه تشکر و تقدیر می‌گردد.