

توسعه یک حفاظ ترکیبی نوترون و گاما برای چشمه کالیفرنیم-۲۵۲ با استفاده از کد

مونت کارلوی MCNPX

محمدحسین اسدی کما سائی*^۱ و مرتضی اکبری^۱

دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

^۱تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فنی مهندسی، کدپستی: ۰۱۲۳۴-۵۶۷۸۹.

پست الکترونیکی: asadi.mohammad1374@gmail.com

چکیده

در طول دهه‌ها، حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز یک دغدغه جهانی بوده است. در حوزه حفاظ در برابر اشعه، فوتون‌ها و نوترون‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا این پرتوها بار الکتریکی نداشته و عمق نفوذ بالایی در مواد مختلف دارند. یکی از چشمه‌های کاربردی نوترون، کالیفرنیم-۲۵۲ است که شار بسیار بالایی از نوترون‌های سریع را به همراه فوتون‌های گاما تولید می‌کند. طراحی یک حفاظ با مواد مناسب و کاهش حجم و وزن حفاظ جهت سهولت در جابه‌جایی منبع با حفاظ و جهت کاهش دز گاما و نوترون یک امر ضروری است. در این تحقیق، ویژگی‌های حفاظتی کنتیوم، استیل ضدزنگ، تنگستن کاربید و پلی‌اتیلن بیسموت (۷۸٪/۵ وزنی) برای کاهش دز معادل گاما و منیزیوم بوروهیدرید، آلومینیوم بوروهیدرید، زیرکونیوم بوروهیدرید، لیتیم بوروهیدرید، توریم بوروهیدرید، برلیوم بوروهیدرید، پریمادکس و سدیم سیانوبوروهیدرید برای کاهش دز معادل نوترون، با کمک کد مونت کارلوی MCNPX شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که منیزیوم بور هیدرید با ضخامت ۱۷/۵ cm و کنتیوم با ضخامت ۱ cm منجر به کاهش ۵/۵ درصدی در آهنگ دز کل در فاصله ۱ متری از چشمه و کاهش ۳۹ درصدی ضخامت حفاظ نسبت به مقاله مرجع (جنس و ضخامت آن در متن بیان شده است) گردید. بنابراین، منیزیوم بور هیدرید و کنتیوم به ترتیب به‌عنوان بهترین ماده جاذب نوترون و گاما تعیین شدند. در ادامه این مطالعه، توسعه و بررسی مواد پیشرفته دیگری به‌عنوان یک حفاظ بهینه در یک میدان آمیخته نوترون و گاما پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌گان: نوترون، گاما، حفاظ‌سازی، حفاظت در برابر اشعه، شبیه‌سازی مونت کارلو.

۱. مقدمه

کالیفرنیم-۲۵۲ ($Cf-252$) است که شار نوترونی بسیار بالا برای تحقیقات مختلف فراهم می‌کند، به طوری که در هر میکروگرم از آن می‌تواند حدود هزار میلیارد نوترون در هر ثانیه گسیل شود [۱]. یکی از کاربردهای خاصی که استفاده از $Cf-252$ را مورد توجه ویژه قرار داده است، درمان سرطان با روش گیراندازی نوترون حرارتی توسط بور-۱۰ است [۲]. یکی

به‌کارگیری پرتوهای یون‌ساز گوناگون در صنایع مختلف به‌ویژه در صنعت پزشکی در عرصه تصویربرداری و پرتودرمانی اجتناب‌ناپذیر است. نوترون‌ها ذرات بدون باری هستند که بدون این‌که تحت تأثیر میدان کولمبی قرار گیرند، می‌توانند با محیط برهم‌کنش انجام دهند و همین ویژگی منجر به عمق نفوذ به نسبت بالای آن‌ها شده است. از مهم‌ترین منابع نوترون چشمه

از مهم‌ترین مسائل در فناوری و صنعت هسته‌ای، حفاظت در برابر اشعه است. در حفاظ‌سازی، پرتوهای نوترون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، زیرا به دلیل ختنی بودن، نفوذ زیادی در مواد گوناگون دارند و در صورتی که با حفاظ مناسب تضعیف نشوند می‌توانند به انسان و موجود زنده، دستگاه‌های الکترونیکی آسیب جدی وارد سازند [۳]. برای حفاظ چشمه نوترون، مواد با سطح مقطع کل (مجموع سطح مقطع‌های جذب و پراکندگی) بالا مناسب هستند. برای طراحی حفاظ یک چشمه نوترونی ابتدا انرژی نوترون‌های سریع را با مواد مناسب کاهش داده و سپس آن‌ها به صورت نوترون حرارتی جذب می‌شوند. مناسب‌ترین مواد برای کند کردن نوترون‌های سریع، مواد با عدد جرمی پایین است که بهترین آن‌ها مواد هیدروژن‌دار هستند؛ از طرفی، مناسب‌ترین مواد برای جذب نوترون‌های حرارتی مواد با ترکیبات بور هستند [۴]. در طراحی حفاظ چشمه $Cf-252$ باید پرتوهای گاما را که به صورت مستقیم توسط شکافت خودبه‌خود و فروپاشی محصول شکافت یا به صورت غیرمستقیم از واکنش (n, γ) ساطع می‌شوند، در نظر گرفت. طراحی یک حفاظ مناسب و مؤثر در برابر نوترون و گاما، نیازمند انتخاب مواد با ضخامت لازم و ساختار مناسب است. در گذشته طراحی حفاظ چشمه نوترونی با مواد ساده نظیر آب و بتن و سرب انجام می‌گرفت که استفاده از این مواد به فضای بزرگی برای طراحی حفاظ احتیاج داشت. امروزه تمایل به استفاده از مواد پیشرفته (ترکیبی از حداقل دو ماده) بیشتر شده است، زیرا نشان داده شده است که مواد ترکیبی می‌توانند در ابعاد و حجم کمتر، بازدهی حفاظتی بیشتری برای نوترون‌ها و فوتون‌ها داشته باشند.

وگاکاریلو^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک حفاظ ترکیبی از پلی‌استر و آب را برای چشمه $Cf-252$ بررسی کردند. طراحی حفاظ چشمه برای چهار حالت منبع در آب، منبع در ترکیب

پلی‌استر و آب، منبع در خلأ و منبع در هوا انجام شد. نتایج نشان داد که حفاظ ترکیبی پلی‌استر و آب دز معادل نوترون و گاما را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد [۵].

نصرآبادی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به طراحی یک حفاظ فشرده نوترونی چشمه $Cf-252$ پرداخت. آن‌ها از پنج لایه برای حفاظ استفاده کردند: بریلیم (بازتابنده)، پارافین (کندکننده اول)، پارافین/گرافیت (۱۰٪ وزنی) (کندکننده دوم)، کاربید بور (B_4C) (جاذب نوترون) و اکسید تنگستن-سرب (جاذب گاما). نتایج آن‌ها نشان داد که حجم و وزن حفاظ به اندازه قابل توجهی کاهش یافت و در نتیجه بازدهی حفاظتی افزایش پیدا کرد [۶].

قراتلو و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی قابلیت استفاده از هیدریدهای فلزی به‌عنوان کندکننده و حفاظ نوترون به کمک کد MCNPX پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده در این پروژه نشان داد که هیدریدهای فلزی در کاهش انرژی نوترون و کاهش حجم حفاظ به‌طور نسبی نسبت به مواد متداول مؤثرتر هستند [۷].

فنتیدیس^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با کمک کد MCNP4B توانایی مواد ساده و پیشرفته را در حفاظت از چشمه $Cf-252$ قابل‌حمل در برابر تابش‌های نوترون و گاما با هم مقایسه کرد. نتایج نشان داد که مواد پیشرفته توانایی بالاتری در حفاظ نسبت به مواد ساده دارند [۸].

زنگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷، یک حفاظ فشرده برای چشمه قابل حمل امرسیوم-بریلیم ($Am-Be$) طراحی کردند. در این پژوهش از یک لایه 13 cm تنگستن به‌عنوان کندکننده نوترون و یک لایه پلی‌اتیلن حاوی $1/2$ درصد B_4C با ضخامت 18 cm به‌عنوان جاذب نوترون‌های حرارتی استفاده کردند و مقدار دز را تا مقدار توصیه شده $20\ \mu Sv$ کاهش دادند [۹].

مودب و همکاران در سال ۲۰۱۹، مطالعه نصرآبادی و همکارانشان را توسعه داده و مواد حفاظتی پیشرفته‌ای مانند

³ Zhang

¹ Vega-Carrillo

² Fantidis

هیدرید فلزی (جدول ۱) برای کاهش دز معادل گاما و نوترون، با کد مونت کارلوی MCNPX [۱۷] (نسخه ۲/۶) شبیه‌سازی شد.

۲. مواد و روش‌ها

ساختار حفاظ و چشمه بر اساس مرجع [۶] شبیه‌سازی شده است. ابتدا حفاظ مشابه مرجع [۶] پیاده‌سازی شد تا صحت‌سنجی انجام شود. چشمه نوترونی Cf-۲۵۲ استوانه‌ای به ارتفاع ۱۴ mm و قطر ۷/۵ mm با فعالیت ۱ GBq در مرکز حفاظ قرار گرفته است. جرم چشمه ۵۰ μg و نرخ گسیل نوترون و گامای آن به ترتیب $۱/۱۵ \times 10^8$ n/s و $۶/۵ \times 10^8$ γ/s در نظر گرفته شد. طیف گسیل چشمه Cf-۲۵۲ با کمک طیف پیشفرض وات (Watt) در MCNPX به دست آمد. یک لایه پوسته کروی از جنس بریلیوم ($۱/۸۵$ g/cm^۳) به ضخامت ۱ cm به‌عنوان بازتابنده، یک پوسته استوانه‌ای از جنس پارافین ($۰/۹۳$ g/cm^۳) به ضخامت ۵ cm به‌عنوان کندکننده اول، یک پوسته استوانه‌ای به ضخامت ۵ cm از جنس پارافین/گرافیت (۱۰٪ وزنی) ($۰/۹۷$ g/cm^۳) به‌عنوان کندکننده دوم، یک پوسته استوانه‌ای به ضخامت ۱۷ cm از B_۴C ($۲/۵$ g/cm^۳) به‌عنوان جاذب نوترون حرارتی و یک پوسته استوانه‌ای به ضخامت ۱ cm اکسید تنگستن و سرب با فرمول شیمیایی PbWO_۴ ($۸/۲۴$ g/cm^۳) به‌عنوان جاذب گاما شبیه‌سازی گردید. در شبیه‌سازی، ساختار کامپوزیت و دیگر آلیاژها همگن در نظر گرفته شده است. ارتفاع هر لایه استوانه‌ای برابر با شعاع آن در نظر گرفته شده است. شکل ۱ ساختار حفاظ را در صفحه y-z نمایش می‌دهد. چشمه در مرکز حفاظ قرار دارد.

کنرتیوم^۱ و منیزیوم بوروهیدرید (Mg(BH_۴)_۲) را برای چشمه Am-Be با کد MCNP مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که این مواد دارای ویژگی‌های حفاظتی بسیار خوبی در برابر نوترون و گامای چشمه Am-Be است [۱۰].

الشیخ^۲ در سال ۲۰۲۰ با کد MCNP به بررسی اثرات حفاظتی آلومینیوم اکسید، منگنز فلوراید فلوئنتال و آلومینیوم فلوراید برای چشمه Cf-۲۵۲ پرداختند [۱۱].

باسو^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۰ به دو روش تجربی و شبیه‌سازی، یک حفاظ متشکل از کامپوزیت‌های پلیمری را برای چشمه Am-Be توسعه دادند [۱۲].

گویموشوآپ^۴ و همکارانشان در سال ۲۰۲۰ با کد مونت کارلوی PHITS به بررسی یک حفاظ چندلایه از آهن، سرب، گرافیت و بور پرداختند. آن‌ها بهترین چیدمان حفاظ در برابر چشمه Cf-۲۵۲ را به ترتیب به صورت آهن، گرافیت، بور و سرب یافتند [۱۳]. همچنین، یک تحقیق مشابه، توسط اکورت^۵ و همکارانشان در سال ۲۰۲۲ با کد مونت کارلوی FLUKA انجام شد [۱۴].

مختاری و همکاران در سال ۲۰۲۱ با کد مونت کارلوی MCNP یک حفاظ پلیمری مخلوط‌شده با عناصر نانومتری اکسید سرب را توسعه دادند که بتواند به‌طور هم‌زمان در برابر تابش گاما و نوترون مقاومت کند [۱۵].

کویی^۶ و همکاران در سال ۲۰۲۴ با کمک کد مونت کارلوی FLUKA، اثرات حفاظتی ترکیب مواد پلیمری با Gd_۲O_۳ و Sm_۲O_۳ را برای چشمه Cf-۲۵۲ مورد بررسی قرار دادند [۱۶].

در این مطالعه، در ادامه مطالعه مرجع [۶] و با هدف توسعه مواد آن، ویژگی‌های حفاظتی مواد پیشرفته‌ای مانند آلیاژ کنرتیوم، استیل ضدزنگ (SS۳۰۴)، تنگستن کاربید (WC) و چندین

^۴ Guembou Shouop

^۵ Akkurt

^۶ Cui

^۱ Kennertium

^۲ Elsheikh

^۳ Basu

جدول (۱): مواد پیشرفته به‌عنوان جاذب نوترون و گاما.

چگالی (g/cm ^۳)	جاذب گاما	چگالی (g/cm ^۳)	جاذب نوترون
۷/۸۴	C _۲ H _۴ +۷۸/۵%Bi	۰/۷	Be(BH _۴) _۲
۸/۰	**SS۳۰۴	۱/۲	NaBH _۴ CN
۱۵/۶	WC	۱/۴۸	Mg(BH _۴) _۲
۱۶/۸	کنرتیوم***	۲/۵۹	Th(BH _۴) _۴
-	-	۱/۱۳	Zr(BH _۴) _۴
-	-	۰/۶۶	LiBH _۴
-	-	۰/۵۴۹	Al(BH _۴) _۳
-	-	۱/۰	*Premadex

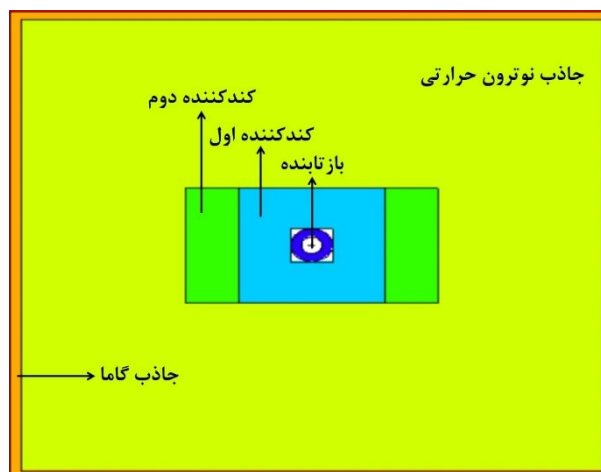
*۱۱/۴%H+۱۳%Li+۳۹/۹%O+۴۷/۴%C

**۰/۱۹%C+۶۹%Fe+۸.۶۷%Ni+۲۰/۱%Cr+۱%Mn+۰/۹۷%Si

+۰/۰۴%P+۰/۰۳%S

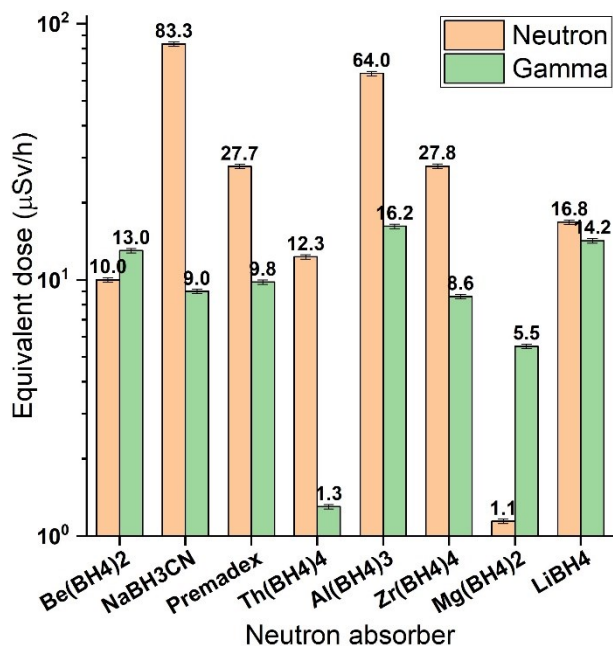
***۷۶%W+۹%Ni+۱۵%Cu

لازم به ذکر است که ابعاد لایه‌های حفاظ کاملاً برابر با ابعاد مرجع [۶] تعیین شده‌اند. محاسبات دز معادل یکبار با جایگزین کردن مواد جاذب نوترون به جای لایه‌های بازتابنده، کندکننده اول و دوم و ماده جاذب نوترون و یکبار با جایگزین کردن مواد جاذب گاما به جای PbWO_۴ انجام شده است. بنابراین، در مرحله اول، یک حفاظ یکپارچه از یک جنس مشخص با ضخامت ۲۷/۵ cm و ارتفاع ۵۶ cm از یک ماده جاذب نوترون به همراه یک لایه ۱ cm از PbWO_۴ به‌عنوان جاذب گاما استفاده شده است. در مرحله دوم، چیدمان حفاظ مرجع [۶] حفظ شد و تنها لایه PbWO_۴ توسط یک لایه ۱ cm از مواد جدید جاذب گاما که در جدول ۱ بیان شده‌اند، جایگزین گردید. بدین ترتیب، کارآمدترین حفاظ با این مواد ذکرشده برای نوترون و گاما مشخص شدند. سپس، حفاظ نوترون و گامای منتخب، در کنار یکدیگر به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفتند. به این معنا که یک حفاظ یکپارچه با ضخامت ۲۷/۵ cm و ارتفاع ۵۶ cm از جاذب نوترونی که بهترین عملکرد (یعنی کمترین دز معادل) را داشته است در کنار یک لایه ۱ cm از جاذب نوترونی که بهترین عملکرد (یعنی کمترین دز معادل) را داشته است، قرار

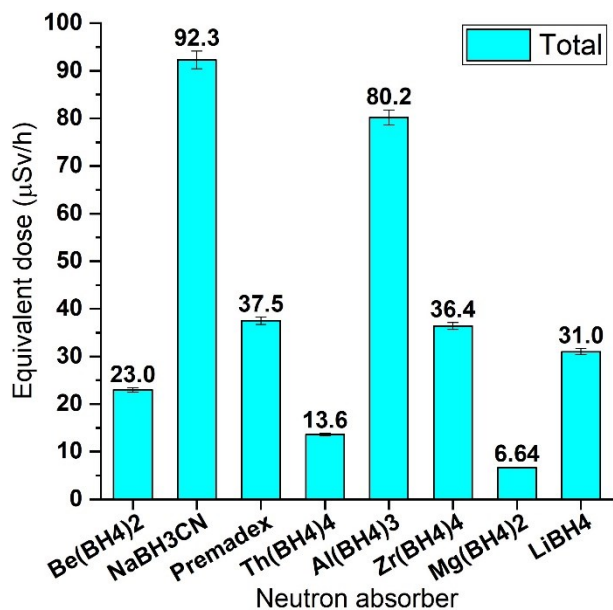


شکل (۱): هندسه حفاظ و چشمه شبیه‌سازی شده در کد MCNP.

از تالی F_۲ برای محاسبه شار متوسط و برای آهننگ دز معادل از ضرایب تبدیل شار به دز موجود در کد MCNPX که به‌صورت تجربی به‌دست آمده‌اند (بر اساس گزارش انجمن هسته‌ای آمریکا (ANS) [۱۸])، استفاده گردید. در واقع، یک سطح به طول اضلاع ۱ cm در فاصله ۱ m از چشمه تعریف شد و سپس دز روی این سطح محاسبه شده است. همچنین، برای این‌که مقادیر دز معادل نوترون و گاما در فعالیت چشمه ضرب شود، از کارت FMn استفاده شد [۱۷]. به‌منظور صحت‌سنجی با مرجع [۶]، دز معادل نوترون و گاما در فاصله ۱ m از چشمه Cf-۲۵۲ روی محور عرضی محاسبه شد. در ادامه، مواد پیشرفته جدیدی به‌عنوان جاذب نوترون و گاما مورد بررسی قرار گرفتند. ویژگی‌های این مواد برای جذب و کند کردن نوترون و همچنین برای تضعیف گاما در جدول ۱ درج شده است. مؤلفه‌های عنصری استیل ضدزنگ و کنرتیوم در زیر جدول ۱ بیان شده است. این مواد بر اساس مقالات مرتبط منتشرشده انتخاب شده‌اند [۲۰، ۱۹، ۱۰۸]. در مورد علت انتخاب این مواد می‌توان به قابلیت بالای آن‌ها در کند کردن نوترون‌های سریع و همچنین جذب نوترون‌های حرارتی اشاره کرد. در مورد حفاظ‌های گاما نیز می‌توان به ویژگی‌های حفاظتی اثبات‌شده در مراجع مذکور اشاره کرد.



شکل (۲): آهنگ دز معادل نوترون و گامای حاصل شده برای هشت جاذب مختلف نوترون با ضخامت ۲۷/۵ cm.



شکل (۳): آهنگ دز معادل کل حاصل شده برای هشت جاذب مختلف نوترون با ضخامت ۲۷/۵ cm.

گرفت. از آنجایی که انرژی میانگین طیف نوترون Cf-۲۵۲ حدود ۲/۳ MeV است [۲]، ضریب توزین پرتو برای نوترون‌های سریع برابر با ۲۰ و برای فوتون‌ها برابر با ۱ است [۲۱]. روند کار این مطالعه، مشابه مطالعه شبیه‌سازی مؤدب و همکاران [۱۰] است با این تفاوت که چشمه مورد استفاده ما Cf-۲۵۲ است.

۳. نتایج و بحث

به‌منظور صحت‌سنجی، جنس تمام لایه‌های حفاظ دقیقاً با مرجع [۶] یکسان در نظر گرفته شد. مقادیر آهنگ دز گاما و نوترون و همچنین آهنگ دز کل (بر حسب µSv/h) در جدول ۲ آمده است. فاصله نقطه اندازه‌گیری از چشمه، ۱ m در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج در جدول ۲ مطابقت خوبی با مرجع [۶] دارد. اختلاف نسبی آهنگ دز کل ۰/۹ درصد است که نشان از صحت شبیه‌سازی دارد. در ادامه، با حفظ ماده جاذب گامای مرجع [۶]، یعنی $PbWO_4$ (۱ cm)، مواد جاذب نوترون با ضخامت ۲۷/۵ cm را به جای تمام لایه‌های قبلی حفاظ در مرجع [۶] قرار داده شدند و آهنگ دز گاما و نوترون به‌دست آمده در شکل ۲ آمده است. همچنین آهنگ دز کل در شکل ۳ رسم شده است.

جدول (۲): آهنگ دز معادل به‌دست آمده (بر حسب µSv/h) بر اساس مواد پیشنهادی مرجع [۶].

آهنگ دز معادل نوترون	آهنگ دز معادل گاما	آهنگ دز معادل کل	آهنگ دز کل مرجع [۶]
۱۵/۰	۶/۷۴	۲۱/۷	۲۱/۹

میله‌های خطا در شکل‌های ۲ و ۳، یک عدم قطعیت ۲٪ را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار آهنگ دز معادل در شکل ۲، مواد $Mg(BH_4)_2$ و $Th(BH_4)_4$ بهترین عملکرد را در کاهش دز معادل کل دارند. هرچند $Be(BH_4)_2$ نسبت به $Th(BH_4)_4$

جدول (۴): سطح مقطع ماکروسکوپی جذب، پراکندگی و کل نوترون حرارتی و سریع برای دو ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ و $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$.

نوع نوترون (انرژی)	جذب (cm^{-1})	پراکندگی (cm^{-1})	کل (cm^{-1})
حرارتی $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$	۱۶/۶۸	۶/۶۳۱	۲۶۸/۲
$\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ (۲۵ meV)	۲۶/۲۰	۱۰/۴۶	۴۲۴/۲
سریع $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$	$3/839 \times 10^{-4}$	۰/۲۷۱۳	۰/۲۹۶۱
$\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ (۲ MeV)	$2/802 \times 10^{-6}$	۰/۴۷۴۲	۰/۵۰۵۲

باتوجه به جدول ۳ و ۴، هرچند سطح مقطع میکروسکوپی برای ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ نسبت به ترکیب $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ در همه برهمکنش‌ها بیشتر است، اما سطح مقطع‌های ماکروسکوپی نوترون برای ترکیب $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ بیشتر از ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ به دست آمده‌اند. پویش آزاد میانگین یک پارامتری است که در مسائل مربوط حفاظت‌سازی بسیار کاربردی است و عبارت است از مسافتی که نوترون در بین دو برهمکنش متوالی خود طی می‌کند [۲۴]. این پارامتر با معکوس سطح مقطع ماکروسکوپی کل برابر است. باتوجه به جدول ۴، پویش آزاد میانگین برای نوترون‌های حرارتی در ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ و $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ به ترتیب برابر با 0.0372 mm و 0.0235 mm است. این عامل برتری ترکیب $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ را نسبت به $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ اثبات می‌کند. از طرفی، عنصر H به‌عنوان بهترین ماده کند کننده نوترون‌های سریع شناخته می‌شود، زیرا نوترون سریع اولیه در هر برخورد سر به سر با اتم هیدروژن می‌تواند تمام انرژی خود را منتقل کند. بنابراین، یکی از علت‌های وجود شار نوترون حرارتی بیشتر در پشت حفاظ $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ نسبت به حفاظ $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ عبارت است از همین عناصر هیدروژنی مضاعفی که در ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ وجود دارد. تعداد عناصر B و H در ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ دو برابر ترکیب $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ است. با این حال، میزان دز معادل کل حاصل از نوترون برای $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ بیشتر از $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ شده است. در توجیه این امر، می‌توان به

میزان دز نوترون را بهتر کاهش می‌دهد، ولی به دلیل این که در برابر گاما حفاظ خوبی نیست، آهنگ دز کل برای $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ حدود ۴۱٪ کمتر شده است که مطلوب‌تر است. ماده $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ تنها مزیتی که نسبت به $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ دارد، آن است که دز معادل گاما کمتری از آن حاصل می‌شود. در حالی که $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ دز معادل نوترونی حدود چهار برابر کمتر از دز معادل نوترونی حاصل از $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ را ارائه می‌کند. بر طبق شکل ۲، دز معادل کل $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ از $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ پایین‌تر است. برای توجیه این رفتار مشاهده شده باید به تفاوت سطح مقطع این دو ترکیب دقت کرد. با توجه به داده‌های سطح مقطعی کل نوترون (سریع و حرارتی) بر اساس مرجع [۲۳]، متوجه می‌شویم که سطح مقطع کل (مجموع سطح مقطع‌های پراکندگی، جذب، شکافت و...) برای دو ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ و $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ کاملاً متفاوت است. سطح مقطع میکروسکوپی جذب، پراکندگی و کل برای نوترون حرارتی و سریع برای دو ترکیب $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ و $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ در جدول ۳ لیست شده است. برای نمایندگی از نوترون‌های سریع از انرژی میانگین ۲ MeV استفاده شده است. جدول ۴ نیز سطح مقطع ماکروسکوپی را برای این دو ترکیب نشان می‌دهد. روند محاسبه سطح مقطع ماکروسکوپی بر اساس مرجع [۲۴] انجام شده است.

جدول (۳): سطح مقطع میکروسکوپی جذب، پراکندگی و کل برای نوترون حرارتی و سریع برای $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ و $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ [۲۳].

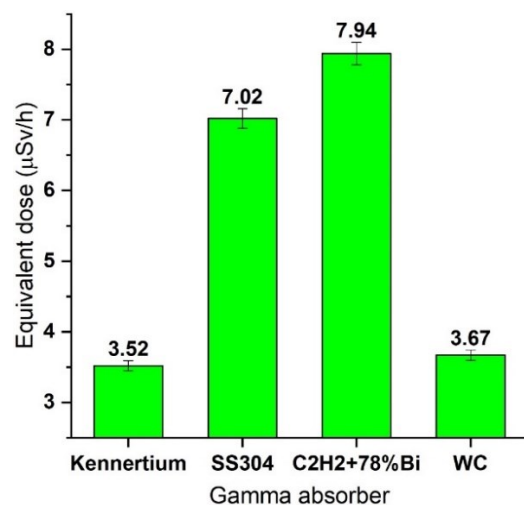
نوع نوترون (انرژی)	جذب (barn)	پراکندگی (barn)	کل (barn)
حرارتی $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$	$3/080 \times 10^3$	$1/224 \times 10^3$	$4/903 \times 10^4$
$\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ (۲۵ meV)	$1/028 \times 10^3$	$6/101 \times 10^1$	$2/470 \times 10^4$
سریع $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$	۰/۰۷۰۹	۰/۰۹۳	۰۴/۶۸۶
$\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ (۲ MeV)	$1/163 \times 10^{-4}$	۲۷/۶۶۶	۲۹/۴۷۶

باتوجه به شکل ۴، عملکرد آلیاژ کنتریوم در کاهش دز معادل گاما نسبت به سایر مواد مورد مطالعه، بهتر است. البته ناگفته نماند که WC نیز خواص حفاظتی خوبی در برابر گاما از خود نشان داده است، اما به دلیل این که اختلاف نسبی آن با کنتریوم، که ۰.۴٪ است، بیش از عدم قطعیت آماری (۲٪) است، پس از لحاظ آماری قابل اهمیت و غیر قابل چشم‌پوشی است.

بنابراین، ماده کنتریوم به عنوان بهترین ماده جاذب گاما در این مطالعه، انتخاب می‌شود. همچنین، استفاده از استیل ضدزنگ و ترکیب پلی اتیلن با ۷۸/۵٪ بیسموت برای تضعیف گامای حاصل از چشمه Cf-۲۵۲ توصیه نمی‌شود، زیرا آلیاژهای دیگری چون کنتریوم و WC تا حدود ۰.۵۳٪ تضعیف بهتری را ارائه می‌کنند. علت برتری کنتریوم را می‌توان به این نسبت داد که کنتریوم به عنوان یک ماده با چگالی بالا در نظر گرفته می‌شود. پس از انتخاب بهترین جاذب نوترون و گاما در این مطالعه، یکبار نیز آهنگ دز معادل کل را برای حالتی محاسبه شده است که این دو ماده به عنوان جاذب نوترون و گاما به طور هم‌زمان استفاده شده باشند. دز معادل کل در این حالت برابر با $4/31 \mu\text{Sv/h}$ حاصل شد. این مقدار تفاوت بارزی با مقدار معادل دز کل در فاصله ۱ m در مرجع [۶] دارد. بر اساس توصیه‌های مرجع [۲۱]، آستانه دز کل در فاصله ۱ m روی محور عرضی از یک منبع خارجی نباید بیشتر از $25 \mu\text{Sv/h}$ باشد؛ بنابراین، از آنجایی که حفاظ‌های با ضخامت کمتر از نظر اقتصادی و کارآمدی، کاربردی‌تر هستند، محاسبات دزیمتری را برای ضخامت‌های کمتر تکرار کردیم. نتایج این بخش از شبیه‌سازی به ترتیب در جدول‌های ۳ تا ۵ آمده است. ضخامت‌های مختلف بر حسب cm درون پرانتز در جدول‌های ۳ تا ۵ درج شده است.

همان مفهوم سطح مقطع ماکروسکوپی نوترون اشاره کرد که در جدول ۴ بیان گردید. این نتایج با مرجع [۲۲] کاملاً سازگار است. در مرجع [۲۲] نشان داده شده است که شار نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع بعد از برخورد نوترون‌های سریع اولیه به ماده $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ به مراتب کمتر از ماده $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ است. بنابراین، صرف چگالی بالاتر داشتن یا حاوی عناصر هیدروژن دار بیشتری بودن، به معنای بهتر بودن یک حفاظ برای نوترون‌ها نخواهد بود. ناگفته نماند که عنصر Th دارای اندکی سطح مقطع شکافت برای نوترون‌های حرارتی است که می‌تواند منجر به افزایش شار نوترون شود [۲۲].

از طرفی، این که چگالی $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ از $\text{Th}(\text{BH}_4)_4$ کمتر است، خود یک مزیت دیگر محسوب می‌شود. از آنجایی که یکی از اهداف بهینه‌سازی حفاظ، کاهش وزن آن است، بنابراین، با توجه به دلایل فوق ماده $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ به عنوان بهترین ماده جاذب و کندکننده نوترون در این مطالعه، انتخاب می‌شود. این ویژگی بالای حفاظتی $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ با مرجع [۱۰] مطابقت دارد. در ادامه، با حفظ مواد بازتابنده، کندکننده اول و دوم و جاذب نوترون بر طبق مرجع [۶]، مواد جاذب گاما با ضخامت ۱ cm (در جدول ۱) را قرار دادیم که آهنگ دز حاصل شده در شکل ۳ آمده است. میله‌های خطا در شکل ۴، یک عدم قطعیت ۰.۲٪ را نشان می‌دهد.



شکل (۴): آهنگ دز گامای حاصل شده برای جاذب‌های مختلف گاما.

جدول (۳): آهنگ دز معادل گاما به دست آمده (برحسب $\mu\text{Sv/h}$) برای جاذب نوترون و گامای انتخاب شده در این مطالعه.

دز معادل گاما	جاذب‌های نوترون و گاما با ضخامت‌های مختلف
۳/۳۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۷/۵ cm)+Kennertium (۱/۵ cm)
۳/۶۳	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۶/۵ cm)+Kennertium(۱/۴۵ cm)
۴/۰۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۵/۵ cm)+Kennertium (۱/۴ cm)
۴/۴۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۴/۵ cm)+Kennertium (۱/۳۵ cm)
۴/۸۵	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۳/۵ cm)+Kennertium (۱/۳ cm)
۵/۳۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۲/۵ cm)+Kennertium (۱/۲۵ cm)
۵/۹۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۱/۵ cm)+Kennertium (۱/۲ cm)
۶/۵۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۰/۵ cm)+Kennertium (۱/۱۵ cm)
۷/۱۷	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۹/۵ cm)+Kennertium (۱/۱ cm)
۷/۹۳	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۸/۵ cm)+Kennertium (۱/۰۵ cm)
۸/۸۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۷/۵ cm)+Kennertium (۱/۰ cm)

جدول (۴): آهنگ دز معادل نوترون به دست آمده (برحسب $\mu\text{Sv/h}$) برای جاذب نوترون و گامای انتخاب شده در این مطالعه.

دز معادل نوترون	جاذب‌های نوترون و گاما با ضخامت‌های مختلف
۱/۰۱	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۷/۵ cm)+Kennertium (۱/۵ cm)
۱/۳۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۶/۵ cm)+Kennertium (۱/۴۵ cm)
۱/۶۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۵/۵ cm)+Kennertium (۱/۴ cm)
۲/۰۴	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۴/۵ cm)+Kennertium (۱/۳۵ cm)
۲/۶۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۳/۵ cm)+Kennertium (۱/۳ cm)
۳/۴۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۲/۵ cm)+Kennertium (۱/۲۵ cm)
۴/۳۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۱/۵ cm)+Kennertium (۱/۲ cm)
۵/۵۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۰/۵ cm)+Kennertium (۱/۱۵ cm)
۷/۲۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۹/۵ cm)+Kennertium (۱/۱ cm)
۹/۲۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۸/۵ cm)+Kennertium (۱/۰۵ cm)
۱۱/۸۷	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۷/۵ cm)+Kennertium (۱/۰ cm)

جدول (۵): آهنگ دز معادل کل به دست آمده (برحسب $\mu\text{Sv/h}$) برای جاذب نوترون و گامای انتخاب شده در این مطالعه.

دز معادل کل	جاذب‌های نوترون و گاما با ضخامت‌های مختلف
۴/۳۱	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۷/۵ cm)+Kennertium (۱/۵ cm)
۴/۹۳	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۶/۵ cm)+Kennertium(۱/۴۵ cm)
۵/۶۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۵/۵ cm)+Kennertium (۱/۴ cm)
۶/۴۴	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۴/۵ cm)+Kennertium (۱/۳۵ cm)
۷/۴۵	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۳/۵ cm)+Kennertium (۱/۳ cm)
۸/۷۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۲/۵ cm)+Kennertium (۱/۲۵ cm)
۱۰/۲۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۱/۵ cm)+Kennertium (۱/۲ cm)
۱۲/۰۰	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۲۰/۵ cm)+Kennertium (۱/۱۵ cm)
۱۴/۳۷	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۹/۵ cm)+Kennertium (۱/۱ cm)
۱۷/۱۳	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۸/۵ cm)+Kennertium (۱/۰۵ cm)
۲۰/۶۷	$\text{Mg}(\text{BH})_2$ (۱۷/۵ cm)+Kennertium (۱/۰ cm)

باتوجه به داده‌های مندرج در جدول‌های ۳ تا ۵، می‌توان گفت که با افزایش ضخامت جاذب‌های نوترون و گاما می‌توان به ترتیب دز معادل گاما، نوترون و کل حاصل از یک چشمه نوعی Cf-252 را کاهش داد. اما نکته قابل توجه این است که برای بهینه‌سازی یک حفاظ باید به ضخامت و امکانات موجود (مانند ابعاد فضای اتاق) نیز توجه کرد. بنابراین، تعیین ضخامت نهایی یک حفاظ نیازمند ملاحظات میدانی و همچنین اقتصادی خواهد بود. ضخامت اولیه حفاظ، همان‌طور که در ردیف اول جدول‌های ۳ تا ۵ مشخص شده است، با ضخامت $27/5 \text{ cm}$ از $\text{Mg}(\text{BH})_2$ و ضخامت $1/5 \text{ cm}$ از کنرتیوم تعریف شده است. از آنجایی که میزان دز کل حاصل شده تفاوت بسیار زیادی به مقدار مرجع دارد، می‌توان ضخامت‌ها را تغییر داد تا از لحاظ اقتصادی و فضا سازی نیز مقرون به صرفه باشد. بنابراین، ضخامت‌های هر دو ماده را به صورت نزولی کاهش دادیم تا به یک مقدار قابل قبول دز رسیده و هم‌زمان از مقدار مرجع تجاوز

۴. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک حفاظ نوترون و گامای از پیش طراحی شده برای چشمه ۲۵۲-Cf با کمک شبیه‌سازی مونت کارلو با کد MCNP مورد توسعه قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، دو ماده جدید به عنوان جاذب‌های نوترون و گاما پیشنهاد شده است. توصیه می‌شود که از $Mg(BH_4)_2$ به جای کند کننده و همچنین جاذب نوترون و از کنتریوم به عنوان جاذب گاما استفاده شود. این عمل جایگزینی، منجر به یک کاهش محسوسی در آهنگ دز کل در فاصله ۱ m از چشمه ۲۵۲-Cf و منجر به کاهش قابل توجه ضخامت حفاظ خواهد شد. با توجه به حیاتی بودن چشمه ۲۵۲-Cf و تحریم بودن آن، پیش‌بینی و بررسی مسائل حفاظتی برای زمانی که این چشمه در دسترس قرار گرفت، حائز اهمیت است. بنابراین، نتایج این تحقیق تأثیر گسترده‌ای در صنعت هسته‌ای در زمینه حفاظ‌سازی نوترون‌ها خواهد داشت.

نکنیم؛ بنابراین، با یک ضخامت ۱۷/۵ cm از جنس $Mg(BH_4)_2$ و یک ضخامت ۱ cm از کنتریوم می‌توان آهنگ دز کل قابل قبولی را در فاصله ۱ m روی محور عرضی به دست آورد. به این ترتیب، ضخامت حفاظ تا ۳۹٪ کاهش پیدا می‌کند و آهنگ دز نیز حدود ۵/۵ درصدی کاهش خواهد یافت. از طرفی، کاهش ضخامت منجر به کاهش حجم و وزن حفاظ نیز می‌شود، زیرا چگالی ماده $Mg(BH_4)_2$ از مرتبه چگالی مواد به کار رفته در مرجع [۶] است. در پایان، لازم به ذکر است که محدودیت اصلی این مطالعه عدم صحت‌سنجی نتایج نهایی با کار آزمایشگاهی است که متأسفانه به دلیل عدم دسترسی به چشمه ۲۵۲-Cf و مواد ترکیبی مورد مطالعه، قابل انجام نبود. در ادامه این مطالعه، توسعه و بررسی مواد پیشرفته دیگری به عنوان یک حفاظ بهینه در یک میدان آمیخته نوترون و گاما با هدف کاهش هرچه بیشتر ضخامت و در عین حال حفظ قابلیت بالای حفاظتی پیشنهاد می‌شود.

۵. مراجع

1. R. C. Martin, J. B. Knauer, P. A. Balo. Production, distribution and applications of californium-252 neutron sources. *Appl. Radiat. Isot.* 53 (4-5) (2000) 785-92.
2. A. Miller. *Californium-252 as a Neutron Source for BNCT*. In: Neutron Capture Therapy: Principles and Applications. 69-74. Springer Berlin, Heidelberg, 2012.
3. G. J. Neary, R. J. Munson, R. H. Mole. *Chronic Radiation Hazards: An Experimental Study with Fast Neutrons*. Pergamon Press, London 1957.
4. S. T. Abdulrahman, Z. Ahmad, S. Thomas, A. A. Rahman. *Introduction to neutron-shielding materials. In Micro and Nanostructured Composite Materials for Neutron Shielding Applications*. 1-23. Woodhead Publishing, 2020.
5. H. R. Vega-Carrillo, E. Manzanares-Acuña, V. M. Hernández-Dávila, E. Gallego, A. Lorente, I. Donaire. Water-extended polyester neutron shields for a ^{252}Cf neutron source. *Radiation Protection Dosimetry*. 126(1-4) (2007) 269-273.
6. M. Nasrabadi, E. Ebrahimibasabi, H. Tavakoli-Anbaran. Compact shielding and irradiator design of a ^{252}Cf neutron source. *Appl. Radiat. Isot.* 143 (2019) 29-34.
7. I. Moradi Gharatloo, Y. Kasesaz, and M.S. Hosseini panah. Investigation of metal hydrides applicability as neutron moderator and shielding by MCNPX. *J. Radiat. Safety Measurement*. 9 (4) (2020) 179-184.
8. J. G. Fantidis. The comparison between simple and advanced shielding materials for the shield of portable neutron sources. *Int. J. Radiat. Res.* (2015). 13 (4) (2015) 287-295.
9. F. Zhang, H. Wu, X. Wang, G. Wu, W. Jia, Y. Ti. Compact shielding design of a portable ^{241}Am -Be source. *Appl. Radiat. Isot.* 128 (2017) 49-54.
10. N. H. Moadab, M. K. Saadi. Optimization of an Am-Be neutron source shield design by advanced

- materials using MCNP code. *Radiat. Phys. Chem.* 158 (1) (2019)109-114.
11. N. A. A. Elsheikh. Gamma-ray and neutron shielding features for some fast neutron moderators of interest in ^{252}Cf -based boron neutron capture therapy. *Appl. Radiat. Isot.* 156 (2020)109012.
 12. P. Basu, R. Sarangapani, B. Venkatraman. Compact shielding design for 740 GBq ^{241}Am -Be neutron source transport container. *Radiat. Phys. Chem.* 170 (2020) 108670.
 13. C. J. Guembou Shouop, S. I. Bak, M. Ndontchueng Moyo, E. J. Ngualem Mekongtso, D. Strivay. New Cf-252 neutron source shielding design based Monte Carlo simulation using material combination. *AIP Advances*. 10 (7) (2020) 075203.
 14. I. Akkurt, S. Al-Obaidi, H. Akyildirim, K. Gunoglu. Neutron shielding for ^{252}Cf source: FLUKA simulations and measurements. *Iranian J. Sci. Tech. Tran. A: Sci.* 46(3) (2022)1055-1064.
 15. K. Mokhtari, M. K. Saadi, H. A., Panahi, G. Jahanfarnia. The shielding properties of the ordinary concrete reinforced with innovative nano polymer particles containing $\text{PbO-H}_3\text{BO}_3$ for dual protection against gamma and neutron radiations. *Radiat. Phys. Chem.* 189 (2021) 109711.
 16. T. Cui, F. Wang, L. Bing, R. Wang, Z. Ma, Jia, Q. Monte Carlo simulation and optimization of neutron ray shielding performance of related materials. *Nucl. Eng. Tech.* 56 (9) (2024) 3545-3552.
 17. L. S. Waters, G. W. McKinney, J. W. Durkee, M. L. Fensin, J. S. Hendricks, M. R. James, R. C. Johns, D. B. Pelowitz. The MCNPX Monte Carlo radiation transport code. In: *AIP conference Proceedings 2007 Mar 19* (Vol. 896, No. 1, pp. 81-90). American Institute of Physics.
 18. ANSI/ANS-6.1.1-1991, Neutron and gamma-ray fluence-to-dose factors. An American National Standard published by the American Nuclear Society (Approved August 26,1991).
 19. M. N. Nasrabadi, G. Baghban. Neutron shielding design for ^{241}Am -Be neutron source considering different sites to achieve maximum thermal and fast neutron flux using MCNPX code. *Annal. Nucl. Energy.* 59 (1) (2013) 47-52.
 20. T. Hayashi, K. Tobita, S. Nishio, K. Ikeda, Y. Nakamori, S. Orimo. Neutronics assessment of advanced shield materials using metal hydride and borohydride for fusion reactors. *Fusion Eng. Des.* 81 (8-14) (2006) 1285-1290.
 21. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annual report ICRP 21 (1-3).
 22. I. Moradi Gharatloo, Y. Kasesaz, M. S. Hosseini panah. Investigation of metal hydrides applicability as neutron moderator and shielding by MCNPX. *J. Radiat. Safety Measurement.* 9 (4) (2020) 179-184.
 23. N. Soppera, M. Bossant, E. Dupont. JANIS 4: an improved version of the NEA java-based nuclear data information system. *Nucl. Data Sheets* 120 (2014) 294-296.
 24. D. J. Hughes, *Neutron Cross Sections.* Vol. 2. Pergamon, New York, 1957.