





دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

طراحی حفاظ مناسب برای چشمه‌ی ^{252}Cf به منظور ساخت و مقایسه دز و شار حاصل از آن
با چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$

نگارنده: مریم نصرآبادی

اساتید راهنما

دکتر حسین توکلی عنبران

دکتر احسان ابراهیمی بسابی

بهمن ۱۳۹۶

شماره:
تاریخ:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای مریم نصرآبادی با شماره دانشجویی ۹۴۱۸۰۶۴ رشته فیزیک گرایش هسته‌ای تحت عنوان طراحی حفاظ مناسب برای چشمه‌ی ^{252}Cf به منظور ساخت و مقایسه دز و شار حاصل از آن با چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه:): مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر حسین توکلی عنبران	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر احسان ابراهیمی بسایی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر سید علی حسینی منصور	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر حسن حسن‌آبادی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر مسلم سوهانی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی مؤمنی



تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصرد: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۳ ماه برگزار شود).

تقدیم به خانواده‌ی عزیزم

شکر پروردگار عالمیان که میل به دانستن و تلاش برای رسیدن به هدف رادو وجودمان پروراند و توانایی برای رسیدن به مقصود را به ما عطا فرمود. حال که پس از چندین سال تحصیل قطره‌ای از دریای بیکران علم رادو وجودم احساس می‌کنم، تکلیف خود می‌دانم از زحمات مادر آسانم، پدر بزرگوارم، برادر عزیزم و خواهران مهربانم که همواره، همراه و پشتیبانم بوده‌اند و با مهربانی و بهدلی‌شان، صبوری و عشق‌شان شرایط آرامش را برایم فراهم نمودند. تا با کمترین دغدغه، تمام تلاشم را در جهت کسب علم، به‌فمنند و مستمر قرار دهم، قدردانی‌کنم و از خداوند سلامتی و موفقیت‌شان را طلب می‌کنم.

شکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می دانم از اساتید راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر توکلی غنبران و دکتر ابراهیمی کرامی، برای راهنمایی های مشفقانه و تذکرات به فرزند و بجا قدردانی نمایم. برای ایشان آرزوی سلامتی، موفقیت و سربلندی در تمام زمینه های مادی و معنوی را دارم.

همچنین، از تمامی اساتید بزرگوارم که در طول این دوره من را در راه کسب علم و دانش و معرفت یاری نموده اند تقدیر و تشکر می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب مریم نصرآبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه طراحی حفاظ مناسب برای چشمه‌ی ^{252}Cf به منظور ساخت و مقایسه دز و شار حاصل از آن با چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ تحت راهنمایی دکتر حسین توکلی عنبران و دکتر احسان براهیمی بسابی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

چشمه‌های نوترونی، برای برخی کاربردهای پزشکی، صنعتی، کشاورزی و ... مناسب می‌باشند. به همین دلیل، طراحی حفاظ‌های مناسب برای این چشمه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. در این پایان نامه حفاظی بهینه با هدف دستیابی به وزن و حجم کمتر، از طریق لایه‌لایه کردن حفاظ برای رسیدن به حد مجاز تابش در محیط بیرون طراحی و شبیه‌سازی شد. به طور خاص هدف از این تحقیق، طراحی و شبیه‌سازی حفاظ مناسب برای چشمه نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ و مقایسه شار و دز حاصل از آن با چشمه‌ی نوترونی آمرسیوم-بریلیوم ۲۴۱، با استفاده از کد MCNPX، می‌باشد. طرح مورد نظر شامل چند لایه حفاظ استوانه‌ای هم‌مرکز با چشمه نوترونی است. پارافین و پارافین حاوی ۱۰٪ گرافیت به عنوان کندکننده، بریلیوم به عنوان بازتابنده و بورات پلی‌اتیلن و تنگستات سرب به ترتیب به عنوان جاذب نوترون حرارتی و جاذب گاما انتخاب شدند. نتایج حاکی از کاهش ۸۹٪ حجم و ۵۸٪ وزن نسبت به حفاظ‌های قدیمی است. همچنین شار نوترونی چشمه بر حسب انرژی نوترون در حضور و عدم حضور حفاظ بررسی و نتایج مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفت. در این پایان‌نامه، علاوه بر طراحی حفاظ برای چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ به طراحی کانال‌هایی تابشی برای استفاده در NAA، PGNA و ... پرداخته شد.

کلمات کلیدی: چشمه‌ی نوترونی، کالیفرنیم-۲۵۲، آمرسیوم-بریلیوم ۲۴۱، حفاظ‌گذاری، شار، دز معادل، کند کننده، بازتابنده، جاذب، پارافین، بورات پلی‌اتیلن، بریلیوم، تنگستات سرب، پارافین حاوی گرافیت، کانال تابشی، کد MCNPX.

مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- بررسی اثر ابعاد چشمه آمر سوم - بریلوم بر روی شار و دذخروجی، کنفرانس فنریک ریاضی ایران.

۲- طراحی حفاظ چند لایه ای برای چشمه ی نوترونی کالینفریم - ۲۵۲، کنفرانس هسته ای ایران.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: تابش و برهم کنش.....
۱-۱	مقدمه.....
۲-۱	تاریخچه.....
۳-۱	تابش ها.....
۴-۱	برهمکنش های نوترون با ماده.....
۱-۴-۱	پراکندگی.....
۱-۲-۴-۱	شکافت.....
۵-۱	برهم کنش پرتوهای گاما با ماده.....
۶-۱	انواع چشمه های نوترونی.....
۱-۶-۱	راکتورهای هسته ای شکافت.....
۲-۶-۱	شتابدهنده ی ذرات.....
۳-۶-۱	رادیوایزوتوپ ها.....
۱-۳-۶-۱	چشمه نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲.....
۱-۳-۶-۱	توزیع زاویه ای و سرعت نوترون های سریع.....
۲-۱-۳-۶-۱	شناخت طیف نوترون شکافت خود به خودی.....
۲-۳-۶-۱	چشمه نوترونی آمرسیوم- برلیوم.....
۱-۲-۳-۶-۱	الزامات امنیتی برای تولید چشمه ی آمرسیم.....
۲-۲-۳-۶-۱	طیف انرژی نوترون چشمه آمرسیم- برلیوم.....
۳-۲-۳-۶-۱	برهمکنش های ثانویه.....
۷-۱	کاربردهای چشمه ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ و آمرسیوم- برلیوم.....
۲۳	فصل دوم: اصول حفاظ گذاری.....
۱-۲	مقدمه.....
۲-۲	طبقه بندی نوترون.....
۳-۲	سطح مقطع نوترون.....
۴-۲	پویش آزاد متوسط.....
۵-۲	فرآیند کند کردن نوترون ها.....
۱-۵-۲	متوسط کاهش انرژی.....

۲۹	۶-۲ کمیت‌های مورد استفاده در حفاظت پرتوها.....
۲۹	۱-۶-۲ دز جذبی
۳۰	۲-۶-۲ دز معادل
۳۰	۳-۶-۲ دز معادل مؤثر
۳۱	۷-۲ انتخاب مواد مناسب
۳۲	۱-۷-۲ کند کننده
۳۲	۲-۷-۲ بازتابنده
۳۲	۳-۷-۲ جذب کننده
۳۳	۸-۲ مروری بر کارهای انجام شده.....
۳۷	فصل سوم: محاسبه‌ی شار و دز چشمه‌ی نوترونی
۳۸	۱-۳ مقدمه
۳۸	۲-۳ تاریخچه و کد MCNP.....
۳۸	۳-۳ ساختار فایل ورودی
۳۹	۴-۳ کارت‌های مورد نیاز کد
۳۹	۱-۴-۳ کارت چشمه SDEF.....
۳۹	۲-۴-۳ کارت مواد
۳۹	۳-۴-۳ کارت تالی (خروجی برنامه MCNP).....
۴۰	۵-۳ شبیه‌سازی چشمه و پیکربندی حفاظ
۴۰	۱-۵-۳ انتخاب لایه‌ی اول
۴۱	۲-۵-۳ انتخاب بازتابنده‌ی مناسب
۴۳	۳-۵-۳ بررسی اثر افزودن بازتابنده به لایه‌ی اول کند کننده
۴۶	۴-۵-۳ انتخاب لایه‌ی دوم
۴۹	۵-۵-۳ انتخاب لایه‌ی سوم
۵۳	۶-۳ بررسی اثر ابعاد چشمه آمرسیوم- برلیوم بر روی شار و دز خروجی
۵۵	۷-۳ بررسی اثر تغییرات شعاع حفاظ بر روی نوع چشمه
۵۶	۸-۳ مقایسه دز حاصل از چشمه‌ی کالیفرنیم و آمرسیوم- برلیوم.....
۵۹	۹-۳ مقایسه شار نوترونی حاصل از چشمه‌ی کالیفرنیم و آمرسیوم- برلیوم
۶۲	۱۰-۳ بررسی توزیع شار نوترون چشمه‌ی کالیفرنیم-۲۵۲ در کانال حرارتی

۶۴	۱۱-۳ بررسی کانال شبیه‌سازی شده برای استفاده نوترون سریع چشمه
۶۷	فصل چهارم: بحث و نتیجه‌گیری
۶۸	۱-۴ مقدمه
۶۸	۲-۴ بحث و نتیجه‌گیری
۶۹	۳-۴ پیشنهادات
۷۰	پیوست ۱
۷۶	پیوست ۲
۸۲	پیوست ۳
۸۸	منابع و مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. توزیع زاویه‌ای چشمه کالیفرنیم-۲۵۲ در دستگاه آزمایشگاه و در دستگاه مرکز جرم ۱۲
- شکل ۱-۳. نمودار طیف نوترون چشمه شکافت خود به خودی کالیفرنیم-۲۵۲ ۱۳
- شکل ۱-۴. نمایی از چشمه آمرسیوم-بریلیوم ۱۴
- شکل ۱-۶. طیف گامای چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ ۱۶
- شکل ۱-۹. سهم ناشی از هر کدام از برهمکنش‌های ثانویه در طیف نوترون چشمه‌ی ^{13}Ci ۱۹
- شکل ۲-۱. پراکندگی الاستیک نوترون به وسیله هسته ۲۸
- شکل ۲-۲. پیکربندی تابش گر در وضعیت : a. تابش‌دهی نوترون سریع و b. تابش‌دهی نوترون حرارتی ۳۴
- شکل ۲-۳. پیکربندی حفاظ در راستای صفحه‌ی Y-Z ۳۵
- شکل ۳-۱. نمودار شار نوترون حرارتی برای مواد مختلف لایه‌ی اول حفاظ چشمه‌ی کالیفرنیم-۲۵۲ ۴۱
- شکل ۳-۲. ساختار هندسی لایه‌ی اول و بازتابنده ۴۲
- شکل ۳-۳. نمودار مقایسه شار حرارتی برای مواد مختلف بازتابنده ۴۲
- شکل ۳-۴. نمودار شار حرارتی برای دو ساختار هندسی با استفاده از بازتابنده و بدون استفاده از بازتابنده در لایه‌ی اول حفاظ چشمه‌ی نوترونی ۴۳
- شکل ۳-۵. نمودار نسبت شار حرارتی به فوق حرارتی برای دو ساختار با استفاده از بازتابنده و بدون استفاده از بازتابنده ۴۴
- شکل ۳-۶. نمودار نسبت شار نوترون حرارتی به نوترون سریع با استفاده از بازتابنده و بدون استفاده از بازتابنده ۴۵
- شکل ۳-۷. نمودار نسبت شار فوق حرارتی به شار سریع برای دو ساختار با استفاده از بازتابنده و بدون بازتابنده ۴۵
- شکل ۳-۸. نمودار اختلاف شار حرارتی و فوق حرارتی تقسیم برفوق حرارتی بر حسب در صد ۴۶
- شکل ۳-۹. نمودار شار نوترون حرارتی بر حسب ضخامت کند کننده‌ی لایه‌ی دوم ۴۷
- شکل ۳-۱۰. نمودار شار نوترون‌های فوق حرارتی بر حسب ضخامت کند کننده‌ی لایه‌ی دوم ۴۷
- شکل ۳-۱۱. نمودار شار نوترون‌های سریع بر حسب ضخامت کند کننده‌ی لایه‌ی دوم ۴۸
- شکل ۳-۱۳. نمودار تعیین ضخامت بهینه برای لایه‌ی دوم کند کننده حفاظ با توجه به نسبت شار نوترون حرارتی به شار نوترون سریع ۴۹
- شکل ۳-۱۵. نمودار دز گامای حاصل از چشمه بر حسب ضخامت حفاظ ۵۱
- شکل ۳-۱۷. نمودار دز برای چیدمان‌های متفاوت تنگستات سرب و پلی اتیلن حاوی کاربید بور ۵۲
- شکل ۳-۲۱. تغییرات نسبی شار نوترون بر حسب شعاع حفاظ کروی ۵۵
- شکل ۳-۲۲. تغییرات دز نوترون و گامای چشمه بر حسب تغییرات شعاع حفاظ کروی ۵۶
- شکل ۳-۲۳. نمودار دز نوترون و گامای ثانویه چشمه کالیفرنیم-۲۵۲ ۵۷
- شکل ۳-۲۴. نمودار دز گامای مستقیم ناشی از چشمه کالیفرنیم-۲۵۲ ۵۸

- شکل ۳-۲۵. نمودار دز نوترونی و گامایی برای چشمه آمرسیوم- بریلیوم ۲۴۱..... ۵۸
- شکل ۳-۲۶. نمودار دز گاما برای چشمه‌ی آمرسیوم- بریلیوم ۲۴۱..... ۵۹
- شکل ۳-۲۷. نمودار شار نوترونی بر حسب انرژی برای چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ بدون حفاظ..... ۶۰
- شکل ۳-۲۸. نمودار شار نوترون بر حسب انرژی برای چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ با حفاظ طراحی شده..... ۶۰
- شکل ۳-۲۹. نمودار شار نوترون بر حسب انرژی برای چشمه‌ی نوترونی آمرسیوم- بریلیوم ۲۴۱ بدون حفاظ..... ۶۱
- شکل ۳-۳۱. نمودار تعیین کننده‌ی کانال تابشی نوترون حرارتی..... ۶۲
- شکل ۳-۳۵. نمودار توزیع شار نوترونی در بخش‌های مختلفی از حجم کانال..... ۶۵

فهرست جداول

جدول ۱-۱. انواع برهمکنش نوترون با ماده	۴
جدول ۱-۲. ویژگی چشمه‌های نوترونی $\text{Be}(\alpha, n)$	۹
جدول ۱-۴. ویژگی‌های هسته‌ای چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf	۱۳
جدول ۱-۵. انرژی نوترون محاسبه شده برای واکنش $^{12}\text{C} \text{Be}(\alpha, n)$	۲۰
جدول ۲-۱. محدوده‌ی انرژی نوترون ها.....	۲۴
جدول ۲-۲. ضرایب وزنی و احتمال خطر برای اثرات تصادفی در بافت	۳۱
جدول ۳-۳. مقایسه دز چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ و آمرسیوم-بریلیوم ۲۴۱.....	۵۶

فصل اول

تابش و برعکسش

۱-۱ مقدمه

به مطالعه‌ی چگونگی تولید تابش‌ها، انتقال آن‌ها از چشمه، برهمکنش آنها با مواد و چگونگی اثرات این تغییرات بر روی محیط، حفاظ‌گذاری گفته می‌شود. در حفاظ‌گذاری نوع و انرژی تابشی و برهمکنش‌های پرتو ساطع شده با موادی که به عنوان حفاظ مورد استفاده قرار می‌گیرد، مهم است. از این‌رو، از دیدگاه حفاظ‌گذاری، تابش‌های گاما و نوترون و ذرات باردار به دلیل تفاوت آن‌ها در میزان نفوذ در مواد مختلف از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند. ذرات باردار به دلیل برهمکنش‌های کولنی با الکترون‌ها و هسته‌ها، برهمکنش هسته‌ای و تابش ترمزی دارای برد کمی هستند و به راحتی حفاظ‌گذاری می‌شوند (خاطر نشان می‌شود در مورد ذرات باردار سبک، با توجه به مشخصات چشمه، تابش ترمزی اهمیت پیدا می‌کند). در بحث حفاظ‌سازی، تابش‌های نوترون و گاما به دلیل بدون بار بودن و نداشتن هیچ برهمکنشی با میدان الکترون‌ها یا هسته‌ها، ضخامت‌های نسبتاً زیادی از مواد را پشت سر گذاشته و عدم وجود حفاظ باعث بالا رفتن آهنگ دز در محیط بیرون می‌شود. به منظور طراحی حفاظ، بهترین مواد برای کند کردن نوترون‌ها مواد با عدد اتمی پایین و برای پرتوهای گاما مواد با عدد اتمی بالا است [۲،۱]. در این فصل ضمن بررسی انواع تابش‌ها، مهمترین پارامترهای نوترونی به طور اجمالی معرفی می‌شوند. در نهایت انواع چشمه‌های نوترونی، به طور خاص، چشمه‌های $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf تشریح می‌شوند.

۱-۲ تاریخچه

در کنار فهم ویژگی‌های مختلف انواع تابش و مزایای کاربرد آن‌ها، پی بردن به مضرات ناشی از در معرض تابش قرار گرفتن نیز از اهمیت برخوردار است. از این‌رو، نیاز به حفاظت، بررسی و طراحی حفاظ‌گذاری تابش به وجود آمد. در سال ۱۸۹۵، رونتگن اشعه‌ی ایکس را کشف کرد و چند ماه بعد ماری کوری این پدیده‌ی جدید را رادیواکتیویته^۱ نامید. اوایل قرن بیستم، پرتو گاما و ویژگی‌های ذرات آلفا و بتا شناخته شد. در همین حین به خطرات ناشی از تابش‌های یونیزان پی‌برده شد و از مواد

۱. Radioactivity

سنگین همچون سرب به شکل ورقه و بلوکه به منظور حفاظ‌گذاری در مقابل اشعه‌ی X و پرتوهای گاما استفاده کردند. کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ توسط جیمز چادویک باعث بروز رخدادهایی شد که ما را به سمت راکتورهای هسته‌ای و انفجار هسته‌ای کشاند که هر دو ناشی از شار نوترونی بودند. توسعه‌ی راکتورهای نیروی هسته‌ای، ایده‌های جدیدی را برای حفاظ‌گذاری به وجود آورد. در دهه‌ی ۱۹۵۰ هدف حفاظ‌گذاری نوترون تجربی‌تر شد [۲].

۳-۱ تابش‌ها

مطالعه‌ی اثر تابش بر انسان، فیزیک بهداشت نام دارد. فیزیک بهداشت غالباً به عنوان بهداشت پرتوشناختی آن، بخشی از مهندسی بهداشت محیط است که با حفاظت افراد و گروه‌هایی از مردم در برابر اثرات زیان‌بار تابش‌های یوننده سروکار دارد. جنبه‌های علمی و فنی فیزیک بهداشت عمدتاً به موارد زیر مربوط می‌شوند:

- ۱- اندازه‌گیری‌های فیزیکی انواع گوناگون تابش‌ها و مواد پرتوزا.
 - ۲- تعیین ارتباطات کمی میان پرتوگیری و آسیب شناختی.
 - ۳- حمل و نقل مواد پرتوزا در محیط.
 - ۴- طراحی دستگاه‌ها، فرآیندها و محیط‌ها به نحوی که از لحاظ پرتوشناختی ایمن باشند.
- در سال‌های اخیر به علت استفاده‌ی فزآینده از توان هسته‌ای به عنوان منبع انرژی و استفاده‌ی گسترده از ایزوتوپ‌های پرتوزا در علوم، پزشکی و صنعت، حفاظت در برابر اشعه اهمیت یافته است. تابش‌هایی که ما در زندگی روزمره در معرض آن قرار می‌گیریم، هم از منابع طبیعی و هم به طور مصنوعی ایجاد می‌شوند که برای حفاظت، باید آن‌ها را شناخت. منابع تابش مصنوعی به قرار زیراند:
- ۱- تابش گاما ۲- تابش نوترون ۳- تابش آلفا ۴- تابش بتا.

همچنین تابش طبیعی زمینه، که سه مؤلفه دارد به قرار زیر است:

- (۱) تابش‌های کیهانی، جریانی از ذرات باردار (ذرات پروتون و آلفا) که در فضا تولید می‌شوند به جو زمین برخورد کرده و در اندرکنش با آن تابش گاما تولید می‌کنند. این تابش گاما به سطح زمین می‌رسد، و در نقاط مرتفع (که جو رقیق‌تر است) شدیدتر از نقاط کم ارتفاع است.
- (۲) ایزوتوپ‌های پرتوزای طبیعی موجود در پوسته‌ی زمین، مثل ^{238}U و ^{232}Th و محصولات واپاشی آن‌ها، مهم‌ترین محصول واپاشی، رادون است که گازی بی اثر و سنگین می‌باشد و از واپاشی ^{238}U و ^{232}Th حاصل می‌شود.
- (۳) ایزوتوپ‌های پرتوزای طبیعی، اساساً ^{40}K و ^{14}C موجود در بدن انسان می‌باشند [۳،۴].

۴-۱ برهمکنش‌های نوترون با ماده

فرآیند برهمکنش نوترون با ماده به طور اساسی با فوتون‌ها متفاوت است. در حالی که فوتون‌ها اغلب با الکترون‌های اتمی برهمکنش می‌کنند، نوترون‌ها تنها از طریق نیروهای هسته‌ای با هسته‌های اتمی (atomic nucleus) برهمکنش دارند. به‌طوریکه وقتی نوترون به یک هسته نزدیک می‌شود، به دلیل بدون بار بودنش، سد کولنی را مشاهده نمی‌کند. احتمال وجود برهمکنش‌های نوترون با هسته زیاد است که تنها بعضی از آن‌ها در محاسبات حفاظت اشعه نگران کننده است. برهمکنش‌های انرژی‌های بسیار بالا می‌تواند ذرات ثانویه‌ی زیادی تولید کند. همچنین برای نوترون‌ها با انرژی پایین، احتمال برهمکنش‌های پیچیده‌ی زیادی وجود دارد. پراکندگی همدوس ناشی از مولکول‌ها، پراکندگی براگ ناشی از صفحه کریستال و ... که هیچ یک از این‌ها در کاربرد حفاظ‌گذاری نوترون و دزیمتری مهم نیستند. جدول ۱-۱ نمایی از برهمکنش‌های نوترون را برای انرژی‌های مختلف نوترون نشان می‌دهد:

جدول ۱-۱. انواع برهمکنش نوترون با ماده [۲]

High energy interaction (1eV < E < 20MeV)		
پراکندگی الاستیک	پراکندگی ناالاستیک	جذب رزونانس
Low energy interaction		
جذب حرارتی	واکنش (n,γ)	شکافت

بنابراین، می‌توان برهمکنش نوترون با ماده را به دو بخش عمده تقسیم کرد [۵]:

۱-۴-۱ پراکندگی

نوترون با یک هسته برهمکنش می‌کند، اما هر دو ذره پس از واکنش دوباره ظاهر می‌شوند که به صورت زیر است:



پراکندگی ممکن است الاستیک یا غیرالاستیک باشد. در پراکندگی الاستیک انرژی جنبشی کل پایسته باقی می‌ماند در حالی که در پراکندگی غیر الاستیک بخشی از انرژی جنبشی به صورت انرژی برانگیختگی به هسته داده می‌شود. پس از برخورد، هسته‌ی برانگیخته با گسیل یک یا تعداد بیش‌تری پرتو گاما وا می‌باشد.

۱-۴-۲ جذب

در واکنش به صورت جذب، نوترون ناپدید می‌شود اما پس از واکنش یک یا تعداد بیش‌تری ذره‌ی دیگر ظاهر می‌شود. از واکنش‌های جذب می‌توان به واکنش (n,p) ، (n,α) ، $(n,2n)$ ، (n,γ) ، شکافت و... نام برد.

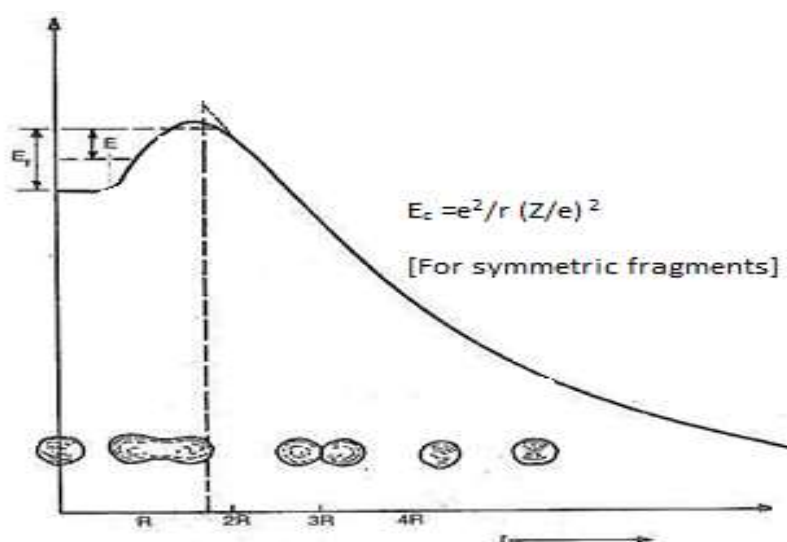
۱-۴-۲-۱ شکافت

شکافت در سال ۱۹۳۹ از واکنش $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$ توسط او. هان^۲ - اف. استراسمن^۳ کشف گردید. این فرآیند را می‌توانیم بر اساس مدل قطره مایعی توجیه کنیم به گونه‌ای که به محض اینکه نیروی دافعه کولنی به نیروی کشش سطحی (در اینجا نیروی هسته‌ای) غلبه کند باعث ایجاد تغییر شکل در هسته می‌شود تا جایی که به صورت دو پاره‌ی دمبلی شکل درآید که توسط یک باریکه به همدیگر متصل هستند. مرحله‌ی آخر که مرحله‌ی گسیختگی است و دو پاره‌ی جدا آزاد می‌شود. بسیاری از هسته‌های

۲. O. Hahn.

۳. F. Strassman.

سنگین مثل ایزوتوپ ^{252}Cf تحت شکافت خود به خودی هستند. شکافت معمولا توسط بمباران هسته با نوترون، گاما و یا ذرات باردار رخ داده و به طور کلی می‌تواند متقارن یا پادمتقارن باشد. آکتئیدها شکافت نامتقارن دارند که به دو پاره‌ی شکافت سبک و سنگین منجر می‌گردد. نوترون‌های سریع توسط پاره‌های شکافت در مدت زمان 10^{-18} - 10^{-14} ثانیه آزاد می‌شوند. گاما‌های سریع بعد از آزاد شدن نوترون در مدت زمان 10^{-14} s تا 1 ms نشر می‌شوند. با این حال پاره‌های شکافت ناپایدار هستند و تنها محصولات پایدار شکافت ناشی از واپاشی بتایی هستند. شکل ۱-۱ تغییرات شکل هسته را بر حسب تغییرات انرژی نشان داده است.



شکل ۱-۱. انرژی پتانسیل پاره‌های شکافت در مقابل شکافت خود به خودی. مراحل مختلف دگرگونی شکافت در منحنی انرژی شعاعی [۶].

نوترون‌های نشر شده از پاره‌های سبک و سنگین را می‌توان از جهت حرکت پاره‌های سبک و سنگینی که جدا می‌شوند، تشخیص داد. بررسی تئوری و آزمایشگاهی طیف انرژی نوترون شکافت تاریخچه‌ای طولانی دارد و هنوز هم در جریان است. یک تقریب خوب این است که فرض کنیم در انرژی‌های پایین شکافت عمده‌ی نوترون‌ها که از پاره‌ها آزاد می‌شوند، تمام سرعتشان را دارند. پاره‌ها در مدت زمان 5×10^{-21} s به ۹۰٪ سرعت نهایی‌شان می‌رسند در حالی که نوترون‌ها در زمان بیش‌تر

از 10^{-19} S آزاد می‌شوند. نقطه‌ی شروع برای تئوری طیف آزادسازی توسط وی. وایسکوف^۴ در سال ۱۹۳۷ نشأت گرفته است.

۱-۵ برهم‌کنش پرتوهای گاما با ماده

پرتوهای گاما ۱۲ نوع برهم‌کنش دارند که سه نوع برهم‌کنش غالب آن شامل: فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج هستند که برای فوتون‌های با انرژی بین 1.02 MeV تا 1.02 MeV در طراحی و بررسی حفاظ بسیار مهم می‌باشند که روند هر کدام به صورت زیر می‌باشند:

برهم‌کنش فوتون با الکترون اتمی مقید را فوتوالکتریک می‌گویند. در این برهم‌کنش فوتون از بین رفته و یک الکترون آزاد می‌شود که به آن فوتوالکتریک گفته می‌شود. نتیجه‌ی انتشار یک فوتوالکتریک معمولاً از لایه‌ی K اتم است. بنابراین انرژی جنبشی این فوتوالکتریک معادل اختلاف انرژی بین فوتون و انرژی بستگی الکترون است. در پراکندگی کامپتون، برخورد بین فوتون و یک الکترون آزاد است. پس از پراکندگی فوتون ناپدید نمی‌شود بلکه تنها راستای حرکت و انرژی آن تغییر می‌کند. موضوع مهم در اینجا انرژی بیشینه و کمینه فوتون و الکترون بعد از برخورد است. زمانی که زاویه پراکندگی 180° درجه باشد انرژی فوتون کمینه است. در فرآیند تولید زوج نیز، برهم‌کنش بین فوتون و هسته است که فوتون برخوردی به طور کامل جذب شده و یک زوج الکترون-پوزیترون تولید می‌شود. چشمه‌های پرتوزا شامل چشمه‌های ذرات باردار، گاما (ایکس) و چشمه‌های نوترونی می‌باشند که با توجه به اینکه این پایان نامه مربوط به حفاظسازی چشمه نوترونی می‌باشد، در ادامه مهمترین چشمه‌های نوترونی تشریح می‌شوند.

۱-۶ انواع چشمه‌های نوترونی

چشمه‌های نوترونی را می‌توان به چند گروه طبقه‌بندی کرد که شامل: راکتورهای هسته‌ای شکافت،

۴. V. Weisskopf

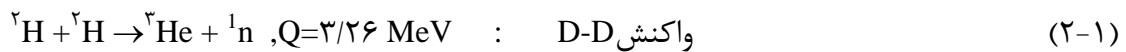
شتابدهنده‌ی ذرات، رادیوایزوتوپ‌ها، چشمه‌ی نوترونی اسپالیشن (SNS) و چشمه‌ی نوترونی (p,n) می‌باشند [۷]:

۱-۶-۱ راکتورهای هسته‌ای شکافت

راکتورهای هسته‌ای دستگاه‌هایی هستند که در آنها شکافت هسته‌ای کنترل شده رخ می‌دهد. راکتورها برای تولید انرژی الکتریکی و نیز تولید نوترون‌ها به کار می‌روند. اندازه و طرح راکتور بر حسب کار آن متغیر است. فرآیند شکافت که یک نوترون به وسیله یک هسته سنگین (با جرم زیاد) جذب شده و به دنبال آن به دو هسته کوچکتر همراه با آزادسازی انرژی و چند نوترون دیگر شکافته می‌شود.

۱-۶-۲ شتابدهنده‌ی ذرات

ژنراتورهای نوترون که بر مبنای واکنش D-D و T-D کار می‌کنند، را می‌توان به عنوان چشمه‌ی نوترونی در نظر گرفت که در واقع نوعی شتابدهنده کوچک هستند و واکنش‌هایی به صورت زیر دارند:



۱-۶-۳ رادیوایزوتوپ‌ها

دو نوع اصلی از چشمه‌های رادیوایزوتوپی را می‌توان اشاره کرد: چشمه‌ی رادیوایزوتوپی مستقیم و غیر مستقیم که در فرآیندهای واپاشی طبیعی‌اش نوترون نشر می‌کند. به طور گسترده ${}^{252}\text{Cf}$ به عنوان چشمه‌ی نوترونی رادیوایزوتوپی مستقیم استفاده می‌شود. چشمه‌ی رادیوایزوتوپی غیر مستقیم اشاره به چشمه‌هایی دارد که وابسته به ذرات باردار و هسته‌ی هدف پایدار است که رادیونوکلوئید نشر می‌کند و از طریق واکنش‌های هسته‌ای نوترون تولید می‌کند. ویژگی چند نمونه از این چشمه‌ها در جدول ۱-۲ و ۱-۳ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲. ویژگی چشمه‌های نوترونی $Be(\alpha, n)$ [۸].

Source	Half-Life	E_α (MeV)	Neutron Yield per 10^6 Primary Alpha Particles		Percent Yield With $E_n < 1.5$ MeV	
			Calculated	experimental	Calculated	Experimental
^{239}Pu -Be	24000y	5.14	65	57	11	9-33
^{210}Po -Be	138d	5.30	73	69	13	12
^{238}Pu -Be	87.4y	5.48	79 ^a	-----	-----	-----
^{241}Am -Be	433y	5.48	82	70	14	15-23
^{244}Cm -Be	18y	5.79	100	-----	18	29
^{242}Cm -Be	162d	6.10	118	106	22	26
^{226}Ra -Be +daughters	1602y	Multiple	502	-----	26	33-38
^{227}Ac -Be +daughters	21.6y	Multiple	702	-----	28	38

a. مقادیر اندرسون^۵ و هرتز^۶. تمام دیگر داده‌ها اعم از محاسبه و ذکر شده در گایگر^۷ و وان در ژوان^۸.

جدول ۱-۳. چشمه‌ی نوترونی شکافت خودبه خودی.

هسته‌ها	نیمه عمر	ذرات α در هر شکافت	نوترون‌های در هر شکافت	نوترون $mg^{-1}sec^{-1}$
^{236}Pu	۲/۸۵ سال	$1/3 \times 10^9$	۱/۹	۲۶
^{238}Pu	۸۹ /۴ سال	$5/5 \times 10^8$	۲/۰	۲/۲
^{240}Pu	۶۶۰۰ سال	$1/9 \times 10^7$	۱/۲	۱/۱
^{242}Pu	$3/79 \times 10^5$ سال	$1/9 \times 10^5$	۲/۳	۱/۷
^{242}Cm	۱۶۲/۵ روز	$1/6 \times 10^7$	۲/۳	$1/7 \times 10^4$
^{244}Cm	۱۸/۴ سال	$7/6 \times 10^5$	۲/۶	9×10^3
^{252}Cf	۲/۶ سال	-----	۳/۵	$2/7 \times 10^9$

۵. Anderson

۶. Hertz

۷. Geiger

۸. Van der Zwan

۱-۳-۶-۱ چشمه نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲

رادیوایزوتوپ کالیفرنیم دارای نیمه عمر ۲/۶۴۵ سال و دارای دو مد واپاشی است. احتمال واپاشی آلفا ۹۶/۹۱ درصد، در حالی که شکافت خود به خودی سهم ۳/۰۹ درصدی واپاشی را دارا است. از آنجایی که چشمه داخل یک پلت آلومینیوم فشرده محصور شده است هر گونه ذرات آلفا را از فرار کردن متوقف می کند. بنابراین تنها پرتوهای گاما و نوترون ها که از چشمه نشر خواهند شد در آزمایشات مورد استفاده قرار خواهد گرفت که در طی شکافت، نوترون ها و گاماها می شوند که تابش می شوند بیش تر سهم طیف گاما ناشی از محصولات شکافت می باشد [۹،۱۰].

یک نمونهی ۱ μg ایی از ^{252}Cf ، $1/92 \times 10^7$ ذره ی آلفا نشر می کند و در هر ثانیه تحت $6/14 \times 10^5$ شکافت خود به خودی است. هر شکافت منجر به دو پاره ی شکافت می شود که به دلیل بقای تکانه، این پاره ها در خلاف جهت نشر می شوند. لازم به ذکر است که پرتوهای گامای ناشی از چشمه ی نوترونی سهم ۶۸ درصدی از کل اکتیویته ی چشمه را دارا هستند. کالیفرنیم یک نشر کننده قوی نوترون است که معمولا به صورت چشمه کپسولی استوانه ای محصور شده است. نوترون های نشر شده از شکافت خود به خودی ^{252}Cf به عنوان یک منبع خالص که طیف شکافت خودبه خودی را به خوبی اندازه گیری می کند ارائه می شود. انرژی متوسط نوترون در کالیفرنیم تقریبا ۲/۴۲۱ MeV است [۸،۹].

شکل نوعی طیف شکافت که توزیعی مشابه با توزیع ماکسول-بولتزمن دارد را می توان توسط رابطه ی ۱-۴ که توزیع ماکسول-بولتزمن برای موکلول های گاز در هوا را نشان می دهد، تقریب زد [۴]:

$$\phi(E) = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} e^{-E/kTE^2} \quad (4-1)$$

توزیع طیف شکافت نوترون اغلب توسط توزیع وات بیان می شود، که با استفاده از تابع ریاضی وات به صورت تابع احتمال برای نوترون ها با انرژی بین E و E+dE به صورت رابطه ی ۱-۵ می باشد:

$$P(E) = 0.4865 \sinh(\sqrt{2E}) e^{-E} \text{MeV} \quad (5-1)$$

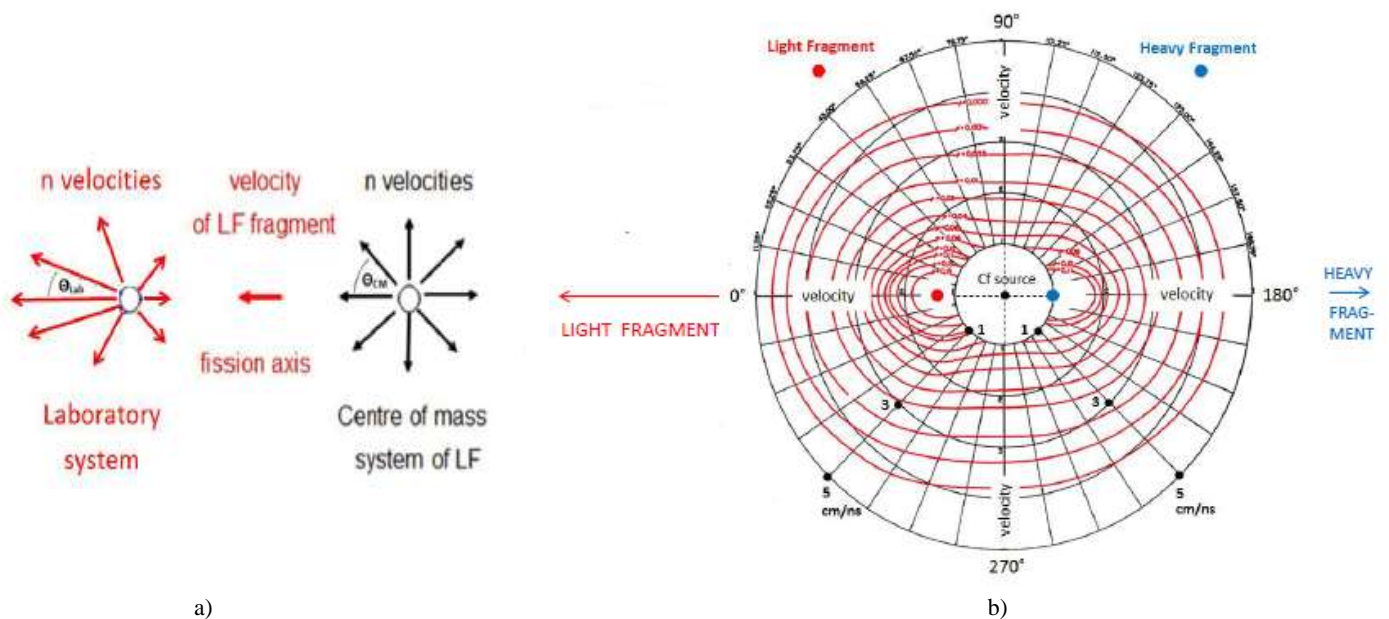
که برای چشمه‌ی ^{252}Cf به صورت رابطه‌ی ۱-۶ می‌باشد:

$$S(E) = 0.771(\sqrt{E})e^{-0.776E}\text{MeV} \quad (۱ - ۶)$$

۱-۳-۶-۱ توزیع زاویه‌ای و سرعت نوترون‌های سریع

در آزمایش‌های پیشگامانه‌ی باومن^۹ و همکارانش (سال ۶۳-۱۹۶۲) نشان داده‌شد که بخش عمده‌ای از نوترون‌های سریع که به صورت همسانگرد از پاره‌هایی که به سرعت کامل نهایی‌شان رسیدند، آزاد می‌شوند. شواهد بدست آمده از تحلیل‌های سرعت‌ها و توزیع‌های زاویه‌ای نوترون‌ها، مربوط به محورهای پاره‌های سبک به سنگین شکافت است، که همانطور که در دستگاه آزمایشگاه مشاهده شد، به طور قابل توجهی غیر همسانگرد است. چگالی نوترون به صورت تابعی از سرعت و زاویه نسبت به محور شکافت است، که به شدت در جهت خلاف یکدیگر حرکت می‌کنند (این را به توزیع همسانگرد سرعت‌های نوترون پاره‌ها در دستگاه مرکزجرم نسبت می‌دهند)، که با انتقال به دستگاه آزمایشگاه توسط بردار اضافی سرعت‌های نوترون و پاره‌ها به دست می‌آید. شکل ۱-۲. b. مختصات قطبی در فضای سرعت است و شکل ۱-۲. a) چگالی نوترون در فضای سرعت است. همانطور که در شکل ۱-۲ دیده می‌شود پاره‌های سبک بیش‌تر به عقب رانده می‌شوند. با توجه به شکل ۱-۲ اگر چهار عدد آشکارساز را در زوایای مختلف 0° و 90° و 180° و 360° قرار دهیم مشاهده می‌کنیم که سرعت نوترون‌های حاصل از پاره‌ها در دستگاه مرکز جرم یک توزیع زاویه‌ای همسانگرد دارند.

^۹. H.Bowman



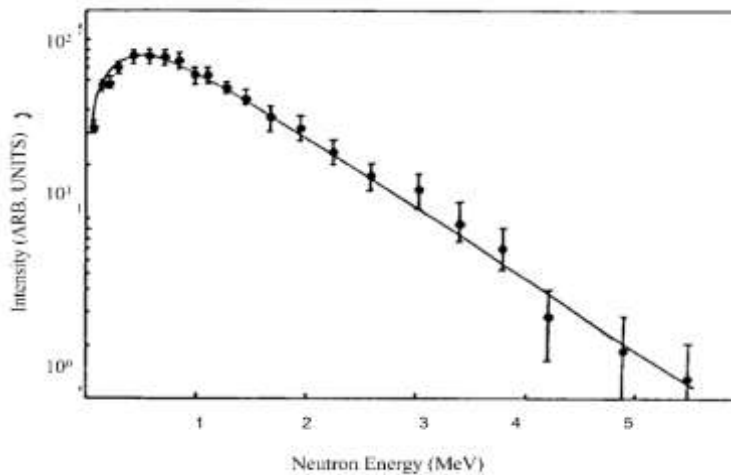
a)

b)

شکل ۱-۲. توزیع زاویه‌ای چشمه کالیفرنیم-۲۵۲ در دستگاه آزمایشگاه و در دستگاه مرکز جرم [۱۱].

۱-۶-۳-۱ شناخت طیف نوترون شکافت خود به خودی

شناخت طیف شکافت نوترونی برای بیش‌تر کاربردهای فرآیند شکافت، اساسی است. علی‌رغم این حقیقت، تنها طیف ^{235}U با جزئیات، اندازه‌گیری شده‌است. طیف شکافت ^{239}U ، ^{233}U ، ^{252}Cf در زوایای مختلف مطالعه می‌شوند. هیچ یک از این اندازه‌گیری‌ها یک بیشینه‌ی واضحی را نشان نمی‌دهد. با چنین اطلاعات محدود موجود، آزمایشی به منظور مقایسه‌ی بین طیف شکافت خود به خودی ^{252}Cf و طیف ناشی از شکافت القایی U صورت گیرد. این دو طیف به تئوری‌های موجود و برخی نتایج اولیه‌ی تشکیل شده درباره‌ی سینماتیک نشر نوترون شکافت مربوط می‌شوند. از نقطه نظر علمی به نظر می‌رسد که ^{252}Cf ، برای تشکیل چشمه‌های نوترونی به صورت قابل توجهی در دسترس قرار می‌گیرد. نمودار طیف نوترون شکافت به صورت شکل ۱-۳ می‌باشد [۸]:



شکل ۱-۳. نمودار طیف نوترون چشمه شکافت خود به خودی کالیفرنیوم-²⁵²[۸].

به طور کلی ویژگی‌های این چشمه در جدول ۱-۴ آمده است.

جدول ۱-۴ ویژگی‌های هسته‌های چشمه‌ی نوترونی ²⁵²Cf [۱۲].

Feature	Value
<i>mode of decay</i> { α - emission <i>Spontaneous fission</i>	96.9%
	3.1%
Half life { α - decay <i>Spontaneous fission</i> <i>Effective</i>	2.731 ± 0.007 y
	85.5 ± 0.5 y
	2.646 ± 0.004 y
Neutron emission rate	2.4×10^{12} neutron-s ⁻¹ -g ⁻¹
Neutrons emitted per fission	3.76
Average neutron energy	2.348 MeV
Average α -particle energy	6.117 MeV
Gamma emission rate	1.3×10^{13} γ -s ⁻¹ -g ⁻¹
Dose equivalent average energy	2.4 MeV
Specific neutron dose equivalent rate	6.5×10^{-3} Sv-s ⁻¹ -g ⁻¹ at 1 m
Specific photon dose equivalent rate	3.1×10^{-4} Sv- s ⁻¹ -g ⁻¹ at 1 m
Ambient dose equivalent, H*(10)	380pSv-Cm ²
Personal dose equivalent H _p (10)	400pSv-Cm ²
Decay heat { α - decay <i>Spontaneous fission</i>	18.8 W-g ⁻¹
	19.7 W-g ⁻¹
Source volume (excluding void space for He)	< 1 Cm ³ - g ⁻¹

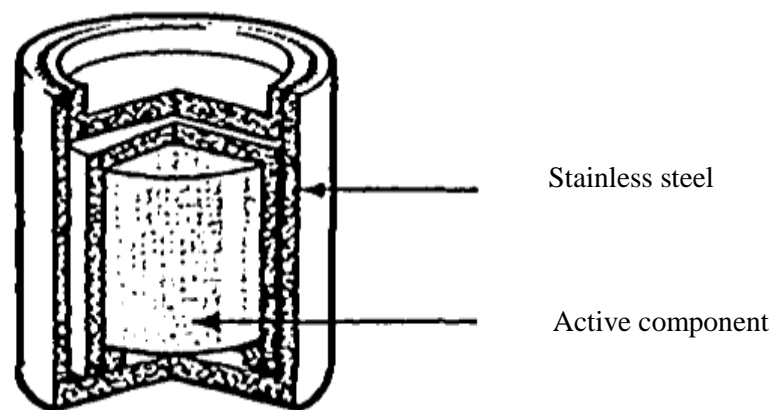
نوترون‌های نشر شده از پاره‌های سبک و سنگین را می‌توان از جهت حرکت پاره‌های سبک و

سنگینی که جدا می‌شوند تشخیص داد. بررسی تئوری و آزمایشگاهی طیف انرژی نوترون شکافت

تاریخچه‌ای طولانی دارد و هنوز هم در جریان است. یک تقریب خوب این است که فرض کنیم در انرژی‌های پایین شکافت عمده‌ی نوترون‌ها که از پاره‌ها آزاد می‌شوند، تمام سرعتشان را دارند. پاره‌ها در مدت زمان $S \times 10^{-21}$ به ۹۰٪ سرعت نهایی‌شان می‌رسند در حالی که نوترون‌ها در زمان بیش‌تر از $S \times 10^{-19}$ آزاد می‌شوند. نقطه‌ی شروع برای تئوری طیف آزادسازی توسط وی. وایسکوف در سال ۱۹۳۷ نشأت گرفته است.

۱-۶-۳ چشمه نوترونی آمرسیوم-بریلیوم

از معمول‌ترین چشمه‌های نوترونی رادیوایزوتوپی، $^{241}\text{Am-Be}$ را می‌توان نام برد که Am به عنوان نشر کننده‌ی آلفا با واپاشی انرژی تقریباً $5/49\text{MeV}$ و نیمه عمر $432/2$ سال است. شکل (۴-۱) نمایی از برش مقطعی چشمه‌ی Am-Be می‌باشد که ساختار دو کپسولی چشمه را نشان می‌دهد [۷].



شکل ۴-۱. نمایی از چشمه آمرسیوم-بریلیوم [۸].

واکنش تولید نوترون به صورت زیر است:

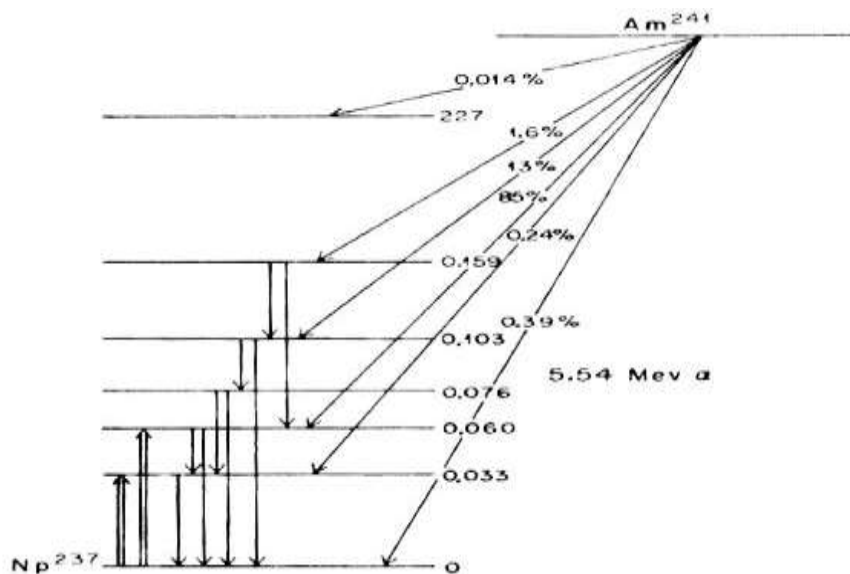


آمرسیوم- ^{241}Am یک عنصر رادیواکتیو است که به طور مصنوعی تولید شده و نیمه عمری معادل ۴۳۲ سال دارد و توسط واپاشی آلفا، پس از تابش گامای کم انرژی (60keV) به ${}^{237}\text{Np}$ واپاشی می‌کند.

شکل ۱-۶ مد واپاشی این عنصر را نشان می‌دهد. ایزوتوپ پایدار ${}^9\text{Be}$ دارای یک نوترون سست مقید با انرژی بستگی حدود $1/7 \text{ MeV}$ می‌باشد. هرگاه ذرات آلفای حاصل از واپاشی‌های پرتوزا با انرژی حدود $4-6 \text{ MeV}$ به این هسته برخورد کند واکنش زیر می‌تواند صورت گیرد:



به دلیل وجود هسته‌های ${}^4\text{He}$ در یک گستره‌ی انرژی و همچنین احتمال تولید ${}^{12}\text{C}$ در حالت برانگیخته‌ی نوترون‌های خروجی تک انرژی نبوده و از یک توزیع طیفی برخوردار می‌باشند. نیمه عمر آن به اندازه‌ی کافی طولانی است که مانع تصحیحات واپاشی مکرر بشود و اینکه بازدهی اکتیویته‌ی $3/17$ کوری بر گرم یا $7/037 \times 10^9$ واپاشی آلفا در هر دقیقه در هر گرم آمرسیوم را نتیجه می‌دهد. بازدهی نوترونی 77 نوترون در هر 10^6 ذره آلفا، میزان نشر نوترون چشمه‌ی Am-Be تنها حدود 0.80 از بازدهی انتظاری است. پرتوهای گامای کم انرژی (0.05 MeV) به اندازه‌ی کافی ضعیف است که به طور کامل توسط جذب کننده‌های با عدد اتمی بالا حفاظ‌گذاری بشود. آلفاهای $5/49 \text{ MeV}$ به عنوان یک منبع انرژی اولیه‌ی عالی در واکنش (α, n) به کار می‌روند تا نوترون یا گاماها‌ی جذبی پر انرژی در عناصر سبک تولید کنند [۱۳].

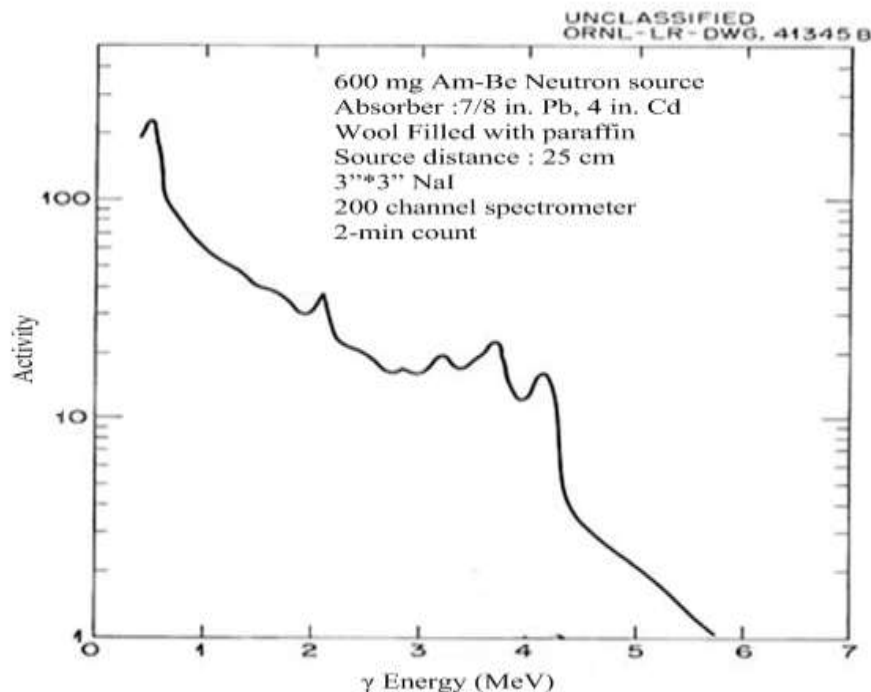


شکل ۱-۵. مد واپاشی آمرسیوم- 241 [۱۳].

ذرات آلفا که از آمرسیم نشر می‌شوند، به هدف (^9Be) برخورد کرده و نوترون‌های با رنج گسترده‌ای از انرژی با میانگین انرژی حدود $4/2\text{MeV}$ و بیشینه‌ای حدود 10 MeV تولید می‌کنند [۷].

۱-۶-۳-۲-۱ الزامات امنیتی برای تولید چشمه‌ی آمرسیم

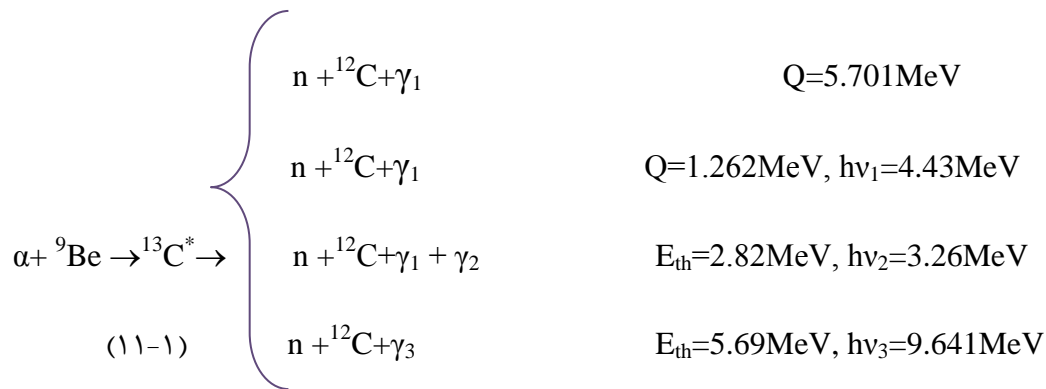
به دلیل اثرات یونیزاسیون ویژه‌ی بالای تابش آلفا، ضروری است برای بررسی عملیاتی همچون تصفیه‌سازی مواد حاوی آلفا، استفاده‌ی آلفای رادیواکتیو برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی ساخت چشمه و...، چشمه را در یک جعبه‌ی مهر و موم شده در فشار ناچیز منفی نگهداری کنند. علاوه بر خطر آلفا، تابش‌های گاما 60keV و نوترون‌ها لازم به حفاظ‌گذاری است [۱۳]. در شکل (۷-۱) طیف گامای مربوط به چشمه‌ی Am-Be را مشاهده می‌کنید که با استفاده از کریستال $\text{NaI}3\times 3$ و تحلیلگر چندکاناله برای شمارش محصول گامای جذبی پر انرژی در واکنش (α, n) بر روی بریلیوم تولید شده است.



شکل ۷-۱. طیف گامای چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ [۱۳].

۱-۶-۳-۲ طیف انرژی نوترون چشمه آمرسیوم-بریلیوم

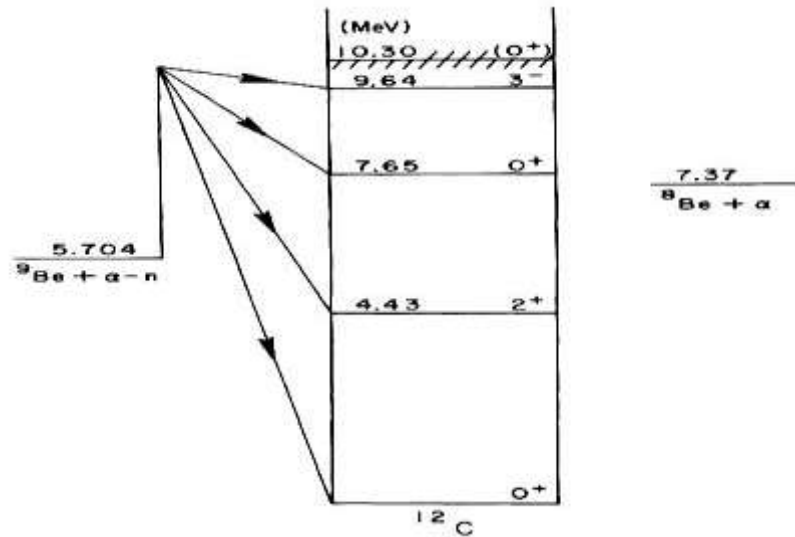
همانطور که گفته شد چشمه‌های آلفا-نوترون را از طریق واکنش (α, n) تولید می‌کنند. زمانی که ذره‌ی آلفا با Be برخورد می‌کند واکنش‌های هسته‌ای مطابق با رابطه‌ی (۱-۱۱) ایجاد می‌شود که ^{13}C (هسته‌ی مرکب) در حالت میانی این واکنش تشکیل شده و کانالی از واکنش‌ها مطابق با شکل (۱-۷) تشکیل می‌دهد که در آن چند گروه نوترونی دیده می‌شود. با در نظر گرفتن سطح مقطع مربوط به هر کدام از این گروه‌های نوترونی می‌توان به تفسیر طیف انرژی نوترون این چشمه پی برد.



در ابتدا انرژی آلفا $5/5 \text{ MeV}$ است. با توجه به شکل سطح هسته‌ی مرکب ^{13}C به اندازه‌ی تقریباً 11 MeV بالاتر از حالت پایه^{۱۰} است که کانال خروجی این واکنش $n + \text{C}$ می‌باشد. به این معنی که کانال‌ها را تا 5 حالت برانگیخته که انرژی حدود $10/8 \text{ MeV}$ است می‌توان در نظر گرفت. نظر به اینکه پرتوهای گامای $4/4 \text{ MeV}$ توسط یک گذار از اولین حالت برانگیخته به حالت پایه‌ی ^{12}C ساطع می‌شوند، تنها پرتوهای گامای $4/4 \text{ MeV}$ اندازه‌گیری می‌شوند و از دیگر حالت‌های برانگیخته کانال یک واکنش تجزیه^{۱۱} Break up باز می‌شود که یک واپاشی به سه آلفا است.

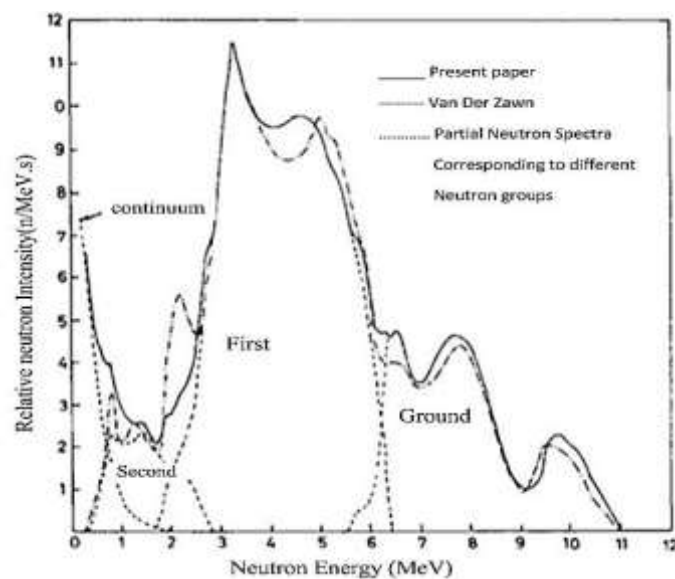
¹⁰ Ground state

¹¹ با توجه به انواع واکنش مستقیم که می‌توان یکی از آن‌ها را break up نام برد.



شکل ۱-۷. ترازهای انرژی ^{12}C در واکنش مربوط به چشمه (α, n) [۱۴].

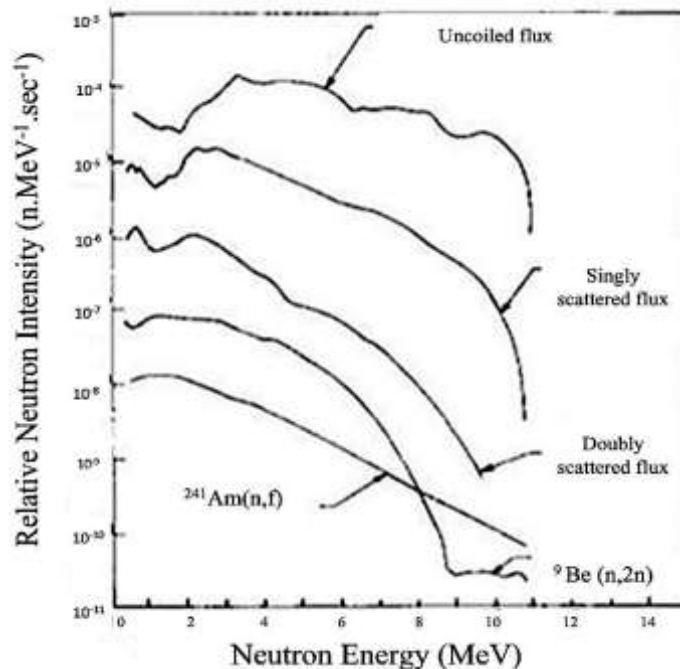
سطح مقطع‌ها برای کانال‌های واپاشی احتمالی گروه‌های نوترونی n_0, n_1, n_2 و n_3 که به ترتیب مربوط به کانال‌های واپاشی: $(\alpha, n_{GS}), (\alpha, n_{1st}), (\alpha, n_{2nd})$ و $(\alpha, n_{continuum})$ تعلق دارند، بر طبق کتابخانه‌ی JENDL-AN-2005 به ترتیب دارای مقادیر: $5.0\text{mb}, 353\text{mb}$ و 39mb و صفر می‌باشد که کانال (α, n_{1st}) گاماها $4/44\text{ MeV}$ ساطع می‌کند و سطح مقطع آن 80% از خروجی کانال‌های احتمالی را به خودش اختصاص می‌دهد که این تأثیرگذاری با توجه به انرژی آلفا است [۱۵، ۱۶]. با توجه به این کانال‌های واپاشی و برهمکنش‌های ثانویه که در ادامه توضیح داده می‌شود می‌توان توزیع انرژی نوترون برای چشمه را با جمع توزیع‌های مربوط به هر کانال مطابق با شکل ۱-۸ بدست آورد.



شکل ۱-۸. طیف اولیه نوترون چشمه‌ی نوترونی آمرسیوم-بریلیوم [۱۷].

۱-۶-۳-۲-۳ برهمکنش‌های ثانویه

با توجه به گروه نوترونی n_3 می‌توان برهمکنش‌های ثانویه و اثرات آن بر روی تغییر شکل طیف را بررسی کرد که شامل: پراکندگی الاستیک با بریلیوم، اکسیژن و آمرسیوم، واکنش ${}^9\text{Be}(n,2n)$ ، ${}^{241}\text{Am}(n,f)$ ، ${}^8\text{Be}(\alpha, \alpha n)$ می‌باشد که در (شکل ۱-۹) نشان داده شده‌است. با توجه به نمودارها گستردگی زیر 0.5 MeV برای واکنش Break up در محاسبات مربوط به سهم برهمکنش‌های ثانویه صرف نظر شده‌است. سهم مربوط به پراکندگی الاستیک با اکسیژن و آمرسیوم خیلی ناچیز بوده و صرف نظر می‌شود. با توجه به شکل پراکندگی الاستیک با بریلیوم برهمکنش ثانویه مهمی است که می‌تواند در تغییر طیف سهم داشته‌باشد. واکنش $(n,2n)$ علی‌رغم داشتن مرتبه‌ی یکسانی از سطح مقطع با پراکندگی الاستیک با بریلیوم به دلیل داشتن نوترون‌های کم انرژی‌ی زمانی که از میان محیط چشمه عبور می‌کند، سهم خیلی ناچیزی دارد. به طور مشابه سهم شکافت در آمرسیوم نیز ناچیز است [۱۷].



شکل ۱-۹. سهم ناشی از هر کدام از برهمکنش‌های ثانویه در طیف نوترون چشمه‌ی ${}^{137}\text{Cs}$ [۱۷].

در نهایت به بررسی و محاسبه‌ی مقادیر انرژی طیف برای ذره‌ی آلفا با انرژی $5/26 \text{ MeV}$ پرداختیم که نتایج بدست آمده در جدول ۱-۵ نشان داده شده است.

جدول ۱-۵. انرژی نوترون محاسبه شده برای واکنش ${}^9\text{Be}(\alpha, n) {}^{12}\text{C}$

Final ${}^{12}\text{C}$ state	Alpha energy (MeV)	Preferred C.M. angle	Calculated neutron energy (MeV)
Ground state	۵/۲۶	0° (Max energy)	۱۰/۸۱
	۵/۲۶	180° (Min energy)	۶/۶۷
$\text{MeV}4/431^{\text{st}}$ Excited state	۵/۲۶	0° (Max energy)	۶/۱۸
	۵/۲۶	180° (Min energy)	۳/۱
$\text{MeV}7/662^{\text{nd}}$ Excited state	۵/۲۶	0° (Max energy)	۲/۵
	۵/۲۶	180° (Min energy)	۰/۸

۱-۷ کاربردهای چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ و آمرسیوم-بریلیوم

چشمه‌های رادیوایزوتوپی ${}^{252}\text{Cf}$ و ${}^{241}\text{Am-Be}$ نشر کننده‌ی نوترونی پر شدتی هستند که به سادگی به صورت چشمه‌ی مهر و موم شده و قابل حمل و به صورت فشرده، کپسولی شده‌اند. این چشمه‌ها به دلیل شار بالا و طیف مناسب آن‌ها، کاربردهای فراوانی در آزمایشگاه‌ها، صنعت و پزشکی دارند [۱۸].

به طور کلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۹]:

- ❖ پرتونگاری نوترون برای شناسایی مؤلفه‌های تسلیحات (صنایع تسلیحاتی).
- ❖ تحلیلگر PGNAA نمونه‌های همچون زغال سنگ و سیمان
- ❖ روش فعال‌سازی معمولی نوترون (NAA)
- ❖ براکی‌تراپی سرطان (درج چشمه کالیفرنیم داخل یا اطراف ناحیه تومور)
- ❖ تأیید حضور مین‌های زمینی

❖ تجزیه و تحلیل آلودگی های نفتی در خاک و اندازه گیری رطوبت خاک

پس از معرفی اجمالی از چشمه های نوترونی ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ ، در فصل دوم نکات مربوطه به

حفاظت سازی این چشمه ها مورد بررسی قرار می گیرد.

فصل دوم

اصول حفاظت‌گذاری

۱-۲ مقدمه

یکی از مهمترین ویژگی‌های تابش‌های هسته‌ای همچون آلفا، بتا، پرتو گاما و نوترون آن است که این تابش‌ها و ذرات به علت اثر یونندگی در بافت، خطری برای سلامتی انسان‌ها و حیوانات محسوب می‌شوند. گاما و نوترون، که قدرت نفوذ بالایی دارند، خطر خارجی محسوب می‌شوند، به همین منظور لازم است که برای جلوگیری از نفوذ تابش تولید شده از چشمه‌های پرتوزا به محیط اطراف، تابش را به حد پایین قابل قبول کاهش داد. فاصله، زمان و حفاظ از پارامترهایی هستند که می‌توان برای کاهش حد تابش اشاره کرد. به گونه‌ای که در هنگام پرتوگیری، فاصله با منبع تابش را افزایش داد، در نتیجه پرتوگیری کاهش می‌یابد و با کاهش زمان تابش‌دهی، می‌توانیم به حد تابش کمتر برسیم. دو پارامتر اول باعث ایجاد محدودیت شده به همین منظور باید به طراحی حفاظی مناسب برای جلوگیری پرتو پردازیم.

۲-۲ طبقه‌بندی نوترون

دمای تشخیص نوترون، که همان انرژی نوترون نامیده می‌شود نشان‌دهنده‌ی انرژی جنبشی نوترون‌ها است که معمولاً بر حسب الکترون ولت بیان می‌شود. از آنجایی که نوع واکنشی که نوترون انجام می‌دهد به انرژی آن وابسته است، می‌توان نوترون‌ها را بر حسب توزیع انرژی (انرژی جنبشی) آن‌ها به چند گروه تقسیم‌بندی کرد که در جدول (۱-۲) نشان داده شده است.

جدول ۱-۲. محدوده‌ی انرژی نوترون‌ها [۲۰].

انرژی نوترون	محدوده‌ی انرژی
0.0-0.025 eV	Cold neutrons
0.025 eV	Thermal neutrons
0.025-0.4 eV	Epithermal neutrons
0.4-0.6 eV	Cadmium neutrons
0.6-1 eV	Cadmium neutrons Epi
1-10 eV	Slow neutrons
10-300 eV	Resonance neutrons
300 eV-1 MeV	Intermediate neutrons
1-20 MeV	Fast neutrons
> 20 MeV	Ultrafast neutrons

۲-۳ سطح مقطع نوترون

میزان انجام برخورد بین نوترون با هسته، بر حسب کمیتی به نام سطح مقطع بیان می‌شود. تعداد نوترون‌هایی که با هسته برخورد می‌کنند متناسب با شدت باریکه، دانسیته‌ی اتم هدف، N ، سطح و ضخامت هدف می‌باشند که با در نظر گرفتن آن‌ها می‌توان به رابطه‌ی (۲-۱) دست یافت.

$$(۲-۱) \quad \sigma I N a X = \text{تعداد برخوردها در ثانیه (در تمام سطح هدف)}$$

که σ ضریب تناسب را سطح مقطع می‌نامند. برای بیان مفهوم سطح مقطع می‌توان این‌طور برآورد کرد که اگر $I a$ نوترون در هر ثانیه به تمام سطح هدف برخورد کند، از این تعداد σI به هر هسته برخورد می‌کند. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که:

$$(۲-۲) \quad \sigma I / a I = \sigma / a$$

برابر احتمال برخورد یک نوترون باریکه با یک هسته است. با توجه به معادله‌ی (۲-۱)، σ دارای واحد سطح است به این معنی که می‌توان آن را سطح مقطع نامید. سطح مقطع‌های نوترون به‌طور جداگانه برای هر نوع واکنش و ایزوتوپ تعریف می‌شوند. بنابراین، برخورد الاستیک با سطح مقطع الاستیک σ_s ، برخورد غیر الاستیک با سطح مقطع غیر الاستیک σ_{in} ، واکنش (n, γ) جذب تابش‌زا، با سطح مقطع جذب (تابش‌زا) σ_γ ، و عمل شکافت با سطح مقطع شکافت σ_f و ... بیان می‌شود که به سطح مقطع میکروسکوپی موسوم است. سطح مقطع کل، یعنی احتمال کل رخداد واکنشی از هر نوع، که برابر حاصل جمع همه‌ی σ ها است سطح مقطع کل می‌نامند، که به صورت رابطه‌ی (۲-۳) بدست می‌آید.

$$(۲-۳) \quad \sigma_t = \sigma_s + \sigma_{in} + \sigma_\gamma + \sigma_f + \dots$$

سطح مقطع‌های نوترون، شدیداً به انرژی نوترون و نیز به وزن اتمی و عدد اتمی هسته‌ی هدف بستگی دارد. شکل دیگری از سطح مقطع که کاربرد فراوانی دارد، سطح مقطع ماکروسکوپیکی، (m^{-1}) Σ ، است که به صورت رابطه‌ی (۴-۲) داده می‌شود [۲۱،۵].

$$\Sigma_i (m^{-1}) = N (\text{atoms}/m^3) [\sigma_i (m^2)] \quad (۴-۲)$$

۴-۲ پویش آزاد متوسط

متوسط فاصله‌ی λ ، که یک باریکه ذره از نقطه‌ی شروع به وجود آمدنش تا نقطه‌ای که اولین برهمکنش آن اتفاق می‌افتد را می‌توان پویش آزاد متوسط نامید. اگر $P(x)\Delta x$ ، احتمال اینکه ذرات تابشی مسافت x ایی را بدون اندرکنش طی کنند باشد و سپس فاصله‌ی بین x و $x+\Delta x$ ، اندرکنش اتفاق بیفتد. این احتمال بر حسب \bar{P} و P به صورت رابطه‌ی (۵-۲) خواهد شد.

$$P(x)\Delta x = P(x)\bar{P}(\Delta x) \quad (۵-۲)$$

یا

$$P(x) = P(x) \frac{\bar{P}(\Delta x)}{\Delta x} \quad (۶-۲)$$

با میل دادن Δx به سمت صفر و $(\bar{P}(\Delta x))/\Delta x$ به سمت μ ، در این صورت تابع چگالی احتمال $P(x)$ به صورت:

$$P(x) = \mu P(x) = \mu e^{-\mu x} \quad (۷-۲)$$

با استفاده از این تابع چگالی احتمال متوسط فاصله‌ای که یک ذره می‌تواند قبل از اندرکنش با محیط طی کند به صورت زیر بدست می‌آید [۲].

$$\lambda = \int_0^{\infty} x P(x) dx = \int_0^{\infty} x \mu e^{-\mu x} dx = 1/\mu \quad (۸-۲)$$

۲-۵ فرآیند کند کردن نوترون‌ها

به دلیل انرژی بالای نوترون‌های حاصل از چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf ، ما نیازمند کاهش انرژی نوترون‌ها هستیم. به همین خاطر نوترون‌ها باید از کندکننده عبور کنند در این صورت بخشی از انرژی آن‌ها در طی عبور از کندکننده از طریق واکنش‌های (n,p) ، (n,α) و $(n,2n)$ از دست خواهد رفت. یک کندکننده‌ی مناسب باید دارای سطح مقطع پراکندگی بالایی برای نوترون‌های سریع و سطح مقطع جذب پایینی برای نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی باشد. همچنین باید دارای عدد اتمی پایین باشد تا در هر برخورد با نوترون انرژی بیش‌تری از دست بدهد.

بنابراین، نوترون‌ها طی عبور از ضخامت dx ماده با $n dx$ اتم در هر واحد سطح باریکه مواجه می‌شوند که در آن n تعداد اتم‌های ماده در واحد حجم است. هر گاه σ_t ، سطح مقطع کل نوترون باشد، در این صورت کاهش شدت I برابر است با:

$$dI = -I \sigma_t n dx \rightarrow I = I_0 e^{-\sigma_t n} \quad (۹-۲)$$

با افزایش ضخامت، شدت طبق رابطه‌ی نمایی بالا کاهش می‌یابد. البته این رابطه را نمی‌توان برای محاسبه‌ی کاهش تعداد کل نوترون‌ها (محاسبه‌ی میزان اثر یک حفاظ استفاده کرد) به کار برد. زیرا، در رابطه‌ی بالا میزان نوترون‌های برخوردی در هدف (حفاظ) در نظر گرفته نشده‌است. همانطور که در بخش ۲-۴ بیان شد می‌توان با استفاده از این رابطه به مفهوم پویش آزاد متوسط رسید.

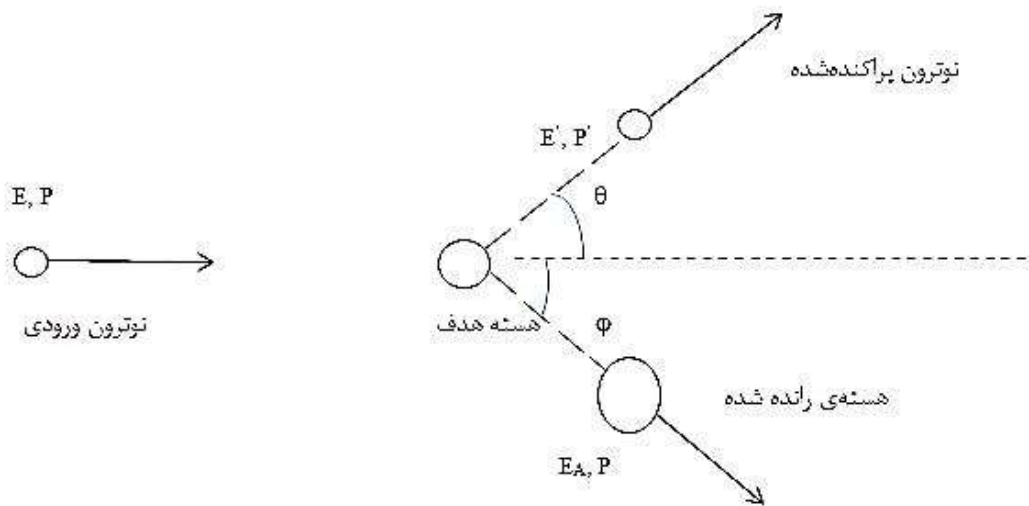
حال برخورد کشسان بین یک نوترون با انرژی اولیه E و سرعت v را با اتم هدفی به جرم A که در آغاز در حال سکون قرار دارد در نظر می‌گیریم و مکانیزم کند شدن نوترون در اثر برخوردهای الاستیک را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به شکل ۲-۱ و در نظر گرفتن قوانین پایستگی انرژی و تکانه‌ی خطی، نسبت بین انرژی نهایی E' و انرژی اولیه‌ی نوترون به صورت زیر بدست می‌آید [۲۱]:

$$E' = \frac{E}{(A+1)^2} \left[\cos\theta + \sqrt{A^2 - \sin^2\theta} \right]^2 \quad (۱۰-۲)$$

اگر برخورد مماسی باشد زاویه θ ، تقریباً برابر صفر است و انرژی نوترون قبل و بعد از پراکندگی یکسان خواهد بود. در نتیجه در اثر چنین برخوردی هیچ‌گونه کاهش انرژی وجود ندارد. کمینه انرژی کاهش یافته زمانی است که زاویه پراکندگی 180° درجه باشد. در این صورت نوترون مستقیماً به عقب برمی‌گردد و حداکثر انرژی را از دست می‌دهد و رابطه ۲-۱۱ به صورت زیر خواهد شد:

$$(E')_{\min} = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 E = \alpha E \quad (2-11)$$

که در رابطه‌ی بالا α پارامتر برخورد نامیده می‌شود.



شکل ۲-۱. پراکندگی الاستیک نوترون به وسیله هسته [۲۱].

مقادیر پارامتر برخورد برای عناصر مختلف متفاوت است و عددی همواره مثبت و بین صفر تا یک می‌باشد. اگر پراکندگی نوترون به وسیله‌ی هیدروژن را بررسی کنیم، به دلیل هم جرم بودن تقریبی آن با نوترون و به کمک مکانیک کلاسیک می‌توان نشان داد که معمولاً یک ذره وقتی که با هم جرمش که در حال سکون است برخورد کند نمی‌تواند در زاویه‌ای بزرگتر از 90° درجه پراکنده شود. بنابراین در این حالت انرژی حداقل نوترون زمانی است که $\theta = \pi/2$ باشد، یعنی:

$$E'(\min) = 0 \quad (2-12)$$

در نتیجه می‌توان به رابطه‌ی کلی که به صورت رابطه‌ی ۲-۹، که برای تمام هسته‌ها صادق است دست یافت.

$$E'(\min) = \alpha E \quad (۱۳-۲)$$

۲-۵-۱ متوسط کاهش انرژی

محاسبه‌ی انرژی متوسط نوترون نسبت به حداقل و حداکثر انرژی پیچیده‌تر می‌باشد و البته دانستن آن نیز مهم است. با در نظر گرفتن پراکندگی نوترون‌ها با هسته‌های سبک، در اغلب انرژی‌های مورد نظر، انرژی متوسط نوترون پراکنده‌شده از رابطه‌ی تقریبی زیر بدست خواهد آمد.

$$\bar{E}' = \frac{1}{2}(1 + \alpha)E \quad (۱۴-۲)$$

و متوسط کاهش انرژی برابر خواهد بود با:

$$\overline{\Delta E'} = E - \bar{E}' = \frac{1}{2}(1 - \alpha)E \quad (۱۵-۲)$$

این معادله برای نوترون‌های پر انرژی صادق نیست. با دقت در رابطه می‌توان به این نتیجه دست یافت که هر چه هسته سبک‌تر (α نزدیک به صفر) باشد، کند کننده‌ی بهتری برای نوترون خواهد بود.

۲-۶-۲ کمیت‌های مورد استفاده در حفاظت پرتوها

به منظور حفاظت یا درمان تابشی مناسب، فهم یکای تابش‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در کارهای آزمایشگاهی برای این کار از دزسنج‌های مناسب استفاده می‌شود. بنابراین یکی از اصول حفاظت در برابر پرتوها دانستن دز حاصل و دز مجاز دریافتی از تابش‌ها می‌باشد.

۲-۶-۱ دز جذبی

آسیب حاصل از تابش وابستگی فراوانی به جذب انرژی دارد. از این رو یکاهای اصلی دز تابشی بر حسب انرژی جذب شده در یکای جرم بافت بیان می‌شود. یکای مناسب برای آن گری^{۱۲} نام دارد که که به صورت زیر می‌باشد.

$$Gy = 1J/Kg \quad (۱۶-۲)$$

¹² Gray

به طور کلی این واحد برای دزسنجی تابش‌های یوننده‌ی ناشی از میدان‌های خارجی پرتوهای گاما، نوترون‌ها و ذرات باردار قابل استفاده است. دز جذب‌شده در مورد باریکه‌ای از نوترون را می‌توان با انرژی جذب شده در هر کدام از عناصر بافت که با نوترون‌ها واکنش می‌کنند محاسبه کرد که به صورت رابطه‌ی ۱۷-۲ می‌باشد.

$$\dot{D}_n(E) = \Phi \frac{(E)E \sum N_i \sigma_i f_i}{1J/Kg} \quad (17-2)$$

که در آن $\Phi(E)$ شار نوترون‌های با انرژی E (بر حسب $n/cm^2.s$)، E انرژی نوترون، N_i تعداد اتم در هر کیلوگرم عنصر i ام، σ_i سطح مقطع پراکندگی عنصر i ام برای نوترون‌ها با انرژی E (بر حسب بارن)، f میانگین کسر انرژی منتقل شده از نوترون‌ها به اتم پراکنده در خلال برخورد با نوترون است. کسر میانگین انتقال انرژی نوترون برای پراکندگی همسانگرد در برخورد کشسان با یک هسته به عدد جرمی M برابر است با رابطه‌ی زیر [۳]:

$$f = \frac{2M}{(M+1)^2} \quad (18-2)$$

۲-۶-۲ دز معادل

دز معادل که با یکای سیورت (Sv) بیان می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(Sv) = D(Gy) \times QF \times DF \quad (19-2)$$

طبق معادله‌ی ۱۹-۲، هر $1mGy$ دز جذب شده از پرتوهای ایکس یا بتا متناظر است با دز معادل $1mSv$ ، در صورتی که هر $1mGy$ دز نوترون تند با دز معادل $20mSv$ متناظر است.

۲-۶-۳ دز معادل مؤثر

به منظور تعیین استانداردهای ایمنی تابش فرض می‌کنیم که احتمال اثرات تصادفی در هر بافتی با دز معادل آن بافت متناسب است. اما به دلیل برابر نبودن حساسیت بافت‌های گوناگون، مقدار ضریب

تناسب در بافت‌های متفاوت یکسان نیست. اگر دز تابش در سراسر بدن یکنواخت باشد، ضریب خطر کل برابر یک است. برای تابش نایکنواخت، مثل پرتوگیری قسمتی از بدن از یک میدان تابشی خارجی، یا پرتوگیری داخلی وقتی تراکم ایزوتوپ در اندام‌های مختلف متفاوت است، برای محاسبه‌ی دز معادل مؤثر از ضرایب وزنی که متناسب با پذیرفتاری نسبی اندام‌ها در برابر اثرات تصادفی هستند، استفاده می‌کنیم. دز معادل مؤثر H_E از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$H_E = \sum W_T H_T \quad (2-20)$$

که در آن W_T ، ضریب وزنی بافت T است، که به صورت جدول (2-2) می‌باشد و H_T دز معادل بافت T است [3].

جدول 2-2. ضرایب وزنی و احتمال خطر برای اثرات تصادفی در بافت [3].

W_T	ملاحظات	احتمال خطر به ازای هر Sv	بافت
0/25	احتمال آسیب ژنتیکی در 2 نسل اول	$4/0 \times 10^{-3}$	عدد تناسلی
0/15	میانگین برای کلیه‌ی سن‌ها در هر دو جنس	$2/5 \times 10^{-3}$	پستان
0/12	سرطان خون	$2/0 \times 10^{-3}$	مغز قرمز استخوان
0/12	سرطان	$2/0 \times 10^{-3}$	ریه
0/03	سرطان بدخیم	$5/0 \times 10^{-3}$	غده‌ی تیروئید
0/03	سرطان استخوان	$5/0 \times 10^{-3}$	سطح استخوان
0/30	سرطان، با فرض اینکه هر بافت بیش از 1/5 این مقدار کل دریافت نکند	$5/0 \times 10^{-3}$	بافت‌های دیگر
		$1/65 \times 10^{-2}$	خطر کل

2-7 انتخاب مواد مناسب

طراحی حفاظ مناسب مستلزم شناخت کامل بر روی مواد می‌باشد. از این‌رو برای استفاده‌ی مواد مختلف از جمله: کندکننده، بازتابنده و جاذب برای نوترون‌ها و پرتوهای گاما باید تسلط کامل به ویژگی آن‌ها و دانستن سطح مقطع‌های مورد نظر داشته‌باشیم. در ادامه به توضیح هر یک از این مواد می‌پردازیم.

۲-۷-۱ کند کننده

کند کننده‌ها موادی هستند که از سرعت نوترون‌های فرودی که در ابتدا پرنرژی هستند می‌کاهد و آنها را کند میکند. این مواد باید دارای سطح مقطع پراکندگی بالا برای نوترون‌های سریع و سطح مقطع جذب پایین برای نوترون‌های حرارتی باشند. همچنین باید دارای عدد جرمی پایین باشد تا در هر برخورد انرژی زیادی از دست بدهد. موادی که می‌توان نام برد شامل: هیدروژن و کربن در پارافین، آب، پلی‌اتیلن، گرافیت و ترکیباتی از آنها است [۲۲].

۲-۷-۲ بازتابنده

به منظور جلوگیری از پراکندگی نوترون‌های حاصل از چشمه، ما نیازمند به انتخاب بازتابنده‌ی مناسب هستیم. استفاده از بازتابنده باعث می‌شود نوترون‌های پراکنده شده به سیستم برگردند و همچنین از فرار نوترون‌ها جلوگیری می‌کند. در طراحی حفاظ به منظور افزایش شار نوترون‌های حرارتی، ما ملزم به استفاده از یک یا چند ماده به عنوان بازتابنده هستیم. بنابراین بازتابنده، باید سطح مقطع جذب پایین برای جذب نوترون‌های حرارتی داشته باشد. همچنین بهتر است بازتابنده عدد اتمی بالایی داشته باشد، تا نوترون در هر برخورد با آن انرژی زیادی از دست ندهد. موادی که بیشتر به‌عنوان بازتابنده استفاده می‌شوند می‌توان به سرب، بیسموت و بریلیوم اشاره کرد [۳۰].

۲-۷-۳ جذب کننده

کاهش شار نوترون پس از کند شدن توسط کندکننده‌ی مناسب، مستلزم استفاده از یک جاذب مناسب است که دارای سطح مقطع جذب نوترون حرارتی بالایی باشد. از این رو برای جلوگیری از عبور نوترون‌های حرارتی از ضخامت حفاظ، باید از جاذب استفاده کرد. برای این کار می‌توان از

موادی مثل بور و ترکیبات حاصل از آن همچون کاربید بور^{۱۳}، بوروهیدرید زیرکونیوم^{۱۴}، بورات پلی اتیلن^{۱۵}، مواد لیتیم دار استفاده کرد.

۲-۷-۴ فیلتر پرتوهای گاما

به دلیل نشر پرتو گاما به طور مستقیم از چشمه و همچنین گامای حاصل از واکنش (n,γ) ناشی از برهمکنش نوترون با مواد کند کننده و جاذب، تضعیف کردن پرتوهای گاما نیز از دیگر مهم‌هایی است که باید به آن پرداخت. از این رو موادی از قبیل: Bi، فولاد حاوی مقدار زیادی آهن و ... که دارای عدد اتمی بالا هستند گزینه‌های مناسبی برای این کار می‌باشند.

۲-۸ مروری بر کارهای انجام شده

در سال ۱۹۹۳، M. A. GOMAA و همکارانش، دز معادل میدان آمیخته‌ی نوترون-گاما را برای یک چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ با در نظر گرفتن یک کندکننده کروی محاسبه کردند. آن‌ها برای این کار از کروی آب با ضخامت صفر تا ۸۰ سانتی‌متر استفاده کرده و مشاهده کردند با افزایش ضخامت حفاظ، میزان دز کاهش می‌یابد. همچنین با آزمون این کار، پی بردند که دز نوترون سریع نسبت به پرتو گامای چشمه، سریع‌تر کاهش می‌یابد. در نهایت با در نظر گرفتن ضخامت ۵۰ سانتی‌متری تا ۸۰ سانتی‌متری دز کمینه را مشاهده کردند [۲۳].

در سال ۲۰۰۳، K. Shtejer-Diaz و همکارانش یک تابش‌گر^{۱۶} نوترونی که در مرکز تحقیقاتی IPEN^{۱۷} به منظور کاربردهای کمی و کیفی آنالیز مواد با استفاده از نوترون‌های حرارتی و سریع خارج از راکتور هسته‌ای نصب شده‌است، طراحی کردند. نمونه‌ی اولیه‌ی این کار شامل یک استوانه‌ی آلومینیومی است که با پارافین پر شده است و دو حفره‌ی استوانه‌ای (B,C) عمودی تشکیل شده‌است

۱۲. Boron Carbide

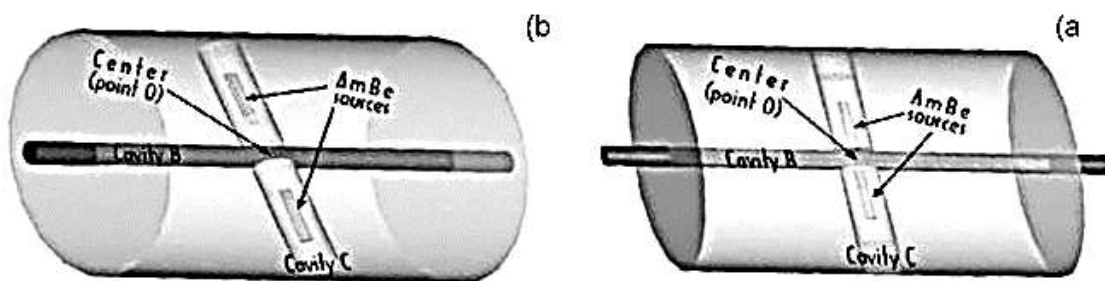
۱۳. Zirconium Borohydride

۱۴. Polyethylene-borated

۱۶. radiator.

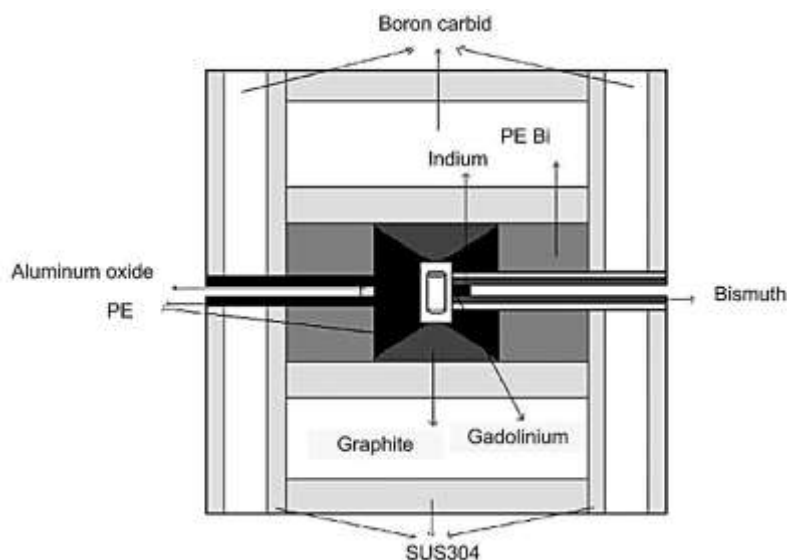
۱۷. IPEN facility.

که به صورت شکل ۲-۱ است. حفره‌ی B جایی است که نمونه قرار می‌گیرد و دو چشمه در حفره‌ی C قرار گرفته‌اند. یکبار این تابش‌گر را به صورت تابش‌گر حرارتی و بار دیگر به عنوان تابش‌گر نوترون سریع شبیه‌سازی کردند و میزان دز جذبی و توزیع شار نوترونی را محاسبه کردند. در شبیه‌سازی کردند و میزان دز جذبی و توزیع شار نوترونی را محاسبه کردند. در شبیه‌سازی به عنوان تابش‌گر نوترون حرارتی از ماده‌ی پلی‌اتیلن بین دو چشمه استفاده شد و برای تابش‌گر نوترون سریع پلی‌اتیلن را حذف کردند. [۲۴].



شکل ۲-۲. پیکربندی تابش‌گر در وضعیت a: تابش‌دهی نوترون سریع و b: تابش‌دهی نوترون حرارتی در سال ۲۰۱۳، نصرآبادی و همکارش برای چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ، حفاظی مناسب با در نظر گرفتن مواد مختلف به منظور قدرت کندکنندگی نوترون‌های تند و توانایی جذب نوترون‌های حرارتی طراحی کردند. مواد مورد استفاده در این پروژه، سازگار با نیازهای ایمنی، محدودیت‌های هزینه و توانایی مواد است. بعد از بهینه کردن ضخامت کند کننده، مواد دیگری برای تضعیف نوترون‌ها امتحان شدند. سپس کند کننده ثابت شد و بهترین پیکربندی حفاظ انتخاب شد تا دز معادل خارج حفاظ را کمینه کردند. در نهایت، ناحیه‌های مناسب به منظور رسیدن به بیشینه شار نوترون حرارتی و سریع را به صورت کانال‌هایی در آن تعیین کردند. این پیکربندی که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، به ما توانایی استفاده از شار نوترونی موجود در کانال‌های تابش‌دهی با محدوده‌ی انرژی مختلف برای تابش‌دهی نمونه‌ها، با قرار گرفتن اشخاص، تحت حد مجاز تابش را می‌دهد. مواد مورد استفاده در این پروژه شامل، دو لایه کندکننده‌ی پلی‌اتیلن و پلی‌اتیلن حاوی ۵٪ بیسموت است که به دلیل سطح مقطع پراکندگی بالای نوترون سریع استفاده شده‌اند. همچنین این مواد از C و H ساخته شده‌اند و

دارای ویژگی مکانیکی و حرارتی مناسب برای کندسازی نوترون هستند. دو مخروط گرافیتی در بالا و پایین سیستم قرار گرفته است. برای تضعیف نوترون‌های سریع و پرتوهای گاما نیز از ترکیبات بورون و فولاد شامل مقدار زیادی آهن استفاده شده است. بعد از برآورد ضخامت لایه‌های مختلف، طراحی نواحی تابش‌دهی مورد مطالعه قرار گرفت. کانال‌های استوانه‌ای با قطر ۴ سانتی‌متر برای تابش‌دهی نمونه استفاده می‌شود. در طراحی کانال‌ها برای ناحیه‌ی حرارتی که بعد از لایه کندکننده‌ی اول طراحی شده از مواد پلی‌اتیلن، Gd، Al_2O_3 و برای ناحیه نوترون سریع که درست بعد از چشمه طراحی شده از مواد In، Bi، Gd و B_4C استفاده کردند [۲۵].



شکل ۲-۳. پیکربندی حفاظ در راستای صفحه‌ی y-z [۲۵].

در کاری دیگر، M. Asamoah و همکارانش در سال ۲۰۱۱، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو پروفایل شار شعاعی و محوری مربوط به دو ناحیه‌ی تابشگر چشمه‌ی نوترونی Am-Be با اکتیویته‌ی ۲۰ کوری در مرکز تحقیقاتی^{۱۸} NNRI تعیین گردید. در طراحی این تابشگر از یک چشمه‌ی Am-Be در مرکز یک بشکه‌ی استوانه‌ای از آب که به برای کندسازی و اثر حفاظ‌گذاری است، استفاده گردید. در این طراحی، چشمه در پلیمر پلکسی‌گلاس^{۱۹} تعبیه شده و دو کانال تابش‌دهی با قطرهای مختلف

^{۱۸}. National Nuclear Research Institute Facility

^{۱۹}. $C_5H_8O_2$

در فواصل مختلفی از چشمه قرار گرفته اند و توزیع شار نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع را مورد بررسی قرار دادند [۷].

در نتیجه با توجه با طراحی‌ها و کارهای انجام شده‌ی پیشین، در این پایان نامه به بررسی حفاظ لایه‌لایه‌ای به جای استفاده از حفاظی تک لایه می‌پردازیم که در فصل بعدی به تفصیل بیان می‌شود.

فصل سوم

محاسبه شارودز چشمه نوترونی

۳-۱ مقدمه

کد MCNP یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی هسته‌ای است که بر اساس روش مونت کارلو کار می‌کند. این کد در طراحی نوترونی راکتورهای هسته‌ای و بررسی ایمنی آن‌ها، محاسبات مصرف سوخت، طراحی حفاظ، پرتو پزشکی و ... کاربردهای بسیاری دارد. در این فصل ضمن معرفی اجمالی کد MCNP، چگونگی شبیه‌سازی چشمه‌ها، حفاظ طراحی‌شده و کارت‌های مورد استفاده در کد را مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

۳-۲ تاریخچه و کد MCNP

کد MCNP برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ در آزمایشگاه لوس آلاموس^{۲۰}، تحت عنوان MCS، تهیه شد و در سال ۱۹۷۷ برای اولین بار با نام MCNP ارائه گردید و در ادامه نسخه‌های ۴A و ۴B، که تنها ذرات نوترون و فوتون را در نظر می‌گرفت، ارائه شد. در سال ۲۰۰۰ ذره‌ی الکترون به نسخه قبلی آن اضافه شد و با نام MCNP4C به بازار آمد. بعد از آن نسخه‌های X، ۵ و ۶ ارائه گردید که دارای قابلیت‌های فراوانی می‌باشند. MCNP یک کد بین‌المللی برای آنالیز ترابرد نوترون‌ها و پرتوهای گاما به‌وسیله‌ی روش مونت کارلو می‌باشد. ما در این کار از نسخه‌ی MCNPX 2.6 استفاده می‌کنیم [۲۶].

۳-۳ ساختار فایل ورودی

برای استفاده از این کد باید یک فایل ورودی، شامل اطلاعات مسئله از جمله هندسه، مواد، چشمه‌ی پرتو، خروجی‌های مورد نظر و ... تهیه شود. این فایل، یک فایل متنی است که می‌تواند با استفاده از هر نرم افزار ویرایش فایل‌های متنی نوشته شود. هر فایل ورودی شامل یک قسمت اصلی است که هر قسمت با یک خط خالی از قسمت قبلی و بعدی جدا می‌شود. اولین قسمت اصلی، بخشی است که شامل تعریف سلول‌های مسئله می‌باشد. دومین قسمت فایل ورودی، شامل تعریف سطوحی است که در مسئله استفاده می‌شود. سومین و آخرین قسمت اصلی فایل ورودی شامل داده‌های مسئله مثل چشمه، مواد، نوع خروجی و ... می‌باشد.

^{۲۰}. Los Alamos National Laboratory

۳-۴ کارت‌های مورد نیاز کد

برخی کارت‌های مورد استفاده به صورت زیر می‌باشند:

❖ **کارت سلول:** سلول هر ناحیه‌ای از فضا است که که توسط سطح یا سطوحی محدود می‌شود.

کارت سلول شامل شماره‌ی سلول، شماره‌ی ماده، چگالی ماده و شماره‌ی سطوح است.

❖ **کارت سطوح:** سطوح مختلفی در این کد استفاده شده‌است که شامل سطوح کروی،

استوانه‌ای، مخروطی و ... است. با استفاده از این کارت می‌توانیم حجم‌های با شکل‌های

مختلف و پیچیده را تعریف نمود.

❖ **کارت داده:** این کارت دارای سه قسمت کارت چشمه، کارت مواد و کارت تالی‌ها می‌باشد که

در ادامه توضیح داده می‌شود.

۳-۴-۱ کارت چشمه SDEF

هر فایل ورودی دارای حداقل یک چشمه‌ی ذرات است که برای تعریف آن در کد با استفاده از

دستور SDEF در قسمت کارت داده تعریف می‌شود. پارامترهای قابل تعریف برای چشمه نوع ذره،

انرژی، مکان و ... است.

۳-۴-۲ کارت مواد

برای تعریف مواد مختلف مورد استفاده درون هر سلول با استفاده از دستور Mn نوشته می‌شود. n

همان شماره‌ی ماده‌ای است که در کارت سلول نوشته شده است. یک ماده ممکن است ترکیبی از

چند ایزوتوپ یا به صورت خالص است.

۳-۴-۳ کارت تالی (خروجی برنامه MCNP)

به کمک تعریف تالی‌ها در برنامه می‌توان کمیت‌های مختلف مانند: شار نقطه‌ای، شار سطحی، شار

حجمی، جریان سطحی و کمیت‌های دیگر را محاسبه کرد. برای تعریف تالی مورد نظر با استفاده از

دستور pl: Fn که n در آن شماره‌ی تالی مورد نظر است و pl نوع ذره‌ای که می‌خواهیم محاسبه‌ی تالی را برای آن انجام دهیم.

۳-۵ شبیه‌سازی چشمه و پیکربندی حفاظ

چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf انتخاب شده برای شبیه‌سازی، یک چشمه‌ی ۵۰ میکروگرمی با اکتیویته‌ی ۱ Gbq معادل تقریبی شدت $10^8 \times 1/15$ می‌باشد [۱۰]. به منظور شبیه‌سازی حفاظ مناسب برای چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲، هندسه‌ی لایه‌لایه، که به صورت استوانه‌های هم مرکز است و چشمه‌ی استوانه‌ای کالیفرنیم را احاطه کرده است، در نظر گرفته‌ایم. در اینجا برای محاسبه‌ی دز چشمه، شبیه‌سازی را در دو حالت در نظر گرفتیم: یکی چشمه به صورت نوترونی خالص در نظر گرفته شد و میزان دز نوترون و گامای ثانویه را محاسبه کردیم و در حالت بعدی چشمه به صورت گامایی در نظر گرفته شد و دز گاماها‌ی اولیه محاسبه شد. در نهایت مقادیر محاسبه شده جمع گردید. لایه‌ها شامل: کند کننده، بازتابنده و جذب کننده است که شار نوترون حاصل از چشمه را به کمینه مقدار خود می‌رساند. در این پایان‌نامه سعی بر آن است که شار نوترون‌های سریع و دز حاصل از چشمه که ناشی از نوترون‌های چشمه و گاماها‌ی مستقیم و غیر مستقیم چشمه می‌باشد به کمینه مقدار خود (مقدار $25 \mu\text{Sv/h}$ که توسط توسط کمیسیون بین‌المللی حفاظت اشعه ICRP^{۲۱} تأیید شده است) برسیم [۲۷]. بنابراین، برای طراحی این حفاظ انتخاب مواد مناسب، نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها در کنار یکدیگر و ضخامت مواد اهمیت ویژه‌ای دارد.

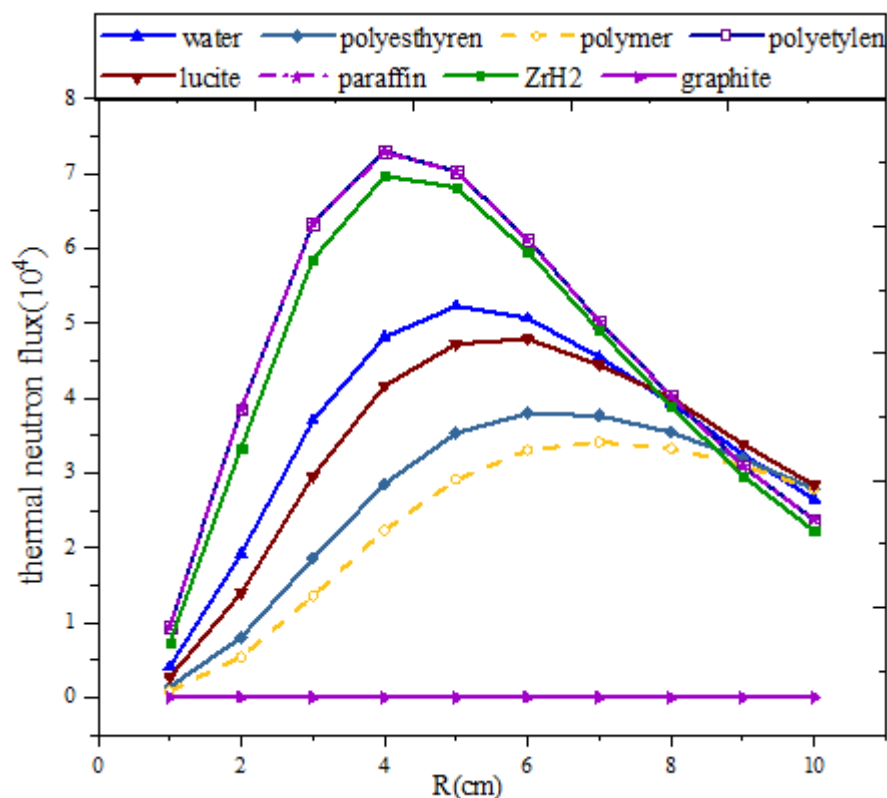
۳-۵-۱ انتخاب لایه‌ی اول

در ابتدا کندکننده‌های مختلفی همچون: پارافین^{۲۲}، آب، پلی‌استایرن^{۲۳}، پلی‌اتیل متاکریلات^{۲۴}، هیدریدزیرکونیوم^{۲۵}، گرافیت را با ضخامت‌های ۱ تا ۱۰ سانتی‌متری را به عنوان لایه‌ی اول بررسی

^{۲۱} international commission on radiological protection.

^{۲۲} CH_2 . ^{۲۳} C_8H_8 . ^{۲۴} $\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8$. ^{۲۵} ZrH_2

کردیم و شار نوترون حرارتی حاصل از آن‌ها با استفاده از تالی F2 که شار عبوری از سطح را می‌دهد، بدست آورده و کندکننده‌ی مناسب به عنوان لایه‌ی اول را انتخاب کردیم. با توجه به شکل ۱-۳ که نمودار مقایسه شار نوترون‌های حرارتی حاصل از چشمه است، مواد پارافین و پلی‌اتیلن و ZrH_2 بیشترین شار نوترون حرارتی را داشته‌اند. ماده‌ی ZrH_2 به دلیل گران قیمت بودن در طراحی حفاظ کنار گذاشته می‌شود و پارافین با ضخامت ۴ سانتی‌متر که بیشینه شار نوترون حرارتی را نتیجه می‌دهد به عنوان ماده‌ی لایه اول انتخاب کردیم.

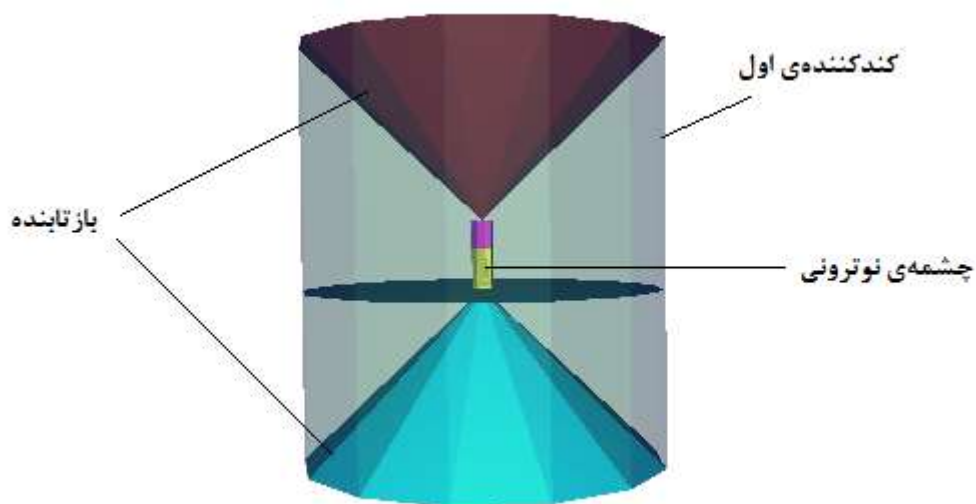


شکل ۱-۳. نمودار شار نوترون حرارتی برای مواد مختلف لایه‌ی اول حفاظ چشمه‌ی کالیفرنیم-۲۵۲

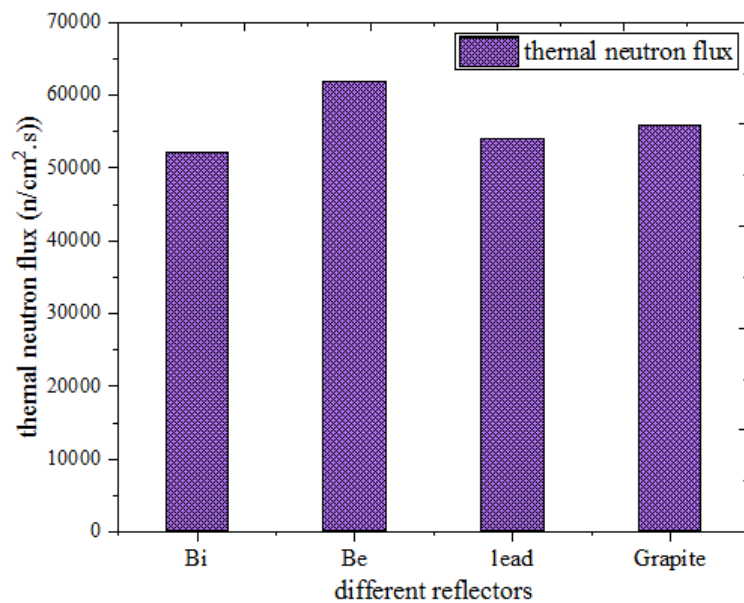
۳-۵-۲ انتخاب بازتابنده‌ی مناسب

به منظور افزایش شار نوترون حرارتی، از بازتابنده در ساختار هندسه‌ی حفاظ استفاده شده است. از این رو موادی همچون: بریلیوم، بیسموت، سرب و گرافیت که دارای خاصیت بازتابندگی می‌باشند را در نظر گرفتیم. با توجه به نمودار ۳-۳، بریلیوم به عنوان بازتابنده‌ی مناسب انتخاب شد. بریلیوم علاوه بر

خاصیت بازتابندگی حرارتی دارای خاصیت تکثیرکنندگی نیز می‌باشد، که استفاده از این ماده را در ساختار حفاظ مناسب‌تر می‌کند. در پیکربندی حفاظ مورد نظر بازتابنده را به صورت هندسه‌ی مخروطی شکل، در بالا و پایین چشمه‌ی استوانه‌ای قرار داده که تا حد امکان از فرار نوترون‌ها به بیرون جلوگیری کند. ساختار هندسی بازتابنده و لایه‌ی کندکننده‌ی اول به صورت شکل ۲-۳ در نظر گرفته شد.



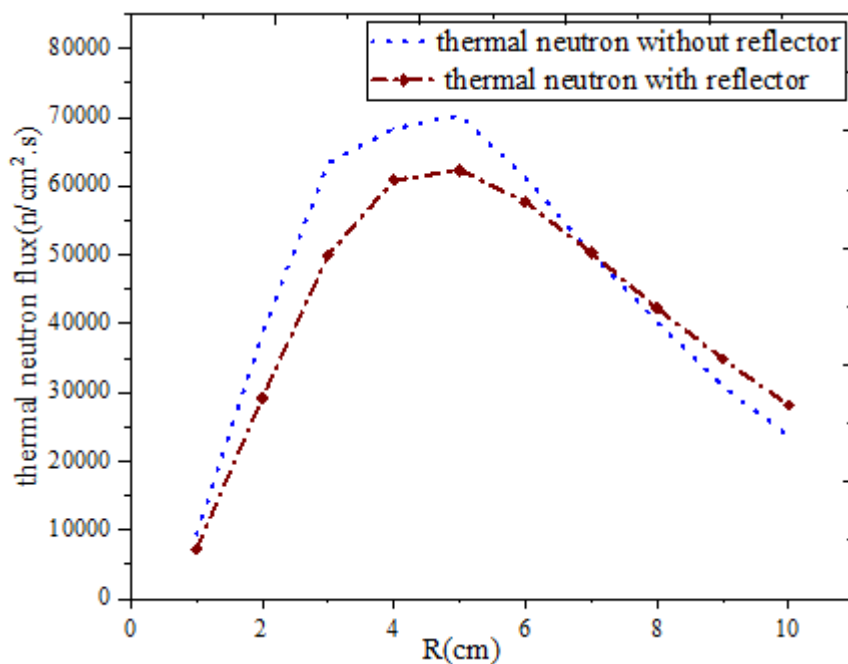
شکل ۲-۳. ساختار هندسی لایه‌ی اول و بازتابنده.



شکل ۳-۳. نمودار مقایسه شار حرارتی برای مواد مختلف بازتابنده.

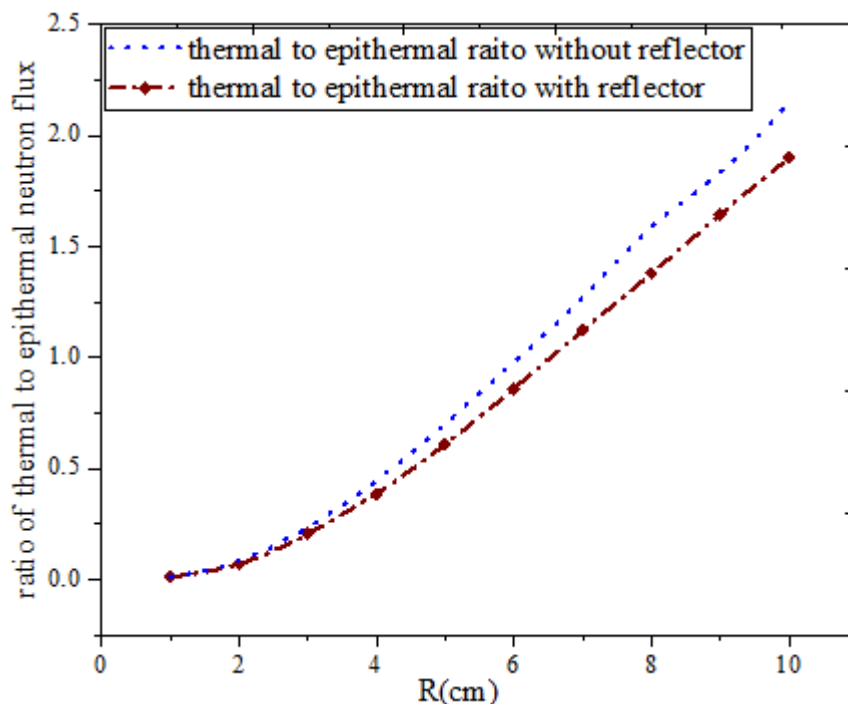
۳-۵-۳ بررسی اثر افزودن بازتابنده به لایه‌ی اول کند کننده

با افزودن بازتابنده به کندکننده‌ی لایه‌ی اول مشاهده شد که میزان شار نوترون‌های حرارتی چشمه‌ی مورد مطالعه، در ۴ سانتی متری کمتر از شار نوترون در حالتی است که بازتابنده وجود ندارد. این در حالی است که شار فوق حرارتی و شار سریع نوترون چشمه نیز به تناسب زیاد می‌باشند. در این صورت ما به بررسی شار نوترونی در ضخامت صفر تا ۱۰ سانتی متری برای دو حالت وجود و عدم حضور بازتابنده پرداختیم. در نمودار ۳-۴، برای لایه‌ی اول در ۴ سانتی متری، شار حرارتی بالا است و اما شار فوق حرارتی نوترون نیز بالا است. در صورتی که بخواهیم در لایه‌ی اول از وجود بازتابنده نیز استفاده کنیم باید ضخامت لایه‌ی اول بیش از ۷ سانتی متر باشد. در غیر این صورت نقش بازتابنده مفید نیست. حال با استفاده از نمودارهای نسبی شارهای حرارتی و غیر حرارتی نوترون به بررسی ضخامت بهینه برای لایه‌ی اول می‌پردازیم.



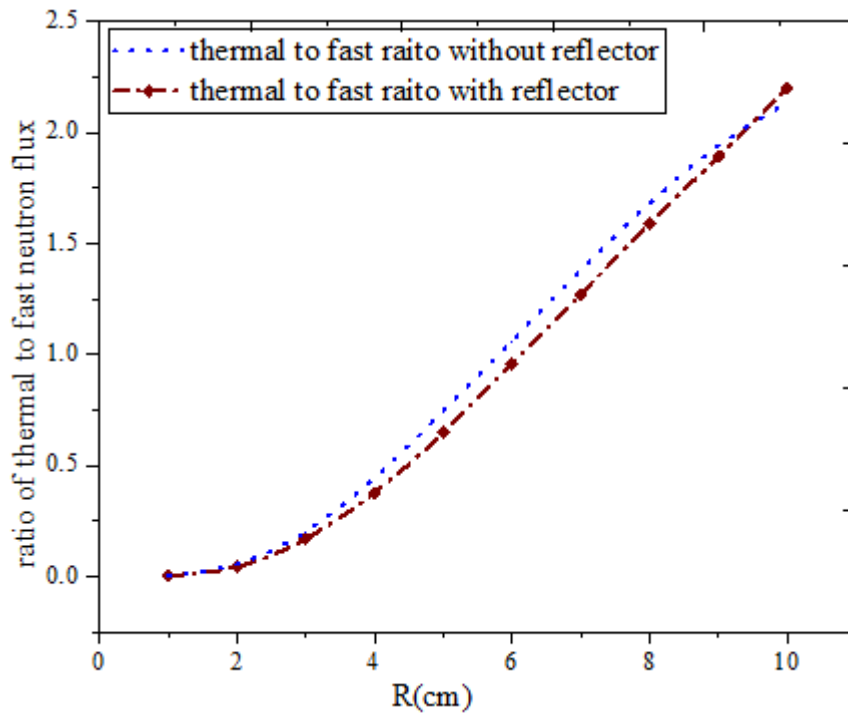
شکل ۳-۴. نمودار شار حرارتی برای دو ساختار هندسی با استفاده از بازتابنده و بدون استفاده از بازتابنده در لایه‌ی اول حفاظ چشمه‌ی نوترونی.

در شکل ۳-۵ مشاهده می‌کنید که نسبت شار حرارتی به شار فوق حرارتی برای دو ساختار با استفاده از بازتابنده و بدون استفاده از بازتابنده یک روند افزایشی دارد.

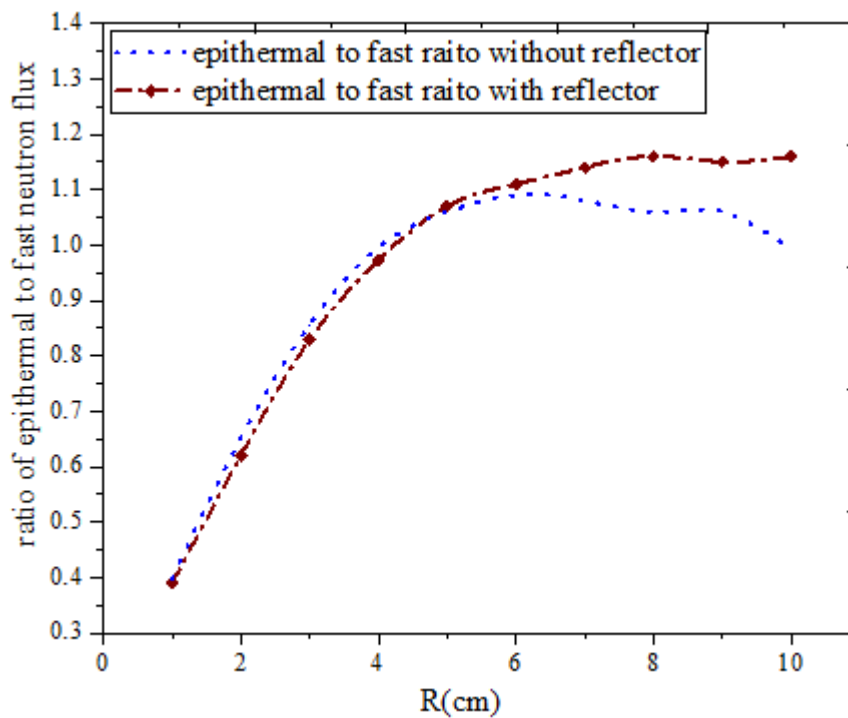


شکل ۳-۵. نمودار نسبت شار حرارتی به فوق حرارتی برای دو ساختار با استفاده از بازتابنده و بدون استفاده‌ی بازتابنده.

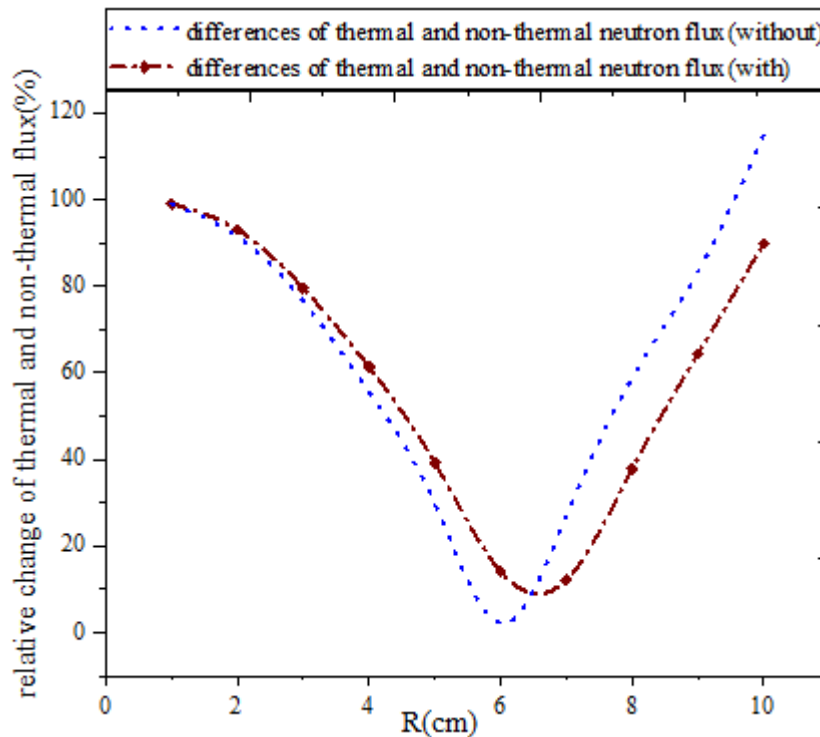
بنابراین، با در نظر گرفتن نمودارهای قبلی و مشاهده‌ی نمودارهای ۳-۶ تا ۳-۷ می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش ضخامت در ۷ سانتی‌متر به بالا تغییرات شار حرارتی و فوق حرارتی تقریباً ثابت بوده و با افزایش شار حرارتی تغییرات شار فوق حرارتی نیز زیاد می‌شود. در نتیجه اگر بخواهیم ضخامت ۴ سانتی‌متری را انتخاب کنیم با استفاده از بازتابنده، اثر بازتابنده ملاحظه نمی‌شود و البته در این ضخامت همان‌طور که شار حرارتی بیشینه است، شار غیر حرارتی نیز مقدار بالایی دارد. با توجه به شکل ۳-۸ که نسبت اختلاف شار نوترون حرارتی به غیر حرارتی (فوق حرارتی) را نشان می‌دهد، بیان‌گر این است که افزودن شعاع استوانه‌ی پارافین همراه با بازتابنده تا چه سطحی می‌تواند بر افزایش شار نوترون مؤثر باشد. مقدار کمتر برای نسبت اختلاف شار نوترون حرارتی و غیر حرارتی بیانگر این است که در صد خوبی از نوترون‌های غیر حرارتی به حرارتی تبدیل شده‌اند. بنابراین برای ساختار لایه‌ی اول از استوانه‌ی پارافینی که حاوی بازتابنده‌ی برلیوم می‌باشد با ضخامت ۷cm استفاده شد.



شکل ۳-۶. نمودار نسبت شار نوترون حرارتی به نوترون سریع با استفاده از بازتابنده و بدون استفاده از بازتابنده.



شکل ۳-۷. نمودار نسبت شار فوق حرارتی به شار سریع برای دو ساختار با استفاده از بازتابنده و بدون بازتابنده.



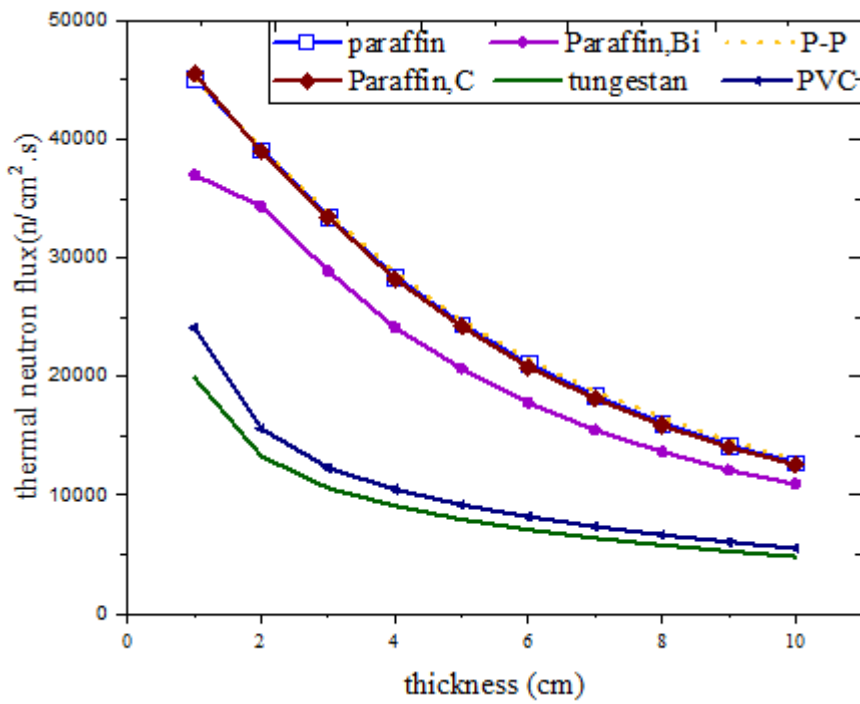
شکل ۳-۸. نمودار اختلاف شار حرارتی و فوق حرارتی تقسیم برفوق حرارتی بر حسب در صد.

۳-۵-۴ انتخاب لایه‌ی دوم

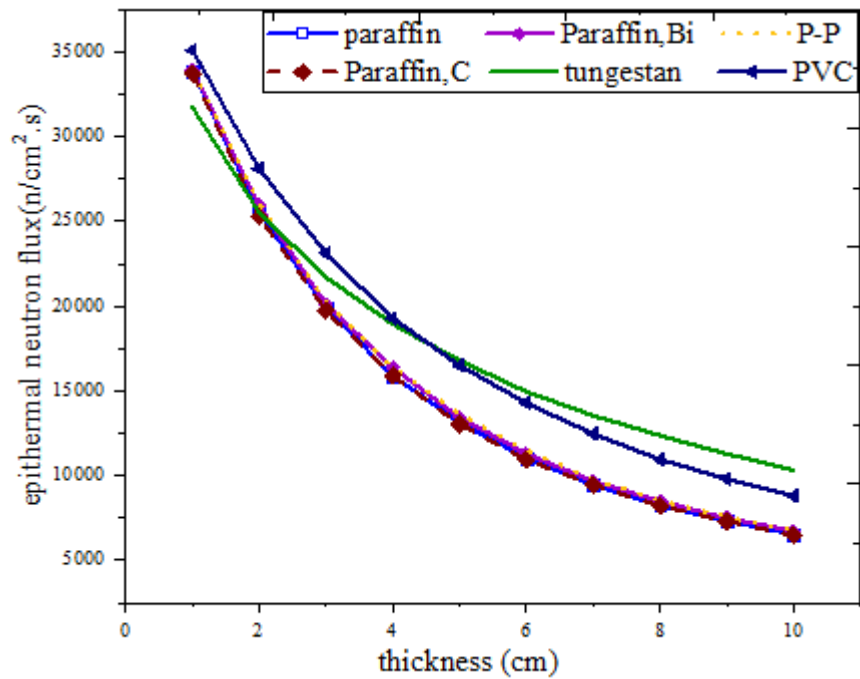
در ادامه برای افزایش شار نوترون حرارتی و کاهش شار نوترون سریع از یک لایه کندکننده‌ی دیگر استفاده کردیم. برای این کار مواد مختلف که در جدول ۳-۱ نشان داده شده است را شبیه‌سازی کرده و در شکل‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ و ۳-۱۲ به ترتیب: شار نوترون حرارتی و فوق حرارتی و سریع را بدست آورده و نمودارها را رسم کردیم.

جدول ۳-۱. ترکیبات و مواد استفاده شده برای تعیین لایه‌ی دوم کند کننده.

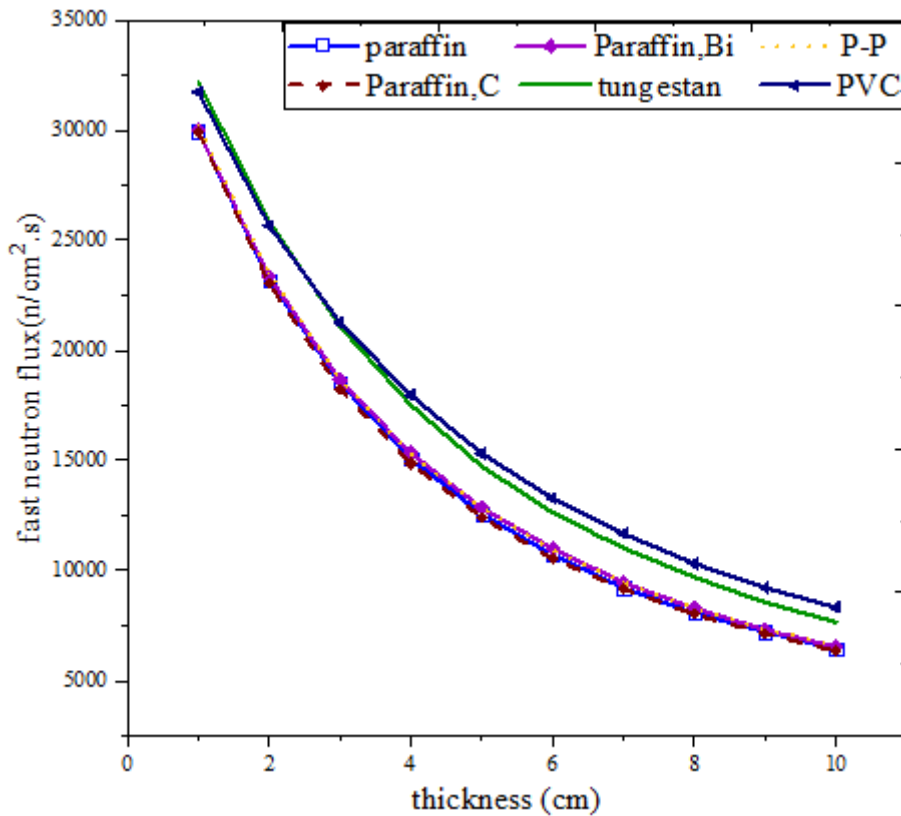
Composition	مواد	چگالی (g/cm^3)
$\text{C}_{25}\text{H}_{52}$, 10% Graphite	پارافین با ۱۰٪ گرافیت	۰/۹۷
Bi CH_2	پلی اتیلن با ۵٪ بیسموت	۰/۹۸
$\text{C}_{25}\text{H}_{52}$	پارافین	۰/۹۳
W	تنگستن	۱۹/۳
C_2H_4 C_3H_6	۵۰٪ پلی اتیلن با ۵۰٪ پروپیلن	۰/۹۲
CH_2	پلی اتیلن	۰/۹۴۱



شکل ۳-۹. نمودار شار نوترون حرارتی بر حسب ضخامت کند کننده‌ی لایه‌ی دوم.

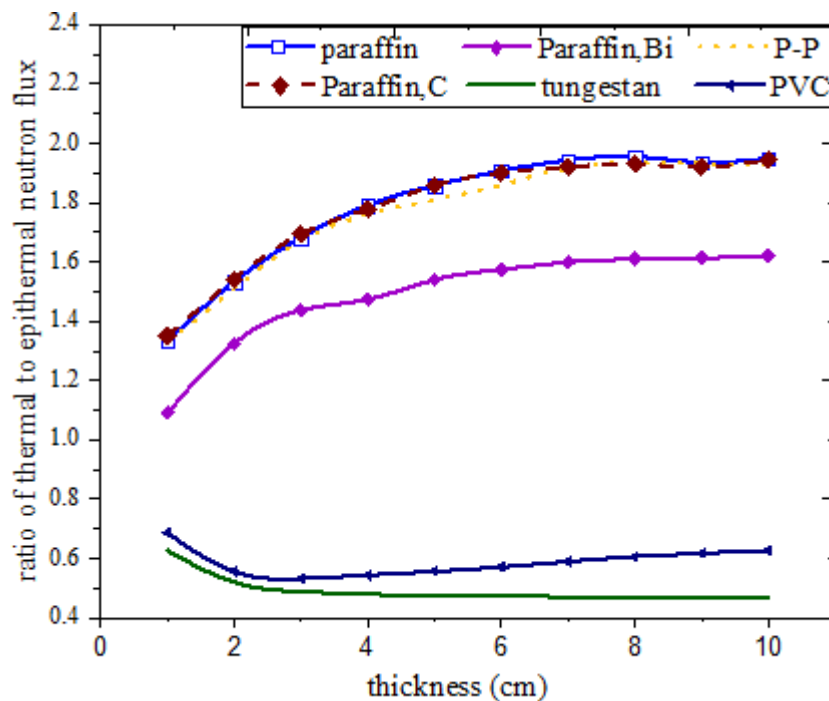


شکل ۳-۱۰. نمودار شار نوترون‌های فوق حرارتی بر حسب ضخامت کند کننده‌ی لایه‌ی دوم.

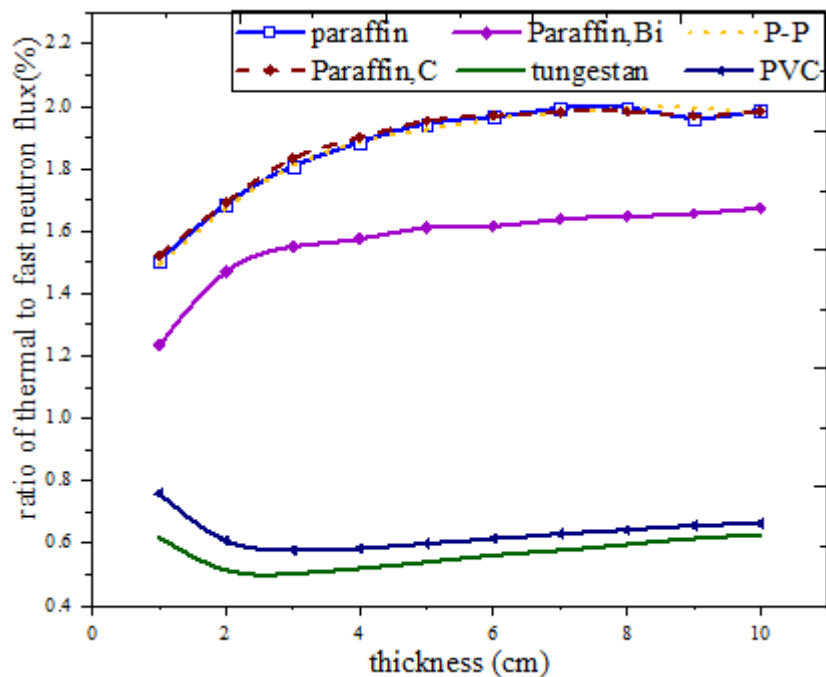


شکل ۳-۱۱. نمودار شار نوترون‌های سریع بر حسب ضخامت کند کننده‌ی لایه‌ی دوم.

برای تعیین ضخامت بهینه برای لایه دوم باید نمودار نسبت شار حرارتی به شار حرارتی به سریع را بر حسب افزایش ضخامت کند کننده‌ی لایه‌ی دوم که در شکل ۳-۱۲ و ۳-۱۳ نشان داده شده است رسم کرده و بیشینه مقدار را پیدا کنیم.



شکل ۳-۱۲. نمودار تعیین ضخامت بهینه برای لایه‌ی دوم کند کننده حفاظ با توجه به نسبت شار نوترون حرارتی به نوترون فوق حرارتی.



شکل ۳-۱۳. نمودار تعیین ضخامت بهینه برای لایه‌ی دوم کند کننده حفاظ با توجه به نسبت شار نوترون حرارتی به شار نوترون سریع.

با بررسی‌های انجام شده ماده‌ی پارافین با ۱۰٪ گرافیت با ضخامت ۶ سانتی‌متر را به عنوان استوانه‌ی لایه‌ی دوم پیشنهاد کردیم. به دلیل داشتن بیشترین شار نوترون حرارتی و کمینه شار نوترون فوق حرارتی و نوترون سریع این ماده انتخاب مناسبی است.

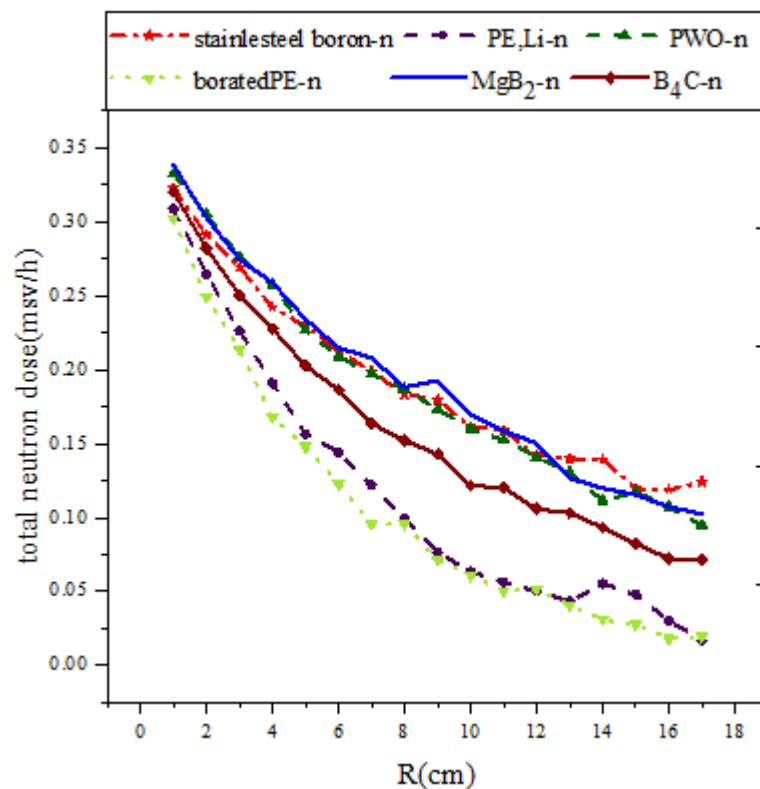
۳-۵-۵ انتخاب لایه‌ی سوم

لایه‌های استوانه‌ای بعدی را یک ماده‌ی جاذب نوترون حرارتی و ماده‌ی مناسب برای تضعیف کردن گاماها‌ی اولیه و گاماها‌ی ثانویه قرار می‌دهیم. به دلیل اینکه نوترون هنگام برهمکنش با موادی که دارای هیدروژن هستند گاما ساطع می‌کند، باید این گاما را هم علاوه بر گامای ناشی از خود چشمه در محاسبات دز، در نظر گرفت. برای این منظور مواد مختلف را که در جدول ۳-۲ آمده بررسی می‌کنیم.

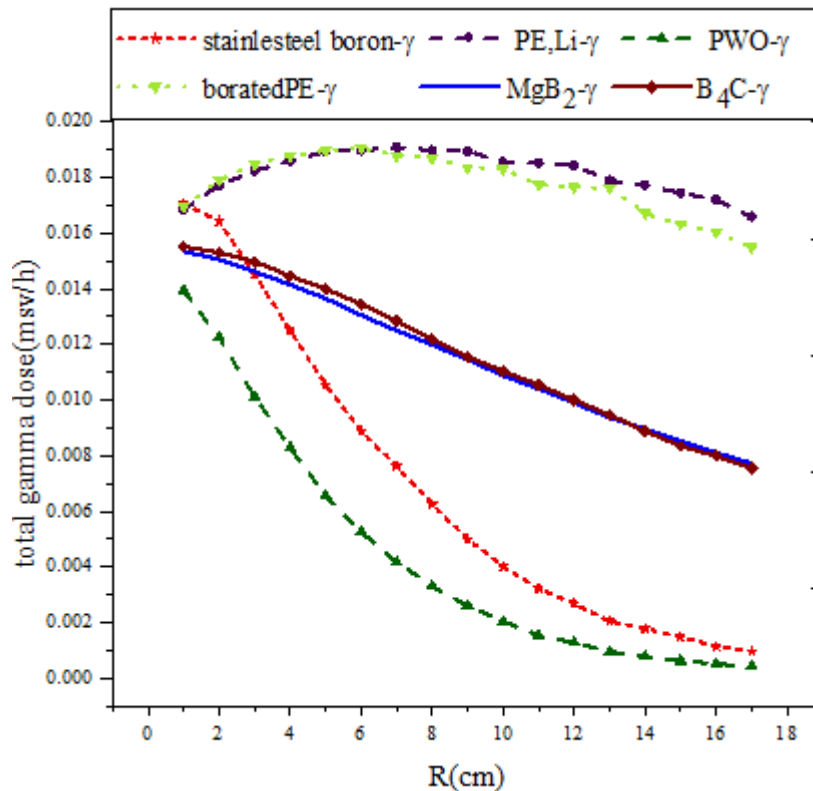
جدول ۳-۲. مواد و ترکیبات برای لایه‌ی سوم حفاظ.

Composition	مواد	چگالی (g/cm ³)
MgB ₂	منیزیم دی بوراید	۲/۵۷
B ₄ C	کاربید بور	۲/۵
CH ₂ , borated	پلی اتیلن بورات شده	۱
CH ₂ ,Li	پلی اتیلن حاوی ۱۰٪ Li	۰/۱۶۵
PbWO ₄	تنگستات سرب	۸/۲۴
Steel boron stainless	استیل ضد زنگ حاوی بورون	۷/۸۷

شکل ۳-۱۴ و شکل ۳-۱۵ به ترتیب میزان دز نوترون و گامای حاصل از چشمه را نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی دز با استفاده از ضرایب تبدیل شار به دز موجود در راهنمای کد و همچنین استفاده از تالی نقطه‌ای F5 و ضرایب DEn و DFن، در فاصله‌ی یک متری از چشمه میزان دز چشمه را محاسبه کرد. برای محاسبه‌ی دقیق دز چشمه، مقدار اکتیویته‌ی چشمه را با دستور Fm در مقادیر خروجی کد ضرب کردیم [۲۸]. با دقت در این نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که پلی‌اتیلن بورات شده و تنگستات سرب با ضخامت بهینه‌ی ۱۷cm برای لایه سوم مواد مناسب هستند.



شکل ۳-۱۴. نمودار دز نوترون حاصل از چشمه بر حسب ضخامت حفاظ.



شکل ۳-۱۵. نمودار دز گامای حاصل از چشمه بر حسب ضخامت حفاظ.

در نهایت، می‌خواهیم با در نظر گرفتن چیدمان‌های مختلف و بررسی نمودار آن به میزان دز نوترون و گامای کمتر برسیم. به این صورت که پنج چیدمان به صورت شکل ۳-۱۶ را در نظر گرفته و لایه‌ی جاذب و تضعیف‌کننده‌ی گاما را بر طبق آن چیدمان برای حفاظ قرار می‌دهیم. با توجه به نمودار شکل ۳-۱۷

پی می‌بریم که با استفاده از

پیکربندی شماره ۳ به کمترین دز

دست می‌یابیم.



(۱). ۸cm بورات پلی‌اتیلن، ۹cm تنگستات سرب.



(۲). ۴cm تنگستات سرب، ۹cm بورات پلی‌اتیلن، ۴cm تنگستات سرب.



(۳). ۱۴cm بورات پلی‌اتیلن، ۳cm تنگستات سرب.

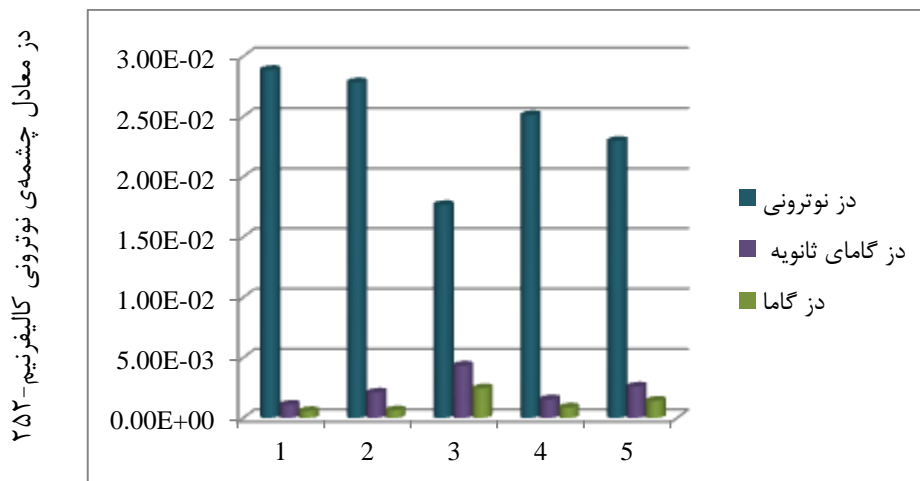


(۴). ۱۰cm بورات پلی‌اتیلن، ۷cm تنگستات سرب.



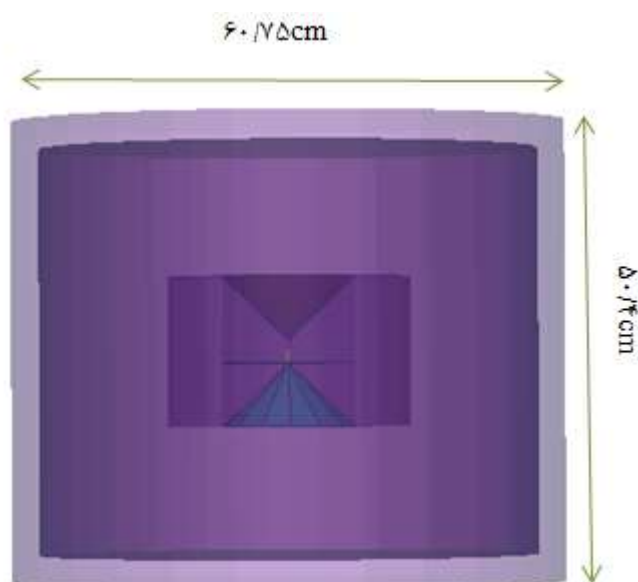
(۵). ۱۲cm بورات پلی‌اتیلن، ۵cm تنگستات سرب.

شکل ۳-۱۶. پنج ترکیب‌بندی مختلف برای تنگستات سرب و بورات پلی‌اتیلن.



شکل ۳-۱۷. نمودار دز برای چیدمان‌های متفاوت تنگستات سرب^{۲۶} و پلی اتیلن حاوی کاربید بور^{۲۷}

در این صورت حفاظ طراحی شده برای چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf به صورت استوانه‌هایی هم مرکز و لایه لایه مقرر شد. در هر لایه موادی با ویژگی‌های لازم با ضخامت‌های تعیین شده به ترتیب در لایه اول، پارافین با ضخامت ۷cm و لایه دوم، پارافین حاوی ۱۰ درصد گرافیت با ضخامت ۶cm و در لایه آخر دو ماده‌ی جاذب نوترون و گاما با ضخامت‌های ۱۴ cm و ۳cm حاوی بورات پلی اتیلن و تنگستات سرب طراحی شد که در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸. ساختار پیش‌بینی شده برای حفاظ چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf .

۲۶. steel boron

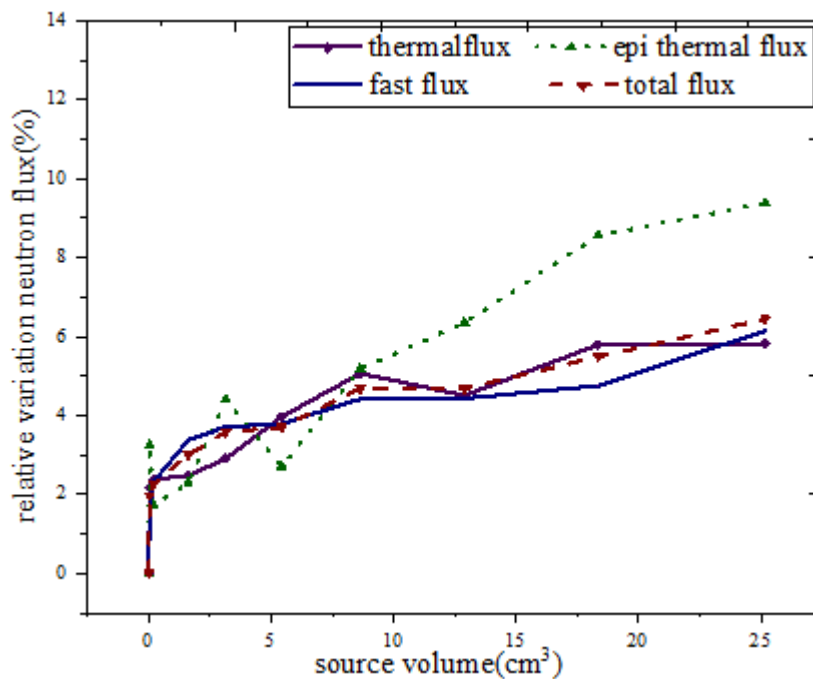
۲۷. polyethylene borated

در ادامه به بررسی چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ و پارامترهایی همچون شار و دز خروجی چشمه در محیط بیرون با در نظر گرفتن ابعاد مختلف چشمه، می‌پردازیم.

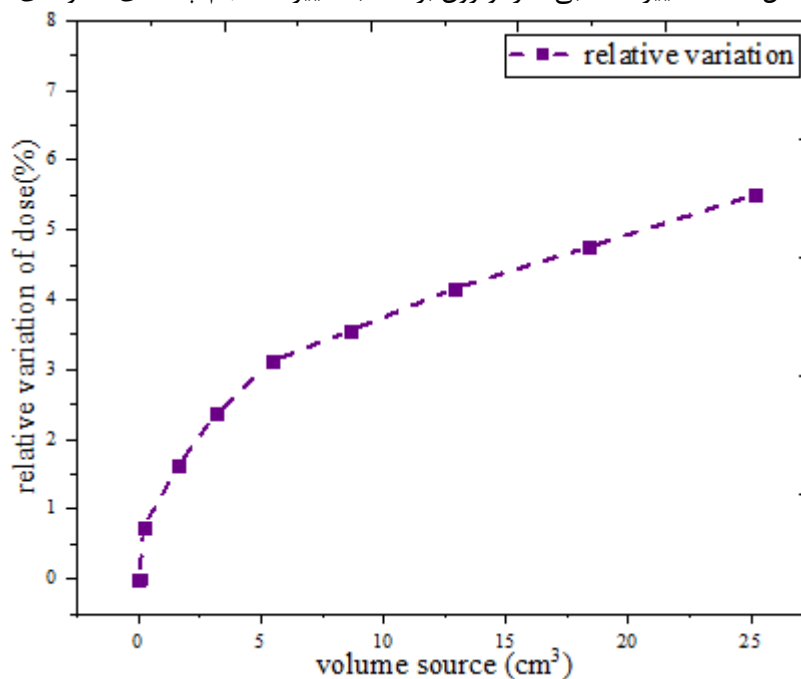
۳-۶ بررسی اثر ابعاد چشمه آمرسیوم- برلیوم بر روی شار و دز خروجی

به منظور حصول نتایج دقیق‌تر در محاسبه شار و دز حاصل از ترابرد ذرات در چشمه‌های هسته‌ای، در نظر گرفتن ابعاد واقعی هندسه چشمه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. اهمیت این موضوع را می‌توان در کاربردهای مختلف چشمه‌های نوترونی در زمینه‌های کاربردی همچون: NAA, PGNAA و NCT از لحاظ شار و دز خروجی و البته از دیدگاه حفاظت‌سازی آنها دانست. به منظور شبیه‌سازی چشمه‌ی آمرسیوم- برلیوم نیز یکبار چشمه را به صورت چشمه‌ی نوترونی و بار دیگر به صورت گامایی در نظر گرفتیم و مقادیر دز نوترون و گاما را به صورت جداگانه محاسبه کردیم و حاصل مجموع دز نوترون و گاما، میزان دز چشمه را به نتیجه می‌دهد. در این تحقیق، اثر ابعاد چشمه نوترونی نوعی $^{241}\text{Am-Be}$ با وجود حفاظ کروی بر روی پارامترهای خروجی شار و دز با کد محاسباتی و ترابرد ذرات MCNPX مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور در ابتدا چشمه را به صورت نقطه‌ای در نظر گرفته و تغییرات شار نوترونی و دز حاصل از چشمه‌ی استوانه‌ای با ابعاد مختلف نسبت به چشمه‌ی نقطه‌ای، محاسبه گردید. به‌منظور شبیه‌سازی و محاسبات مربوط به تعیین شار و دز خروجی، از کد MCNPX و به‌ترتیب: از تالی F2 و ضرایب تبدیل شار به دز استفاده شده‌است [۲۸]. در این بخش نیز همانطور که در بخش ۳-۵ ذکر شد، برای شبیه‌سازی چشمه و بررسی نمودارهای شار و دز، چشمه را در دو حالت نوترونی و فوتونی در نظر گرفتیم. همچنین انرژی نوترون‌های حرارتی در محدوده‌ی صفر تا $0.5 \times 10^{-6} \text{ MeV}$ ، انرژی فوق حرارتی در محدوده‌ی 0.1 MeV - 0.5×10^{-6} و سریع حدود 0.1 MeV تا 11 MeV لحاظ شده‌است [۲۹]. تغییرات نسبی شار و دز نوترون‌ها در سه بازه حرارتی، فوق حرارتی، سریع و همچنین شار و دز کل نوترون‌ها بر حسب تغییر حجم چشمه‌ی استوانه‌ای در شکل‌های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۳-۱۹ ملاحظه می‌شود با افزایش حجم چشمه‌ی استوانه‌ای تا رسیدن به ابعاد واقعی این تغییرات نسبی افزایش می‌یابد. این

تغییرات در مقدار شار تا ۶/۴۴٪ از چشمه نقطه‌ای تا استوانه‌ای می‌باشد. همچنین با ملاحظه‌ی شکل ۳-۲۰ مشاهده می‌شود که تفاوت ناشی از تغییر ابعاد چشمه، در مقدار دز کل نوترون به حدود ۵/۵٪ رسیده است.



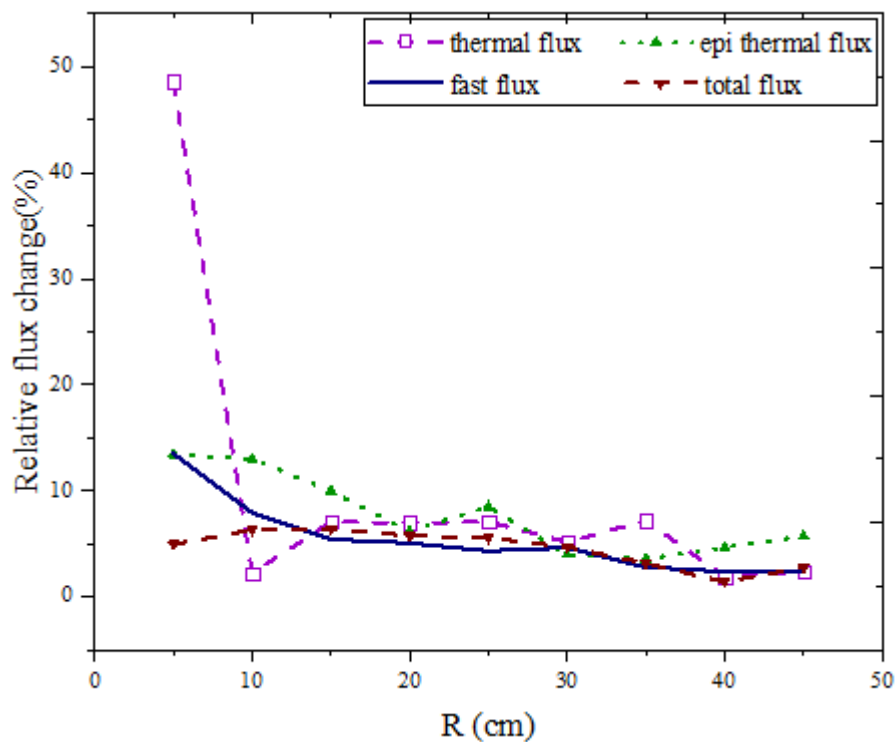
شکل ۳-۱۹. تغییرات نسبی شار نوترون بر حسب تغییرات حجم چشمه‌ی استوانه‌ای.



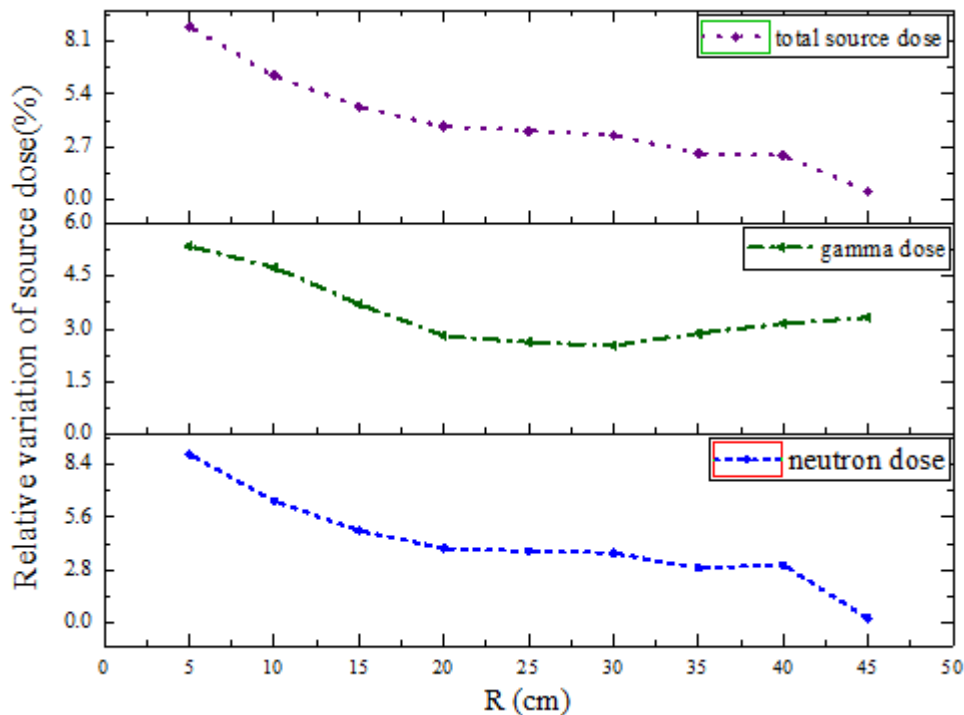
شکل ۳-۲۰. تغییرات نسبی دز چشمه نوترونی بر حسب تغییرات حجم چشمه.

۷-۳ بررسی اثر تغییرات شعاع حفاظ بر روی نوع چشمه

در اینجا به بررسی اثر تغییرات شعاع حفاظ بر روی شار و دز خروجی چشمه می‌پردازیم. شکل‌های ۲۱-۳ و ۲۲-۳ به ترتیب تغییرات نسبی شار و دز خروجی نوترون بر حسب شعاع حفاظ کروی از شعاع ۵ تا ۴۵ سانتی‌متری را نشان می‌دهند. تفاوت نسبی شار و دز چشمه‌ی آلفا-بریلیوم مورد بررسی، در حالت استوانه‌ای با نقطه‌ای با تغییر ابعاد حفاظ کاهش می‌یابد و این کمیت‌ها به ترتیب، از حدود ۳-۵٪ و ۹-۱۵٪ می‌باشد. البته باید به این نکته دقت کرد که علت این تفاوت به دلیل کوچک شدن زاویه‌ی فضایی دید چشمه با افزایش فاصله است. چنانچه به چشمه نزدیک شویم این مقدار خیلی افزایش پیدا کرده و این تغییرات برای شار گرمایی نوترون به حدود ۴۸٪ می‌رسد.



شکل ۲۱-۳. تغییرات نسبی شار نوترون بر حسب شعاع حفاظ کروی.



شکل ۳-۲۲. تغییرات دز نوترون و گامای چشمه بر حسب تغییرات شعاع حفاظ کروی.

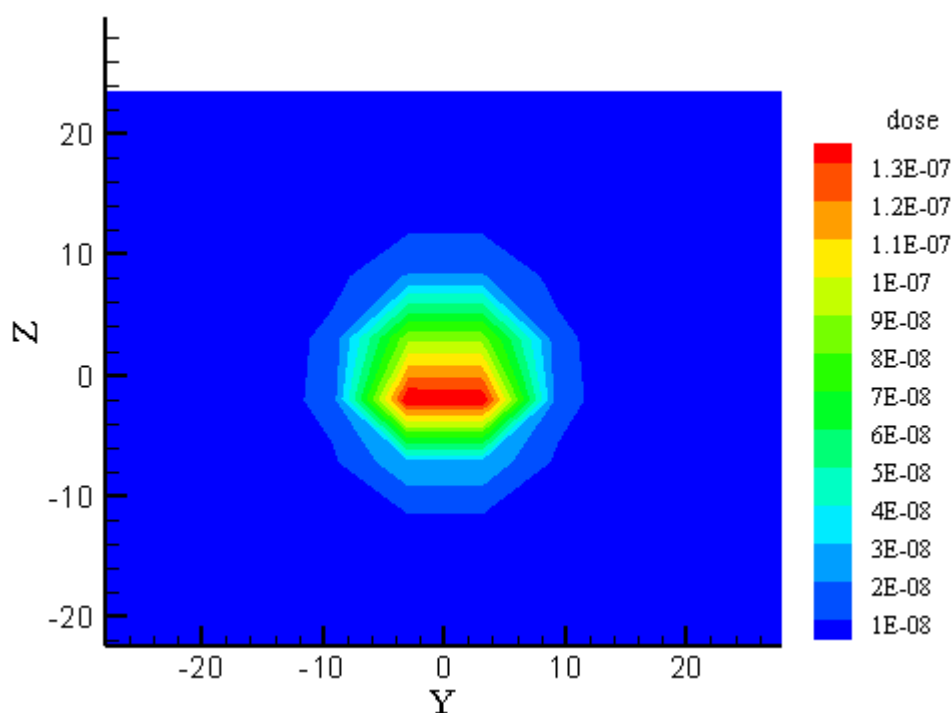
۳-۸ مقایسه دز حاصل از چشمه‌ی کالیفرنیم و آمرسیوم-بریلیوم

در این بخش به مقایسه شبیه‌سازی‌های انجام شده برای دو چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf و Am-Be پرداخته‌ایم. به منظور شبیه‌سازی چشمه مطالب گفته‌شده در بخش ۳-۶ ملاحظه‌شده است و با توجه به بررسی ابعاد بر روی نتایج شار و دز خروجی از چشمه با ابعاد واقعی استفاده شده است. چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ مورد بررسی در شبیه‌سازی‌ها دارای اکتیویته‌ی ۲۰ کوری می‌باشد که منجر به نشر $4/4 \times 10^7 \text{ n/s}$ و نشر گامای $2/6 \times 10^7 \text{ } \gamma/\text{s}$ می‌شود. به منظور مقایسه‌ی دز حاصل از چشمه‌ها بعد از استفاده از حفاظ طراحی شده، جدول ۳-۳ تنظیم شده‌است.

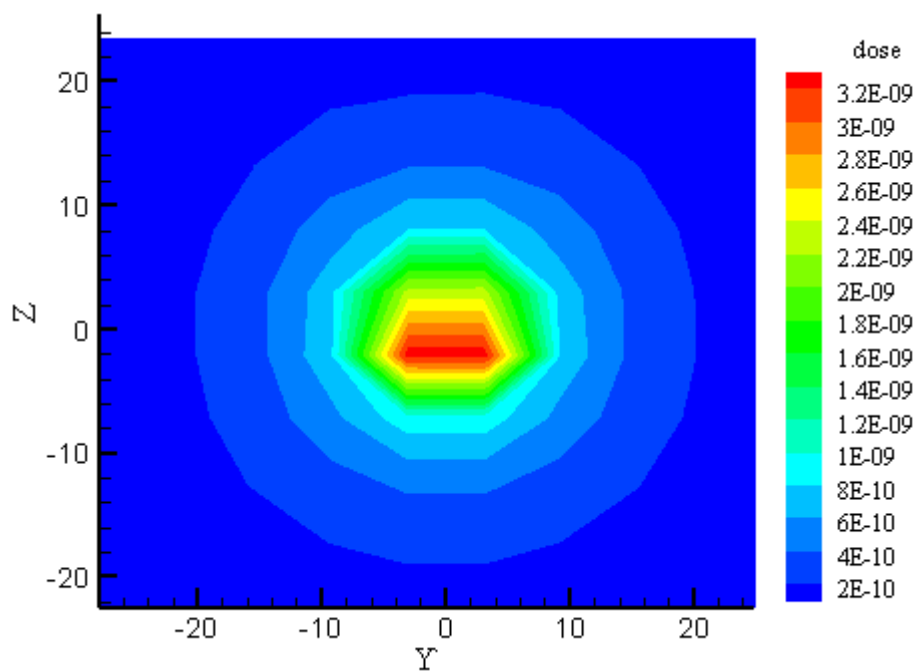
جدول ۳-۳. مقایسه دز چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ و آمرسیوم-بریلیوم ۲۴۱.

چشمه‌ی مورد بررسی	اکتیویته	دز نوترون (mSv/h)	دز گاما (mSv/h)	دز کل چشمه (mSv/h)
کالیفرنیم-۲۵۲	۰/۰۲۷ Ci	۰/۰۱۷۶	۰/۰۰۶۷	۰/۰۲۴۳
آمرسیوم-بریلیوم ۲۴۱	۲۰ Ci	۰/۰۲۷۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲۸

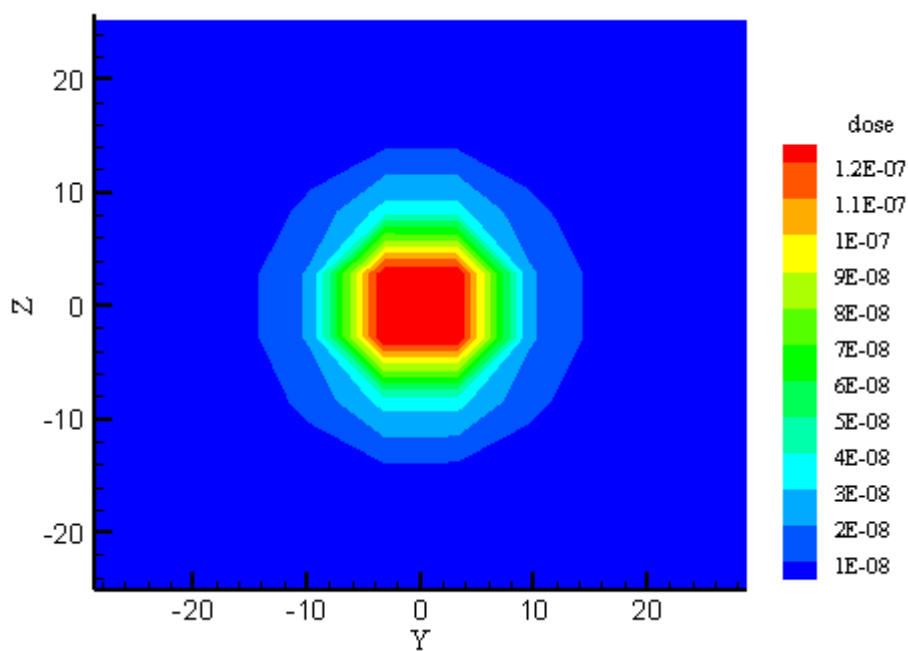
در ادامه به منظور مقایسه‌ی بهتر دز حاصل از چشمه‌های نوترونی ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ به ترسیم نمودارهای دو بعدی دز نوترون و گاما به طور جداگانه پرداختیم، که نمودارهای ۳-۲۳ تا ۳-۲۶ به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی میزان دز نوترون و دز گامای حاصل از چشمه‌های نوترونی ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ می‌باشند. در شبیه‌سازی انجام شده، محورهای YZ تقسیم‌بندی شده و محور X را ثابت در نظر گرفتیم. همانطور که در نمودارها دیده می‌شود رنگ قرمز نشان‌دهنده‌ی بیشینه دز چشمه و رنگ آبی کمینه دز را نشان می‌دهد. بنابراین، با دقت در نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که هر چه شعاع حفاظ چشمه‌ها بیش‌تر می‌شود، دز نوترون و دز گامای چشمه‌ها نیز کاهش یافته است.



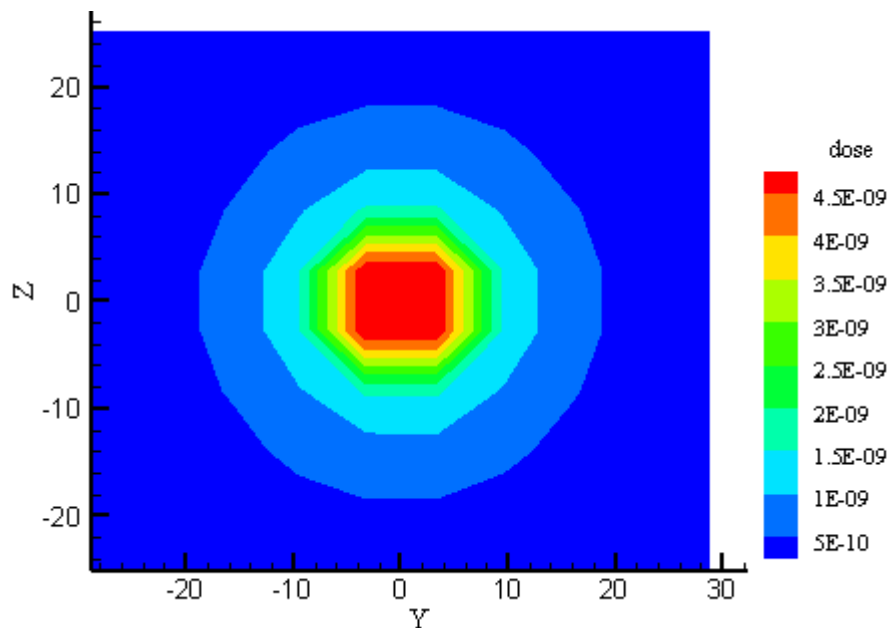
نمودار ۳-۲۳. نمودار دز نوترون و گامای ثانویه چشمه کالیفرنیم-۲۵۲.



شکل ۳-۲۴. نمودار دز گامای مستقیم ناشی از چشمه کالیفرنیم-۲۵۲.



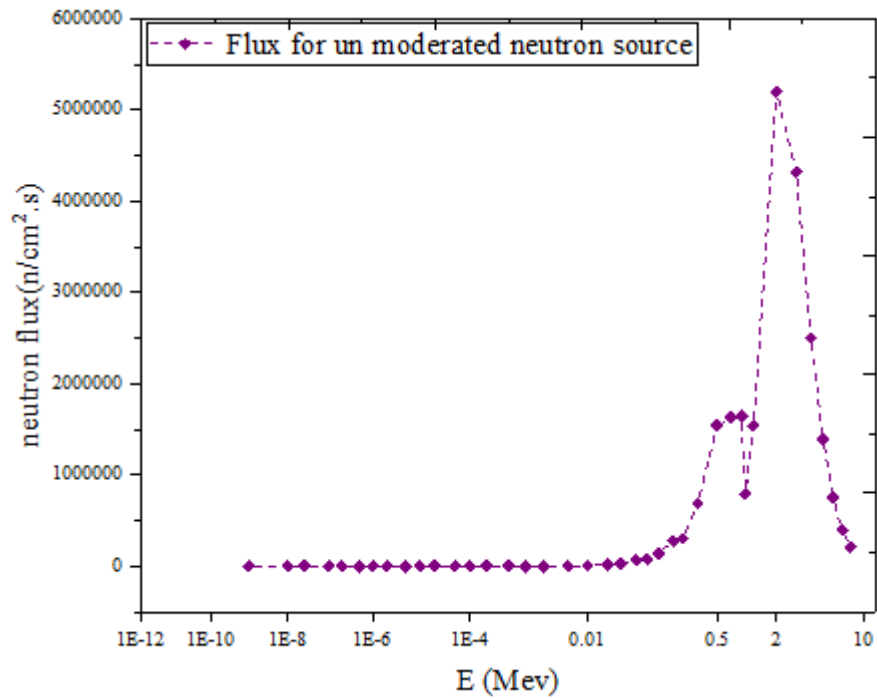
شکل ۳-۲۵. نمودار دز نوترونی و گامایی برای چشمه آمرسیوم-بریلیوم-۲۴۱



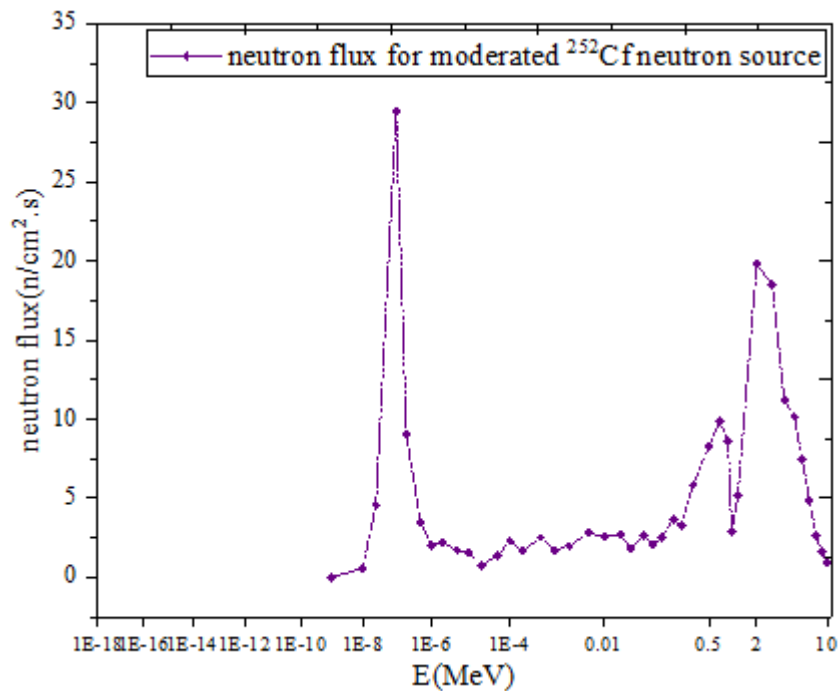
شکل ۳-۲۶. نمودار دز گاما برای چشمه‌ی آمرسیوم-بریلیوم ^{241}Am .

۳-۹ مقایسه شار نوترونی حاصل از چشمه‌ی کالیفرنیم و آمرسیوم-بریلیوم

به منظور مقایسه‌ی شار نوترونی حاصل از دو چشمه‌ی مورد مطالعه نمودار شار نوترونی چشمه بر حسب انرژی را بررسی می‌کنیم. نمودارهای ۳-۲۷ تا ۳-۳۰ به ترتیب نمایانگر شارنوترونی حاصل از چشمه‌های نوترونی ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ ، با و بدون حفاظ می‌باشد. شکل ۳-۲۷ نشان می‌دهد که در محدوده‌ی انرژی‌های حرارتی تا فوق حرارتی شار نوترونی چشمه‌ی ^{252}Cf تقریباً نزدیک به صفر است و چشمه دارای نوترون‌های سریع به میزان تقریبی $5.0 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ می‌باشد و از توزیع ماکسولی پیروی می‌کند. در نمودار ۳-۲۸ نیز شار نوترونی بر حسب انرژی نوترون‌های حاصل از چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf می‌باشد که در اینجا دیده می‌شود که شار نوترون زمانی که چشمه تحت حفاظت قرار می‌گیرد بیشتر در محدوده‌ی انرژی‌های حرارتی قرار دارد که این به معنای بیشتر بودن تعداد نوترون‌ها با انرژی‌های زیر 0.05 eV است.

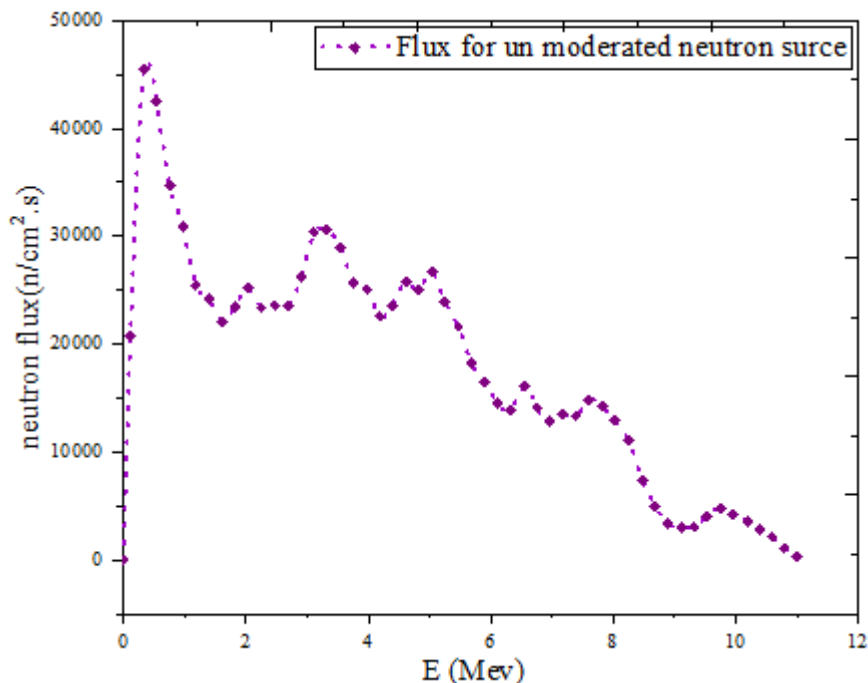


شکل ۳-۲۷. نمودار شار نوترونی بر حسب انرژی برای چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ بدون حفاظ.

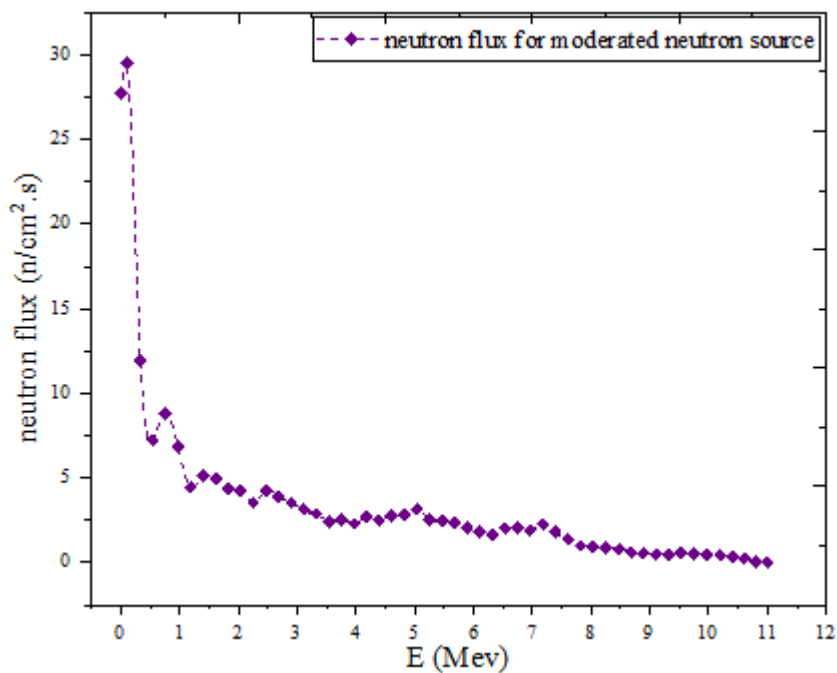


شکل ۳-۲۸. نمودار شار نوترون بر حسب انرژی برای چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ با حفاظ طراحی شده. در شکل ۳-۲۹ نیز شار نوترونی چشمه بر حسب انرژی نوترون برای چشمه‌ی نوترونی $^{241}Am-Be$ بدون حفاظ می‌باشد. در اینجا می‌بینیم که نمودار مشابه نمودار طیف نوترون چشمه‌ی $^{241}Am-Be$ است. در نمودار شکل آخر نیز شار خروجی نوترون بر حسب انرژی نوترون برای همان چشمه‌ی $^{241}Am-Be$ با حفاظ طراحی شده می‌باشد. با دقت در نمودار متوجه می‌شویم که میزان نوترون‌ها در

محدوده‌ی انرژی‌های فوق حرارتی و سریع نسبت به زمانی که حفاظی وجود ندارد بسیار کاهش داشته‌است و تقریباً فقط دارای شار حرارتی نوترونی می‌باشیم که از لحاظ حفاظت در برابر اشعه مورد قبول است.



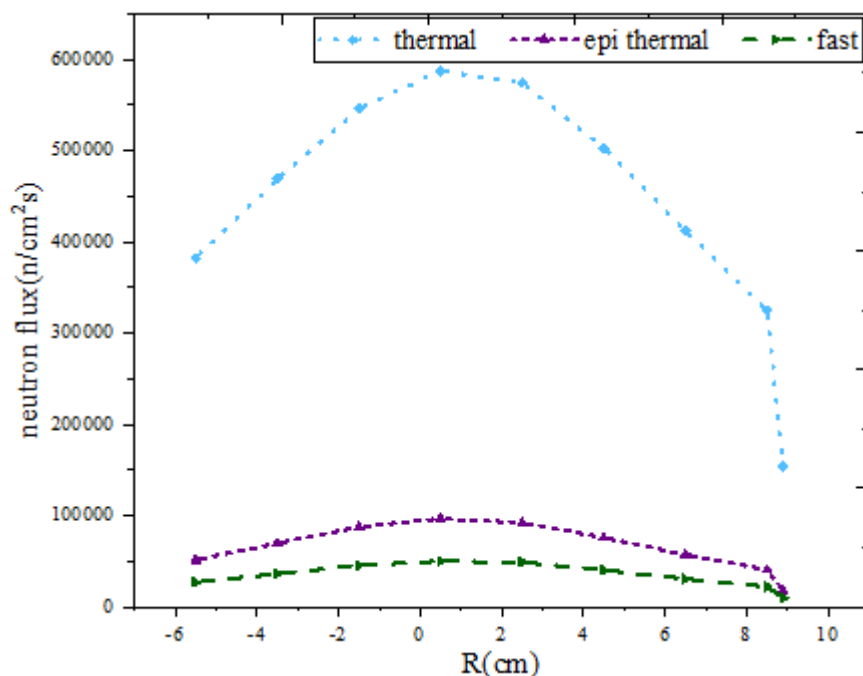
شکل ۳-۲۹. نمودار شار نوترون بر حسب انرژی برای چشمه‌ی نوترونی آمرسیوم-بریلیوم ۲۴۱ بدون حفاظ.



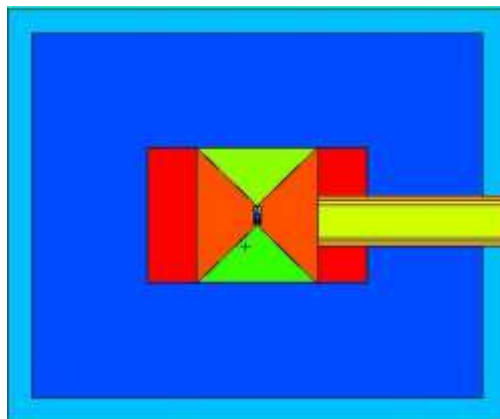
شکل ۳-۳۰. نمودار شار نوترون بر حسب انرژی برای چشمه‌ی نوترونی آمرسیوم-بریلیوم ۲۴۱ در حضور حفاظ.

۳-۱۰ بررسی توزیع شار نوترون چشمه‌ی کالیفرنیم-۲۵۲ در کانال حرارتی

با توجه به اینکه در حفاظ از مواد مختلفی استفاده شده است، به منظور بیشینه کردن شار نوترون حرارتی در کانال تعبیه شده برای استفاده در NAA، محل قرارگیری کانال با تقسیم‌بندی عرضی لایه‌ی دوم کندکننده از انتهای پایین تا بالای آن و در نظر گرفتن ۹۰ درصد بیشینه‌ی شار نوترون حرارتی، همانطور که در نمودار شکل ۳-۳۱ قابل مشاهده است، تعیین کردیم. همچنین، به منظور بهینه‌کردن در راستای بیشینه کردن شار نوترون حرارتی از موادی همچون گرافیت و پلی‌اتیلن حاوی ۱۰ درصد گرافیت با ضخامت‌های ۰/۵ سانتی‌متری در کانال تعبیه شده استفاده شد.



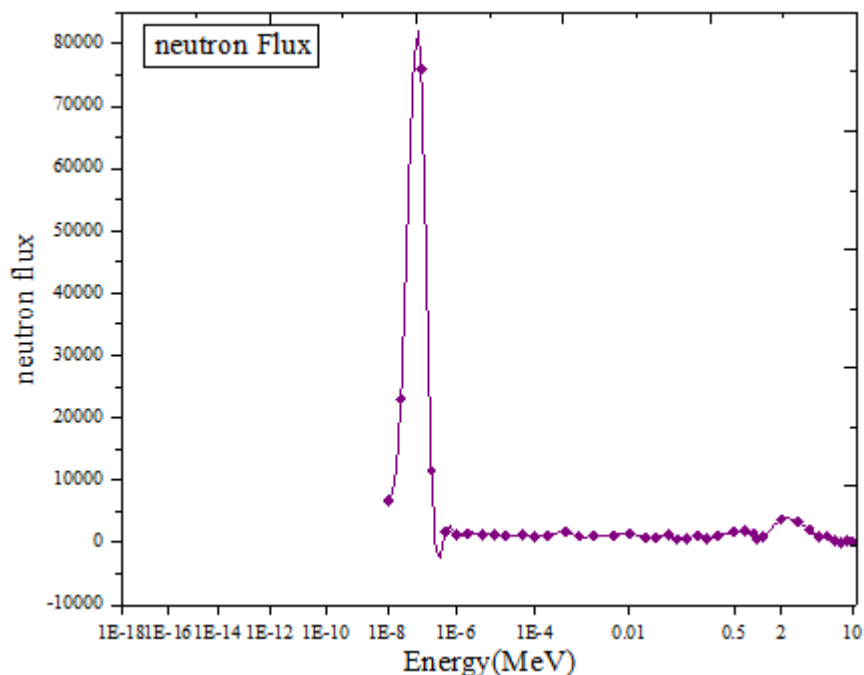
شکل ۳-۳۱. نمودار تعیین کننده‌ی کانال تابشی نوترون حرارتی.



شکل ۳-۳۲. پیکربندی حفاظ همراه با کانال تابشی نوترون حرارتی.

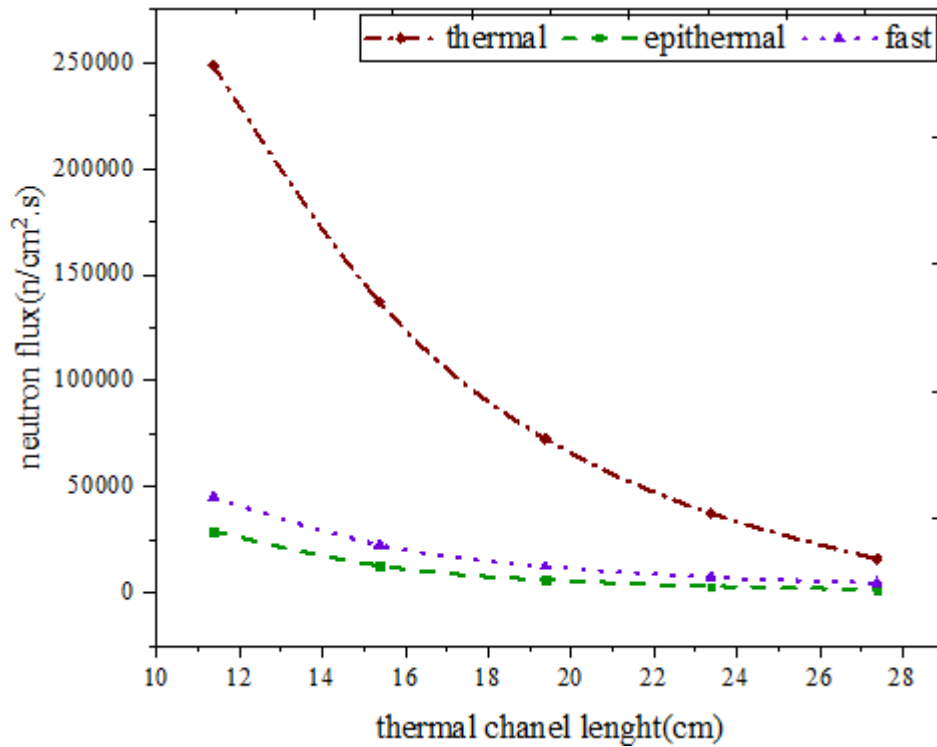
پیکربندی نهایی برای کانال تابشی نوترون حرارتی به صورت شکل ۳-۳۲ نشان داده شده است.

همچنین با بررسی نمودار شکل ۳-۳۳ که محور افقی انرژی مربوط به طیف انرژی چشمه ^{252}Cf و محور عمودی نشان دهنده شار نوترونی چشمه می‌باشد، می‌توان مشاهده کرد که در حجم کانال تعبیه شده به منظور استفاده در NAA شار نوترون‌های فوق حرارتی و سریع بسیار کاهش داشته‌است.



شکل ۳-۳۳. نمودار شار نوترونی چشمه کالیفرنیم- ^{252}Cf بر حسب انرژی.

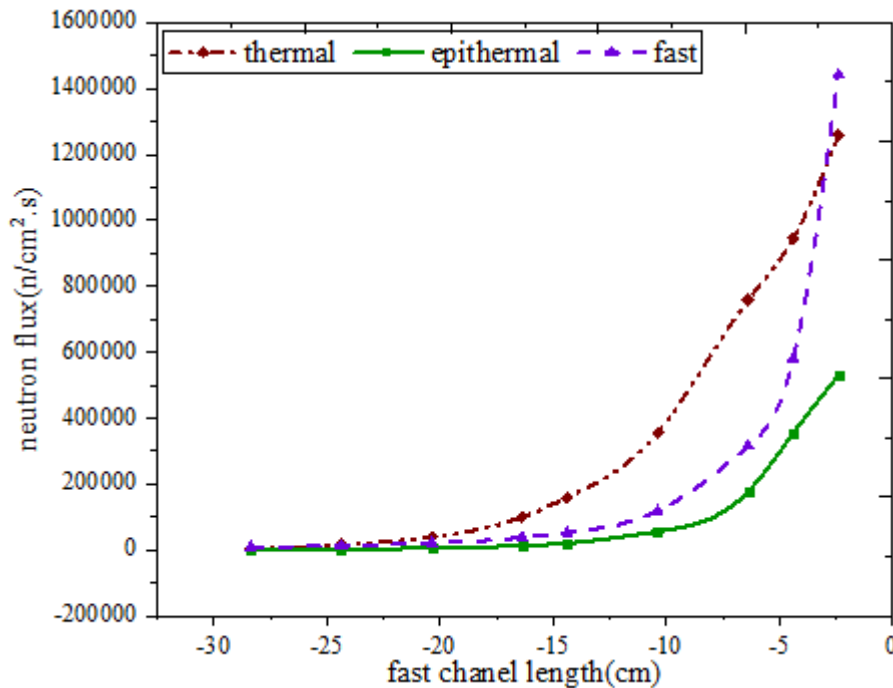
در نمودار شکل ۳-۳۴ نیز شار نوترون حرارتی در بخش‌هایی از طول کانال بدست آمده‌است. محور افقی نمودار نشان دهنده طول کانال (از ابتدا تا انتها) بر حسب سانتی‌متر و محور عمودی شار نوترونی چشمه می‌باشد. همانطور که واضح است سه توزیع شار نوترونی (نوترون حرارتی، فوق حرارتی و سریع) را می‌بینیم، که توزیع شار نوترون حرارتی در ابتدای کانال از مرتبه $10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ است و در انتهای کانال این مقدار به مرتبه $10^3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ می‌رسد.



شکل ۳-۳۴. نمودار توزیع شار نوترونی در بخش‌های مختلفی از کانال

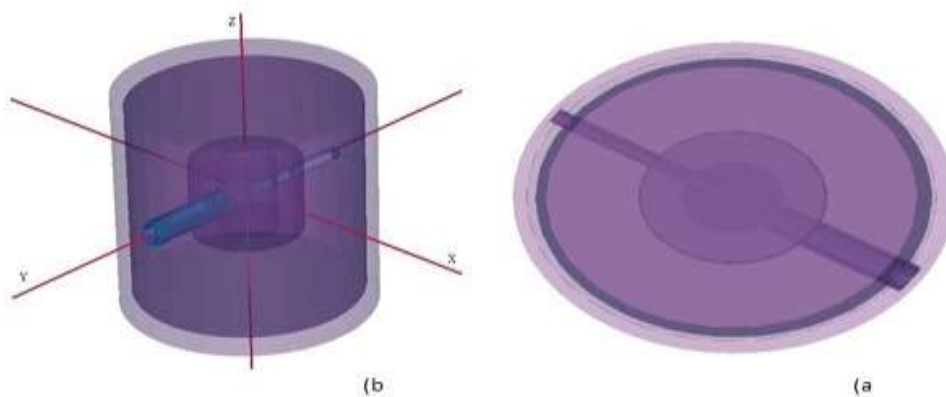
۳-۱۱ بررسی کانال شبیه‌سازی شده برای استفاده نوترون سریع چشمه

در این بخش برای طراحی کانال سریع، دهانه‌ی ابتدایی کانال را مستقیماً از چشمه در نظر گرفتیم و طول آن تا انتهای حفاظ در نظر گرفته شده‌است. در این بخش، به منظور کاهش شار نوترون حرارتی و افزایش شار نوترون سریع از یک سانتی‌متر بورات پلی‌اتیلن به دلیل داشتن مقطع جذب بالای نوترون حرارتی، در ابتدای دهانه‌ی کانال استفاده شد. همچنین کانال را با ۰/۵ سانتی‌متر از ماده‌ی بورات پلی‌اتیلن نیز پوشش دادیم. به‌منظور بررسی پروفایل باریکه‌ی نوترون سریع تعبیه‌شده نیز به محاسبه‌ی شار نوترون سریع در بخش‌های مختلف کانال پرداختیم و نموداری به‌صورت ۳-۳۵ بدست آمد.



شکل ۳-۳۵. نمودار توزیع شار نوترونی در بخش‌های مختلفی از حجم کانال.

در انتها نمایی دو بعدی از ساختار طراحی شده‌ی حفاظ همراه با کانال‌های نوترون حرارتی و نوترون سریع که به صورت شکل ۳-۳۶ می‌باشد نشان داده شده است. پیکربندی نهایی از چند لایه‌ی استوانه‌ی که هم‌مرکز با چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf می‌باشند، تشکیل شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، لایه‌ی اول از پارافین با ضخامت ۷ سانتی‌متر، که در آن از بازتابنده‌ی بریلیومی با شکل هندسی مخروطی می‌باشد، استفاده شد. لایه‌ی دوم را پارافین حاوی ۱۰ درصد گرافیت با ضخامت ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در لایه‌ی آخر که جاذب نوترون حرارتی و پرتوهای گاما می‌باشد، از دو ماده‌ی بورات پلی‌اتیلن و تنگستات سرب به ترتیب با ضخامت ۱۴ و ۳ سانتی متری انتخاب شد.



شکل ۳-۳۶. نمای دو بعدی حفاظ طراحی شده همراه با کانال‌های تابشی. (a) نمای بالایی حفاظ همراه با کانال‌های حرارتی و سریع؛ (b) نمای جانبی.

فصل چہارم

بحث و نتیجہ گیری

۴-۱ مقدمه

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در فصول قبل، از قبیل: شبیه‌سازی چشمه‌ها، با در نظر گرفتن شرایطی تقریباً نزدیک به شرایط واقعی، همچون در نظر گرفتن ابعاد چشمه‌های نوترونی، طریقه‌ی قرارگیری لایه‌های حفاظ طراحی شده به منظور هرچه بهینه کردن آن، در این بخش از پایان‌نامه به تحلیل و جمع‌بندی نتایج به‌دست آمد از شبیه‌سازی‌ها خواهیم پرداخت.

۴-۲ بحث و نتیجه‌گیری

چشمه‌های نوترونی یکی از پرکاربردترین چشمه‌های هسته‌ای هستند. با توجه به داشتن طیف‌های مختلف این چشمه‌ها، نیازمند دقت لازم برای طراحی حفاظی مناسب می‌باشیم که در اینجا در ابتدا با در نظر گرفتن چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲، به طراحی حفاظی مناسب این چشمه، از لحاظ انتخاب پیکربندی مناسب، مواد مناسب با ویژگی‌های مناسب و ... به منظور رسیدن به حجم و وزن کم و قرار گرفتن تحت حد مجاز تابش پرداختیم. برای طراحی حفاظ به منظور بهینه کردن تا حد امکان آن، از هندسه‌ی لایه‌لایه‌ای که دارای موادی همچون کندکننده، بازتابنده، جاذب نوترون و گاما بود، استفاده شد تا از میزان شار نوترون‌های سریع کاسته و در نهایت مقدار دز تحت مقدار مجاز که 0.25 msv/h می‌باشد، دست یابیم.

در این راستا از پارافین و پارافین حاوی ۱۰ درصد گرافیت به عنوان لایه اول و دوم کند کننده به ترتیب با ضخامت ۷cm و ۶cm استفاده شد. زیرا این مواد دارای سطح مقطع پراکندگی بالایی در ناحیه‌ی نوترون‌های سریع می‌باشند. به منظور افزایش شار نوترون‌های حرارتی و کاهش میزان نوترون‌های سریع از بریلیوم به عنوان بازتابنده در لایه‌ی اول پیکربندی نیز استفاده گردید. لایه سوم حفاظ چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf از بورات پلی‌اتیلن به دلیل داشتن سطح مقطع جذب بالا برای نوترون‌های حرارتی و تنگستات سرب به دلیل داشتن سطح مقطع پراکندگی غیر الاستیک بالا به ترتیب: به منظور تضعیف نوترون‌های حرارتی و پرتوهای گاما، در نهایت برای جلوگیری از خروج آن‌ها به داخل محیط پیرامون استفاده شدند که به ترتیب دارای ضخامت‌های ۱۴cm و ۳cm می‌باشند.

حفاظ طراحی شده از لحاظ وزنی و حجمی نیز به ترتیب دارای کاهش ۸۹٪ حجم و ۵۸٪ وزن نسبت به کارهای طراحی شده‌ی قدیمی می‌باشد.

در راستای مقایسه دو چشمه‌ی نوترونی مورد بحث در این تحقیق یعنی چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ ، ابتدا به بررسی ابعاد چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ پرداختیم و اثر ناشی از ابعاد متفاوت با ابعاد واقعی چشمه را بر روی نتایج شار و دز خروجی چشمه نیز بررسی کردیم. در نهایت با در نظر گرفتن ابعادی نزدیک به ابعاد واقعی چشمه‌ی مورد بحث به محاسبه‌ی شار و دز خروجی حاصل از چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ با استفاده از حفاظ طراحی شده برای چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf پرداختیم.

در بخش پایانی نیز به طراحی کانال‌های تابشی به منظور استفاده از آن‌ها در راستای کاربردی برای جمع کردن شار نوترون حرارتی بالا برای استفاده در NAA و کانال تابشی برای گردآوری نوترون سریع پرداختیم.

برای تکمیل مطالعات صورت گرفته در این پایان نامه انجام موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

۳-۴ پیشنهادات

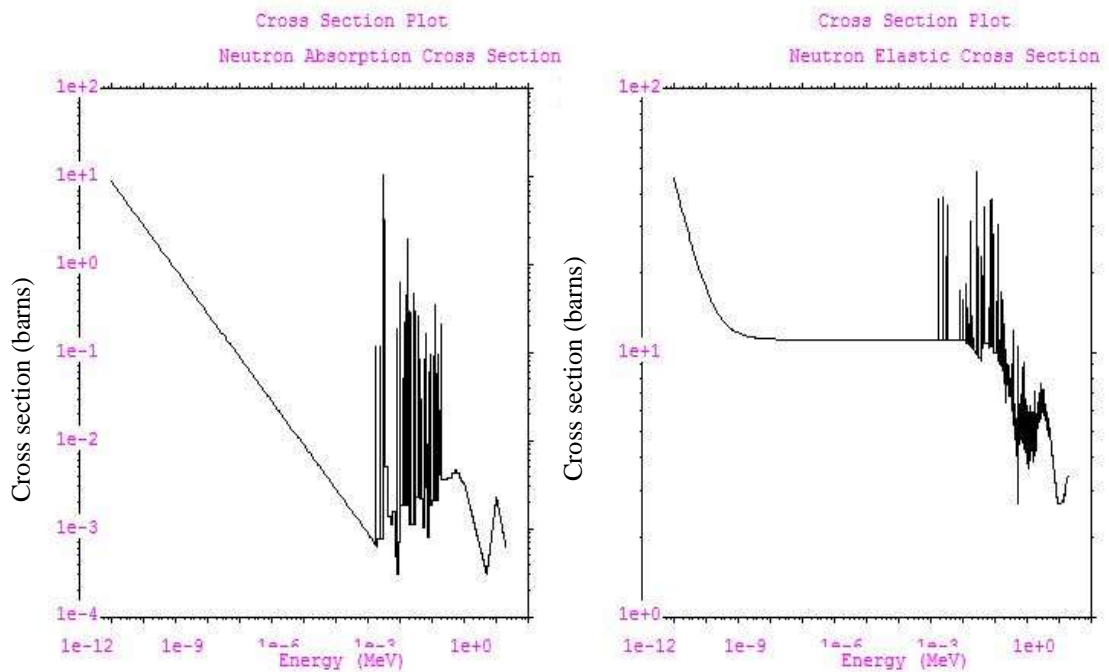
- ۱- در نظر گرفتن چند چشمه‌ی نوترونی و طراحی حفاظ و کانال‌های تابشی با ویژگی‌های مختلف به منظور استفاده در تسهیلات درمانی.
- ۲- طراحی حفاظی همگن حاوی نانو کامپوزیت‌های پلیمری.
- ۳- ساخت حفاظ پیشنهادی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج عملی.

پیوست ۱: (نمودار سطح مقطع مواد مختلف تست شده برای بازتابنده)

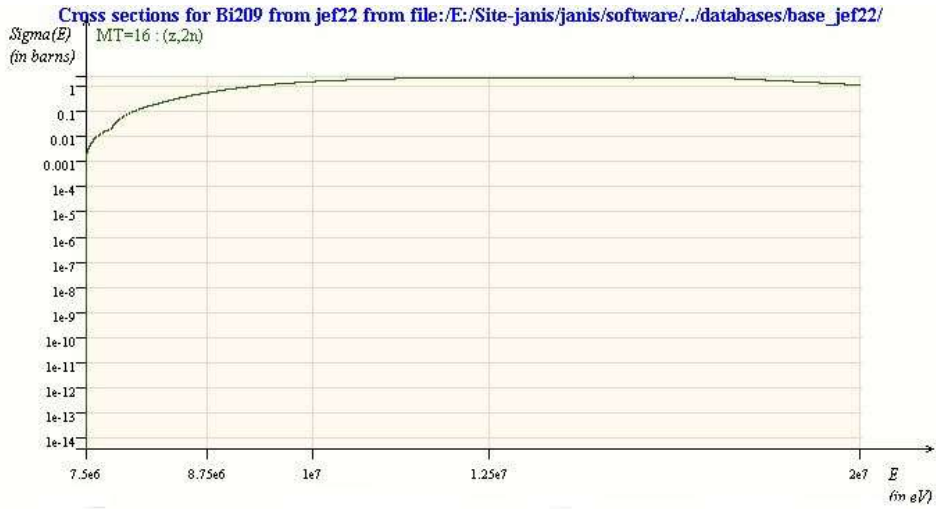
سرب



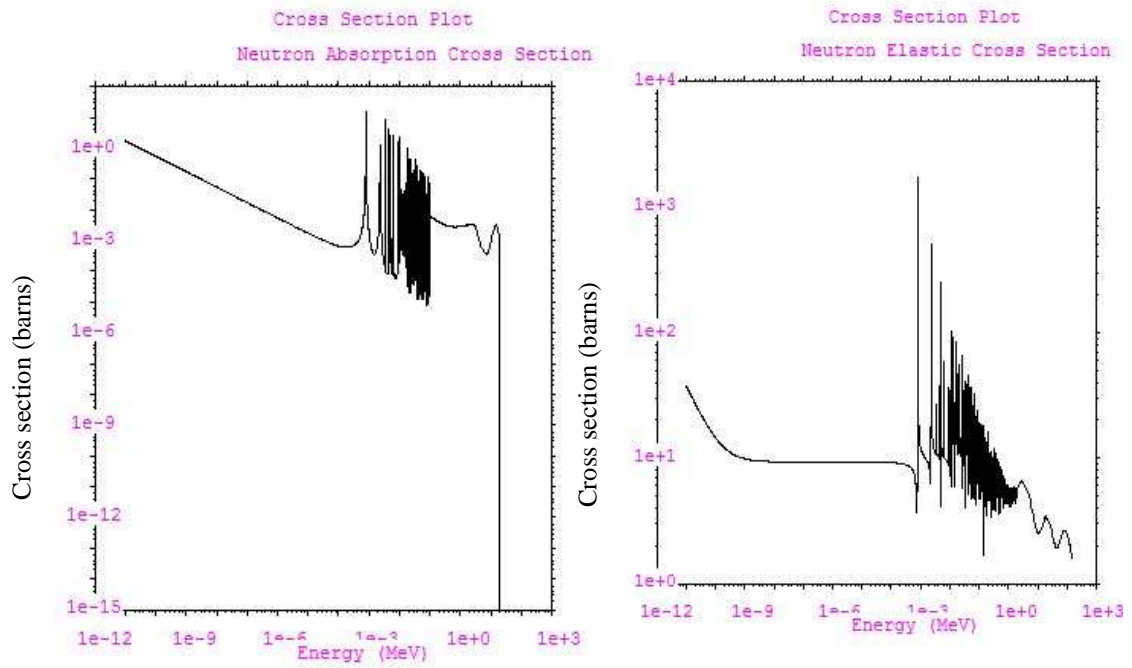
شکل ۱. سطح مقطع واکنش (n,2n) برای نوترون‌های چشمه.



شکل ۲. سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع. شکل ۳. سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



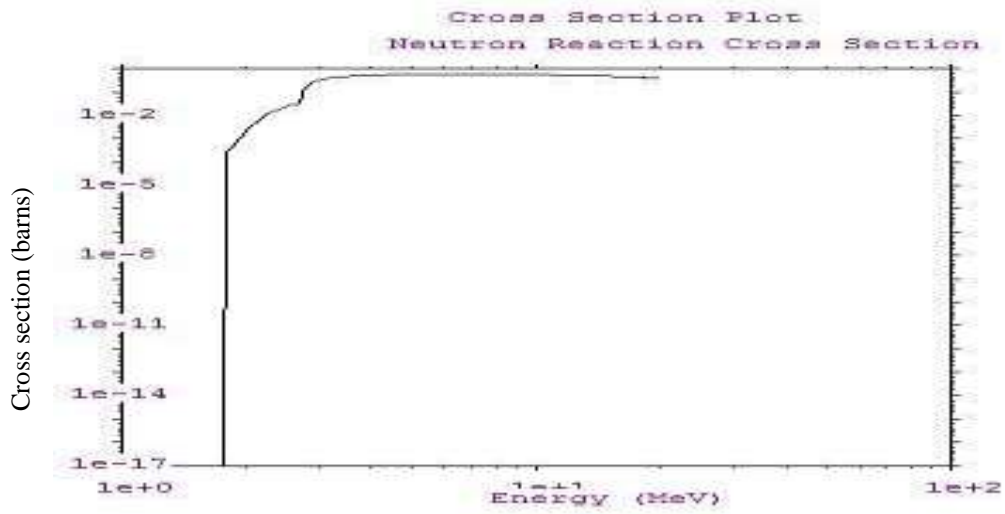
شکل ۴. سطح مقطع واکنش (n,2n) برای نوترون‌های چشمه.



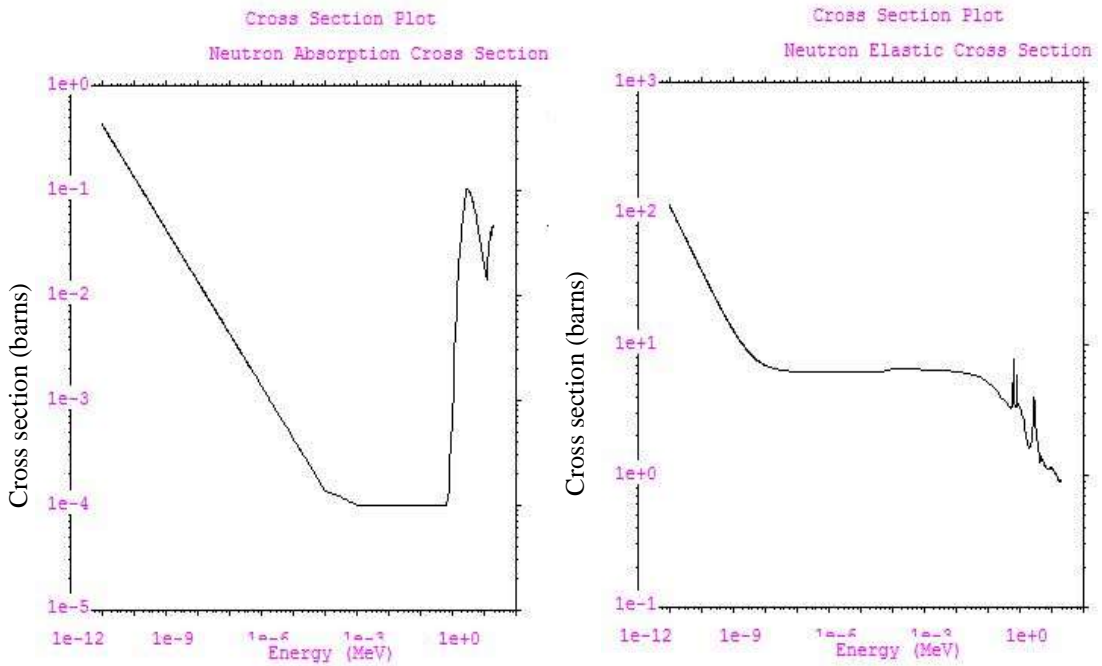
شکل ۶. سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.

شکل ۵. سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.

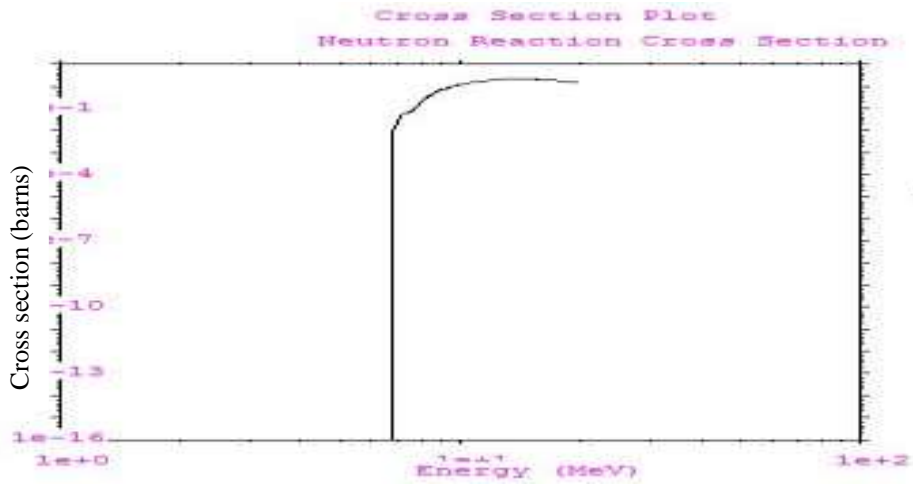
برلیوم



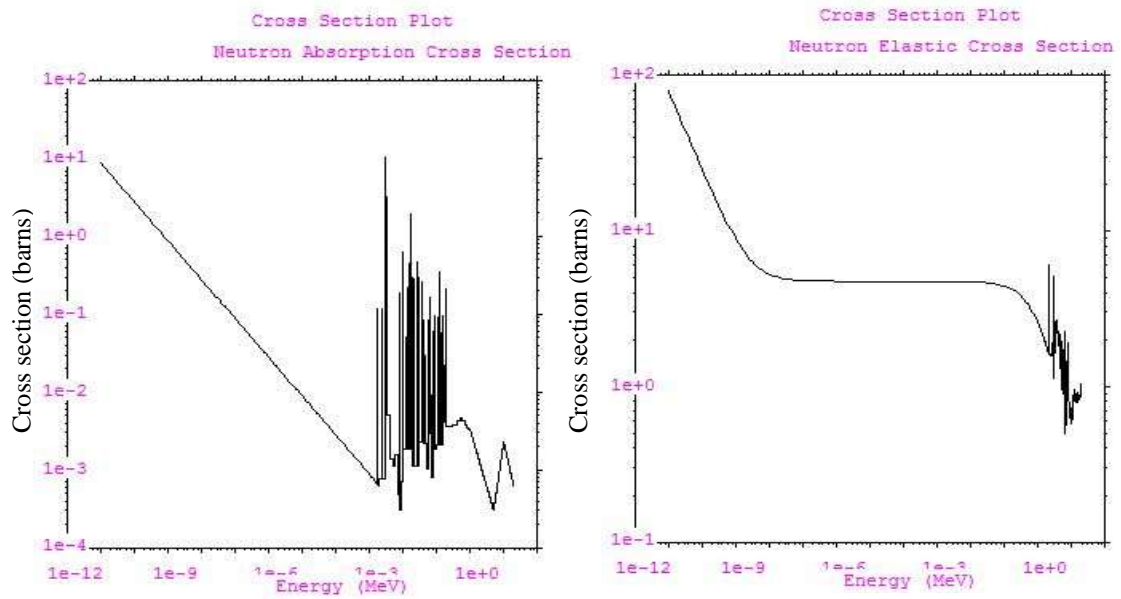
شکل ۷. نمودار سطح مقطع واکنش (n,2n) برای نوترون‌های چشمه



شکل ۸. سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع. شکل ۹. سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



شکل ۱۰. نمودار سطح مقطع واکنش (n,2n) برای نوترون‌های چشمه.

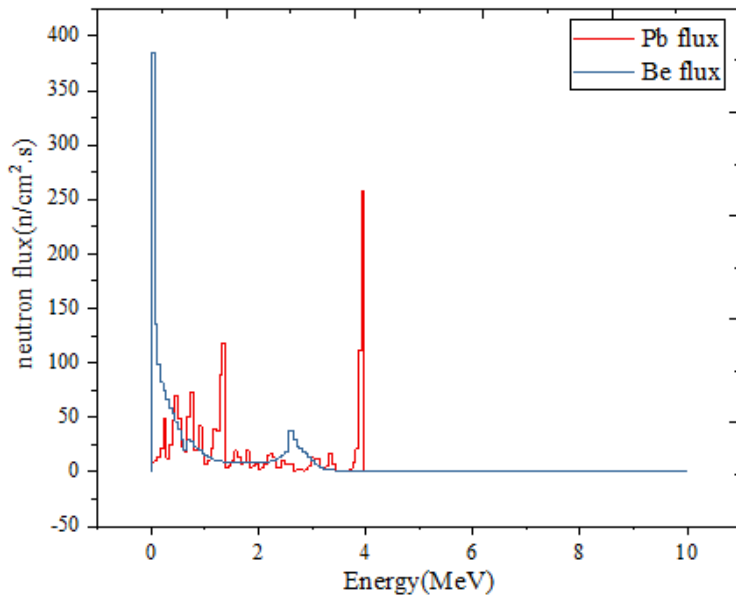


شکل ۱۱. سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع. شکل ۱۲. سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی

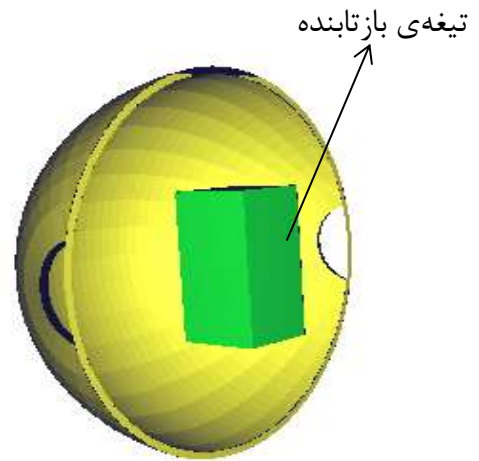
مقایسه‌ی مواد سبک و سنگین در بازتابندگی نوترون

به منظور مقایسه‌ی مواد سبک و سنگین در کاربرد بازتابندگی نوترون‌ها برای استفاده در ساختارهای مختلف از قبیل: حفاظ‌گذاری و ... به شبیه‌سازی آزمایشی پرداختیم. در این آزمایش از یک تیغه، یک‌بار از جنس بریلیوم (بازتابنده‌ی سبک) و بار دیگر از سرب (بازتابنده‌ی سنگین)، و یک چشمه‌ی نوترونی (چشمه‌ی نوترونی تک انرژی با انرژی ۴MeV) که در ۲۵ سانتی‌متری تیغه تعبیه‌شده است استفاده کردیم. به منظور بررسی قدرت بازتابندگی نوترون در انرژی‌های مختلف صفر تا ۱۰MeV، شار نوترونی چشمه با استفاده از تالی حجمی در حجمی از نیم‌کره در پشت چشمه‌ی نوترونی محاسبه گردید. شکل ۱۳، (محور افقی نمودار نماینده‌ی انرژی که به صورت لگاریتمی است و محور عمودی نماینده‌ی شار نوترونی می‌باشد) مقایسه‌ی شار نوترونی برای ساختار موردنظر در پوسته‌ی نیم‌کره‌ی برای صفحه‌ی بریلیومی و سربی را نشان می‌دهد. با برهمکنش نوترون، به ترتیب در مواد سرب و بریلیوم، همانطور که در نمودار دیده می‌شود: بریلیوم باعث کاهش انرژی نوترون‌ها شده و در این صورت نمودار در بازه‌ی انرژی‌های حرارتی یک بیشینه دارد و همچنین در مقدار انرژی حدود ۳ مگاالکترون‌ولت نیز شاهد یک قله که شار نوترونی نزدیک $50 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ را نتیجه می‌دهد، می‌باشیم که نتیجه انرژی آستانه برای واکنش $(n, 2n)$ باشد.

با توجه به نمودار بریلیوم به عنوان عنصر سبک برای بازتابندگی نوترون‌هی حررتی مناسب بوده و سرب به عنوان یک عنصر سنگین به عنوان بازتابنده‌ی نوترون‌های سریع با اهمیت خواهد بود.

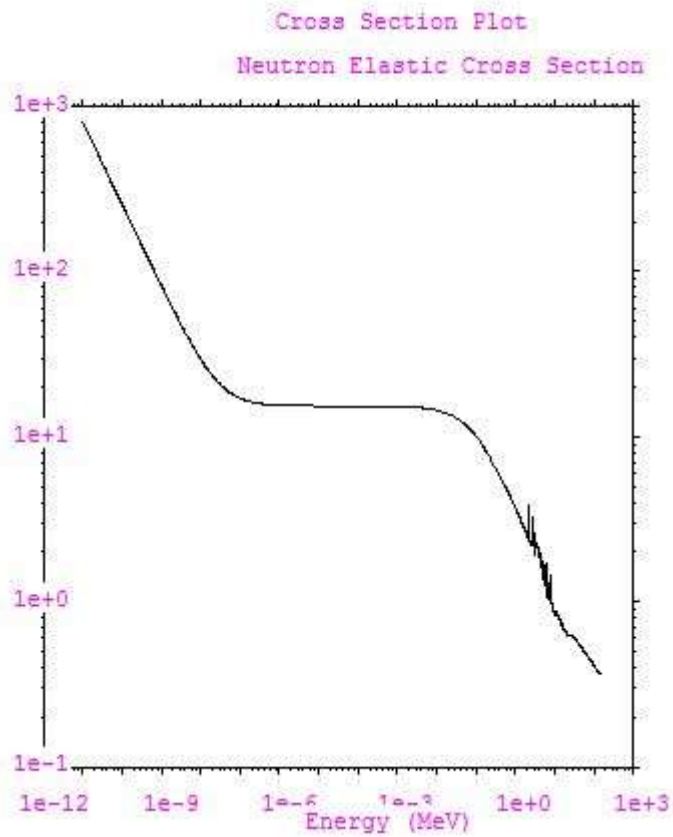


(b)

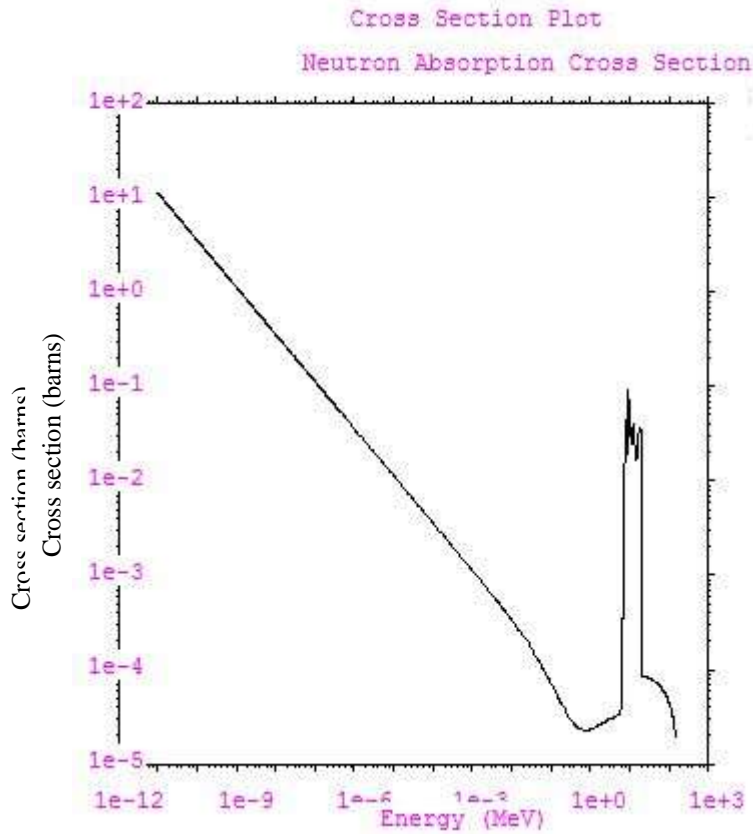


(a)

شکل ۱۳. (a) ساختار مورد استفاده در شبیه‌سازی آزمایش مورد نظر. (b) نمودار شار نوترونی بر حسب انرژی برای دو ماده سرب و بریلیوم.

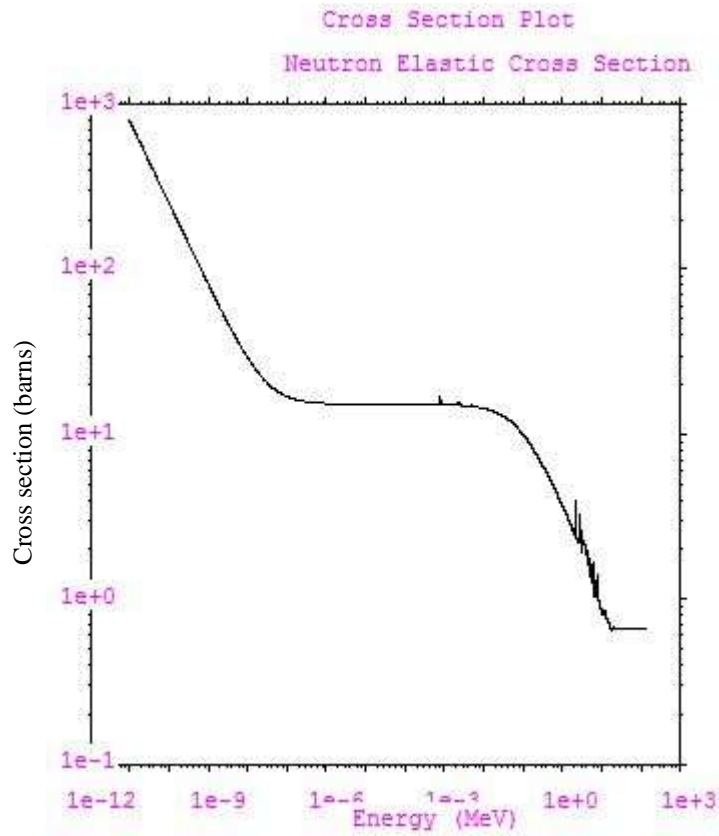


شکل ۱. سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع

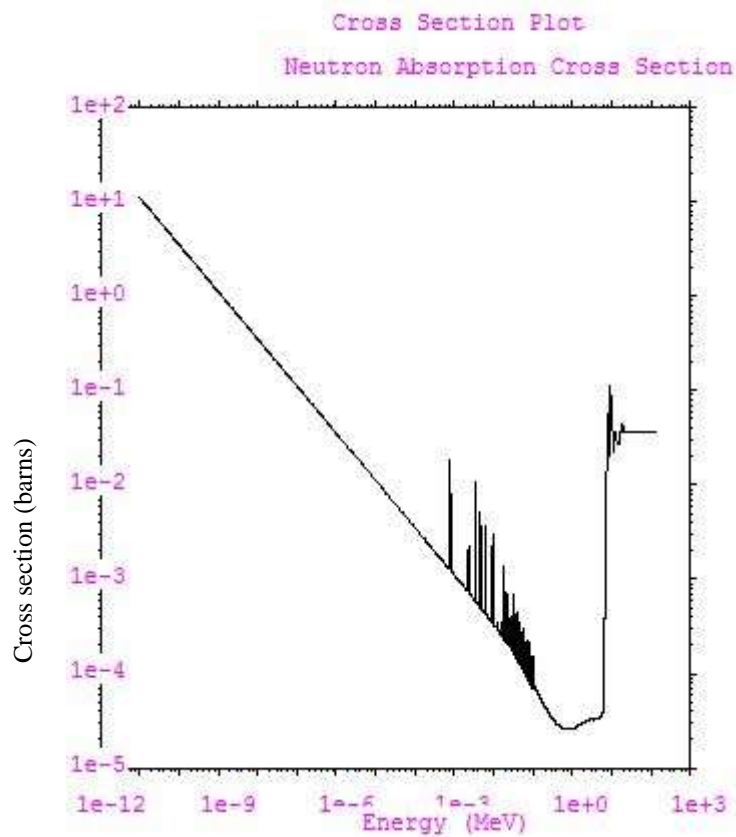


شکل ۲. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.

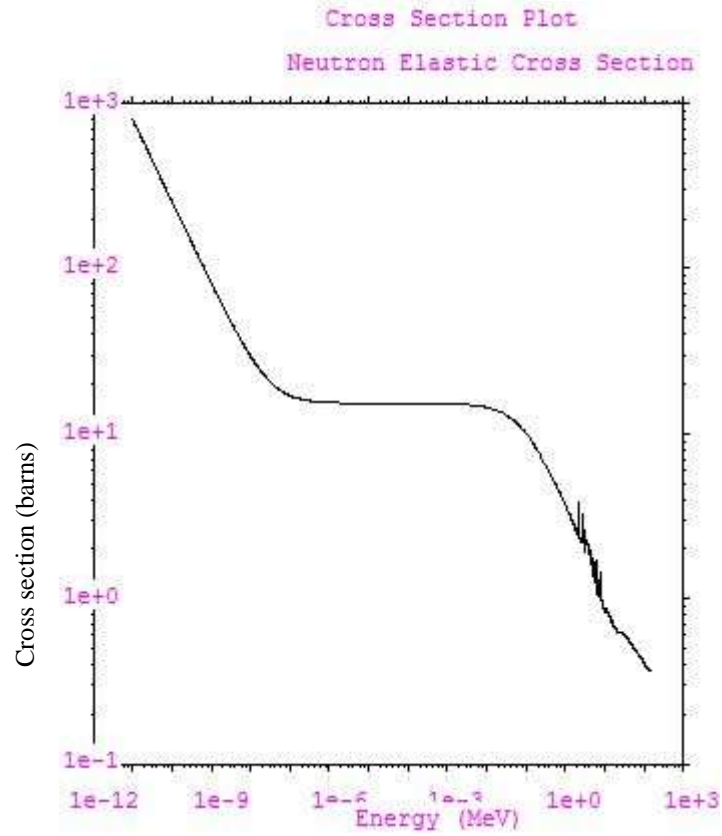
پلی اتیلن با ۵٪ بیسموت



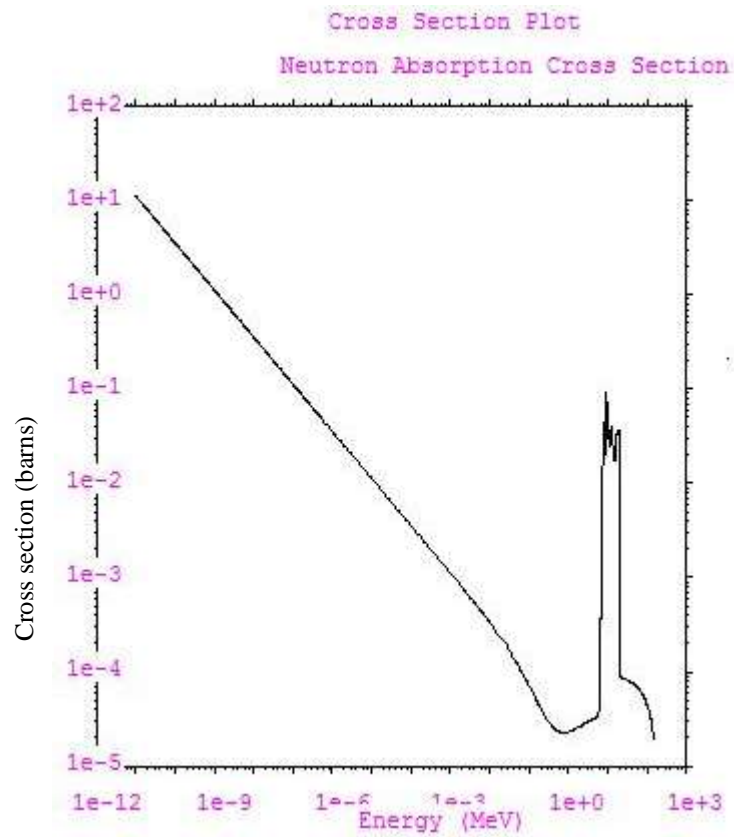
شکل ۳. سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



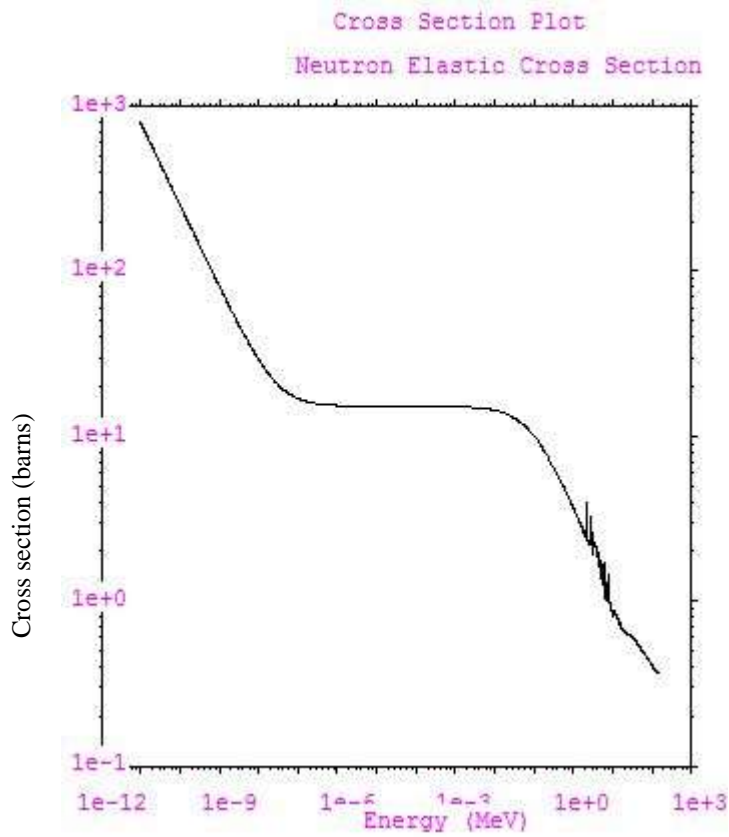
شکل ۳. سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



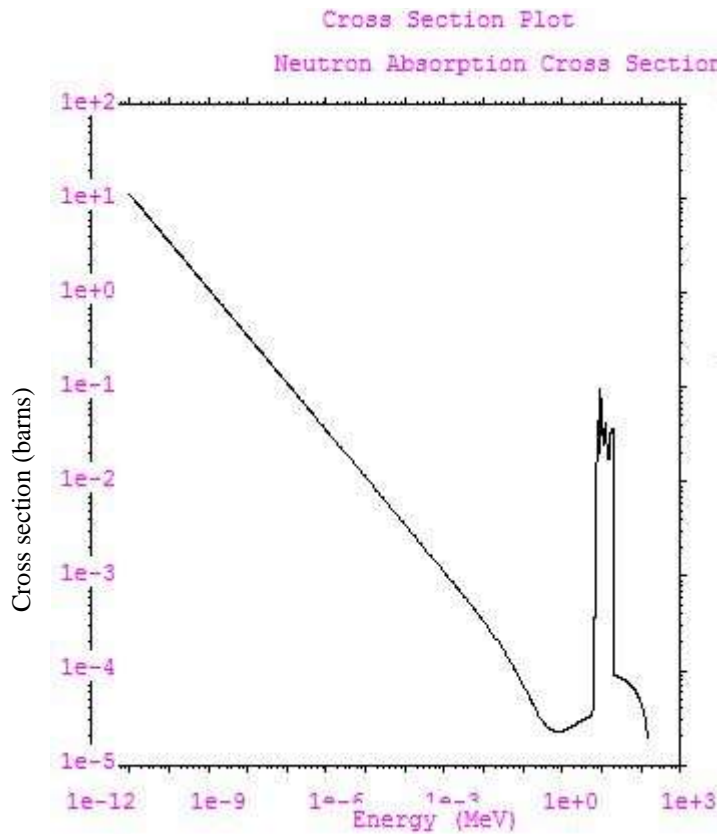
شکل ۵. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



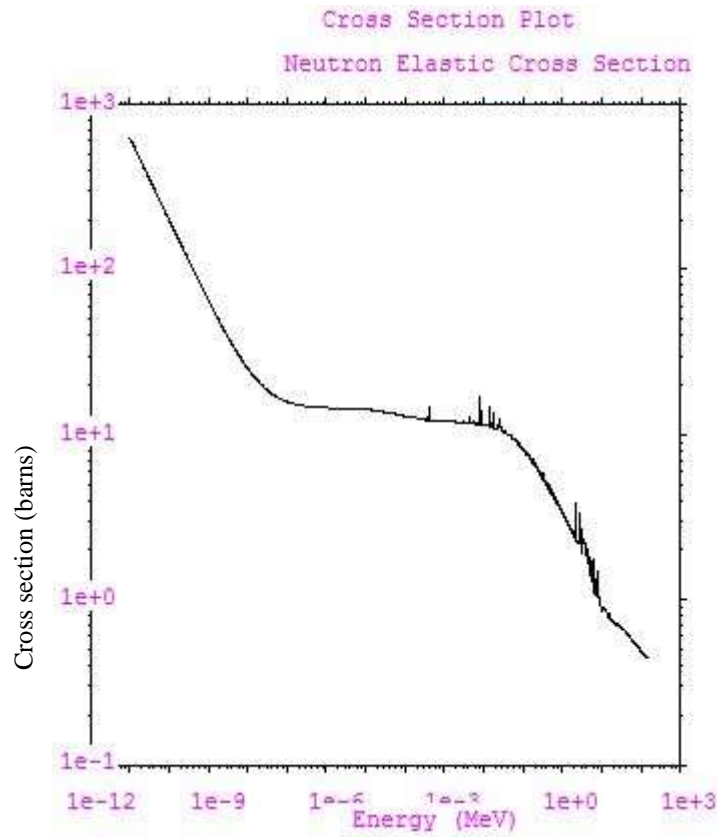
شکل ۵. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



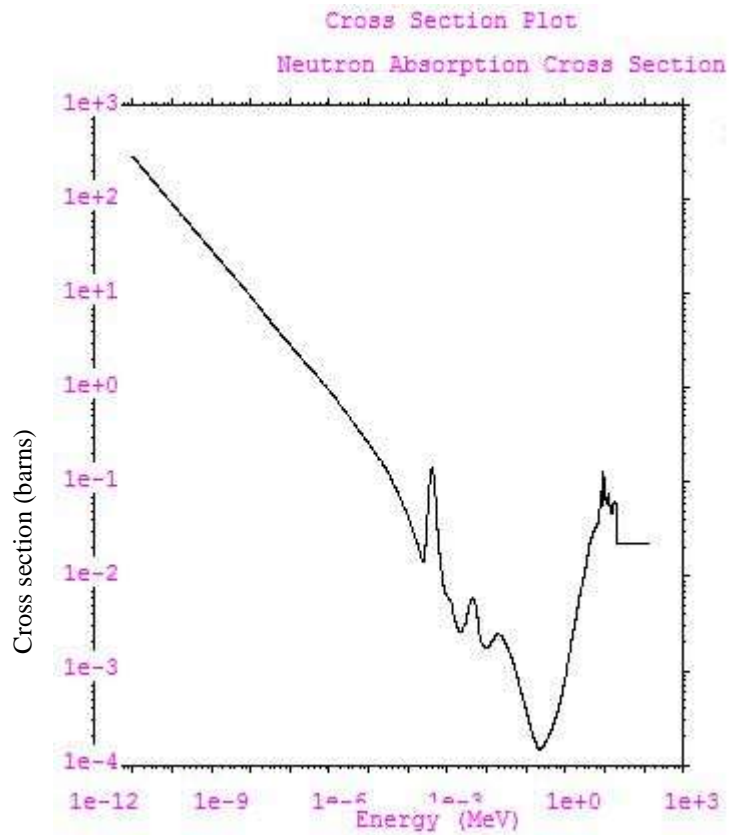
شکل ۶. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



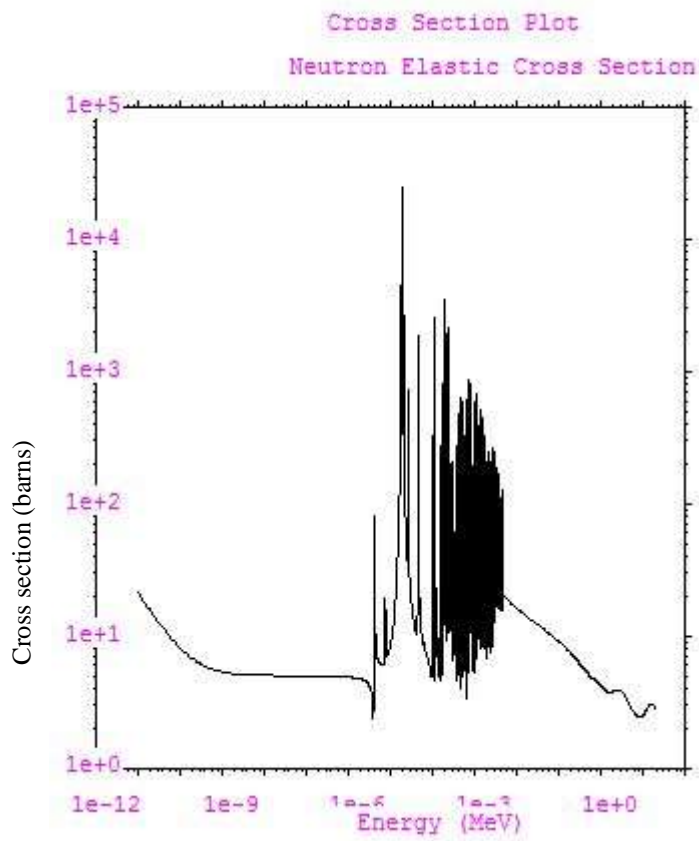
شکل ۷. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



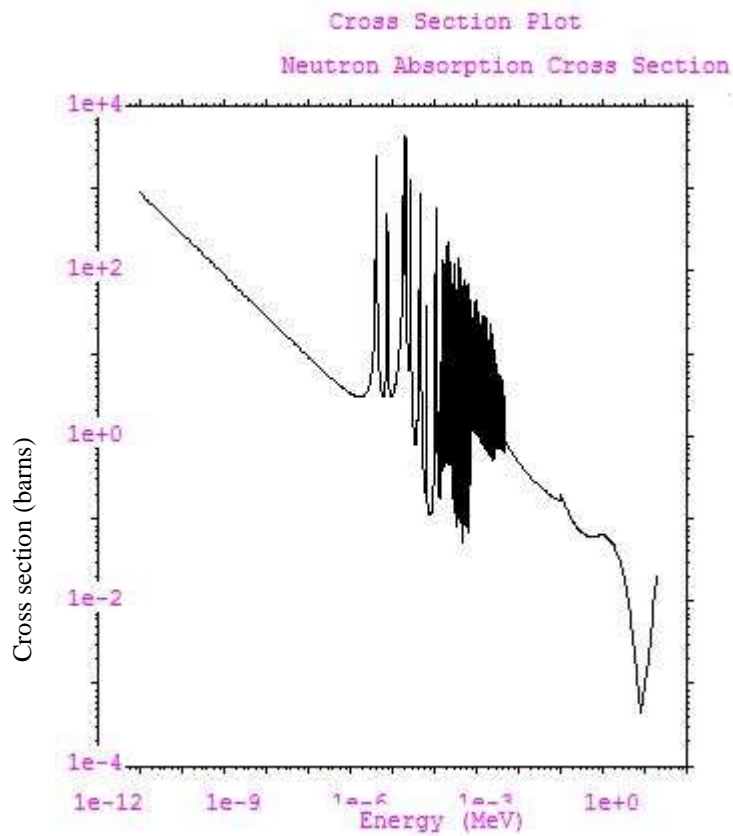
شکل ۸. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



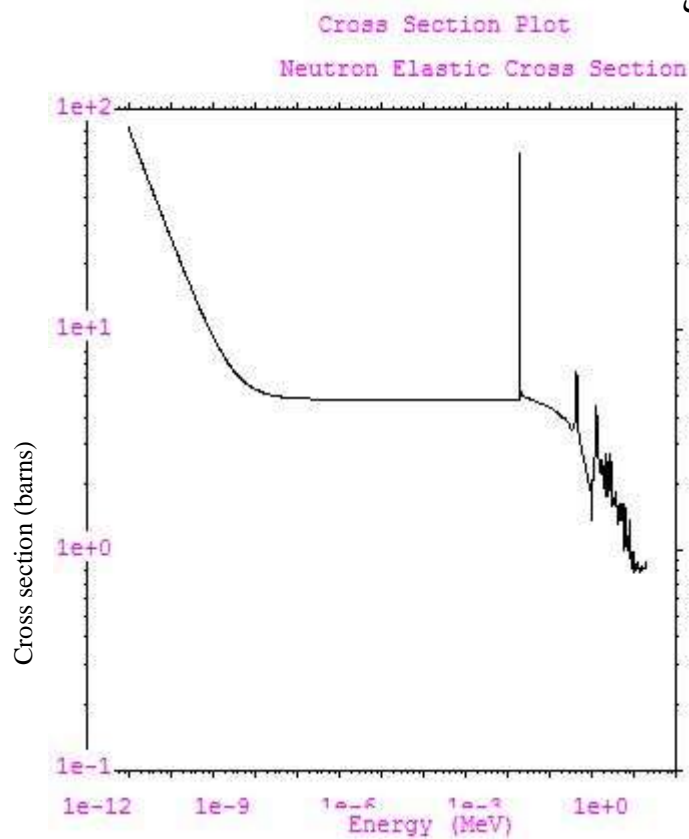
شکل ۹. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



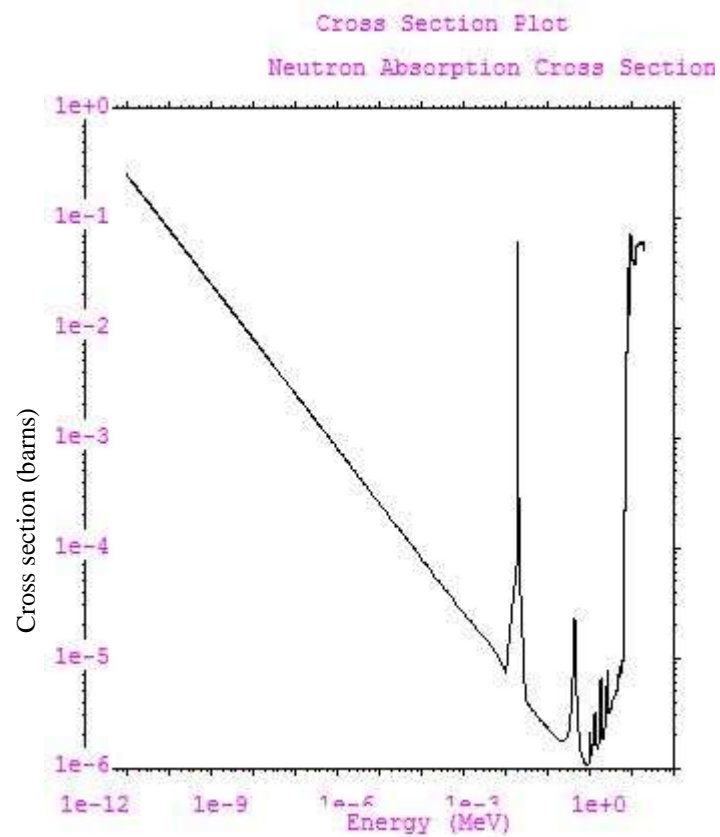
کل ۱۰. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



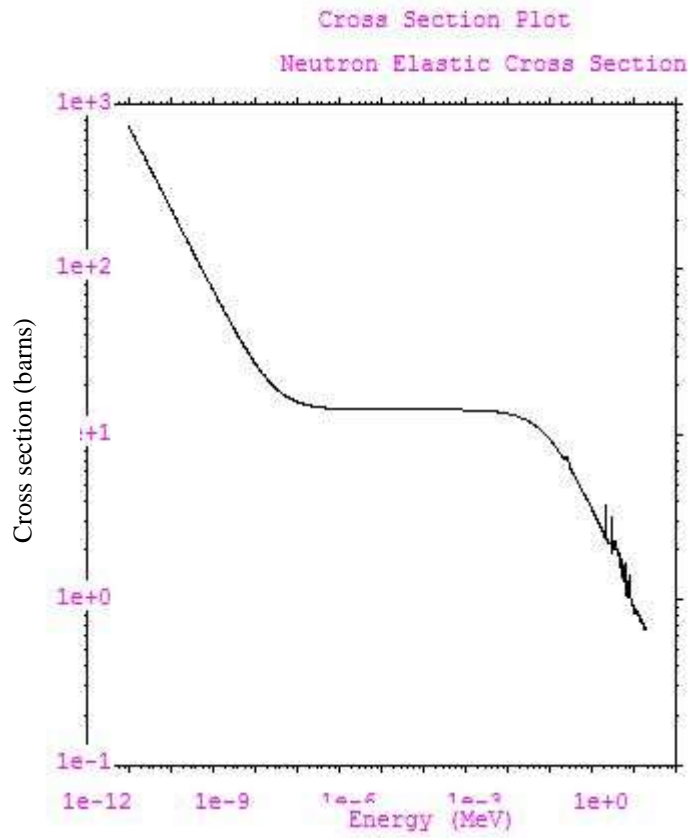
شکل ۱۱. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



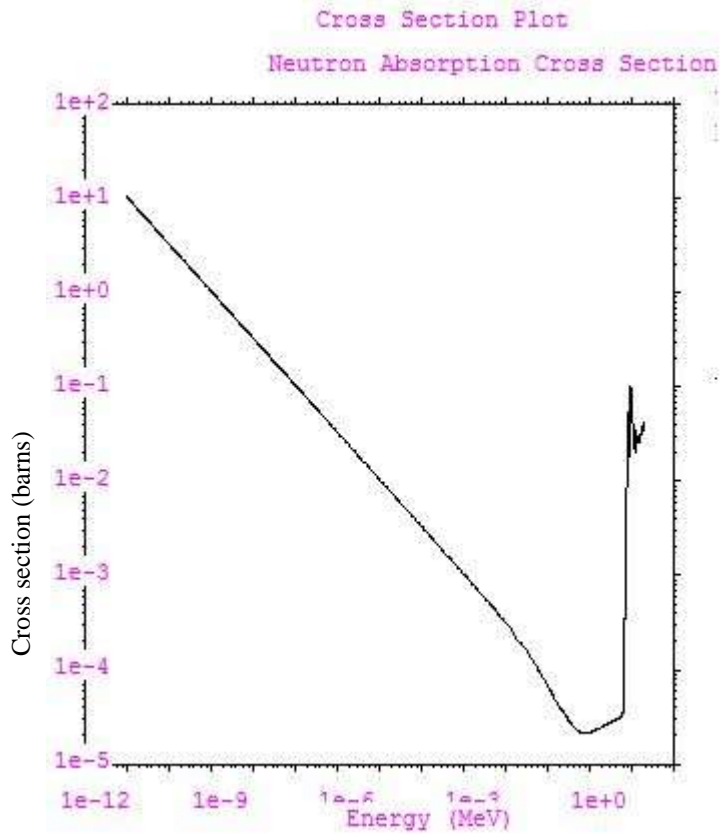
شکل ۱. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



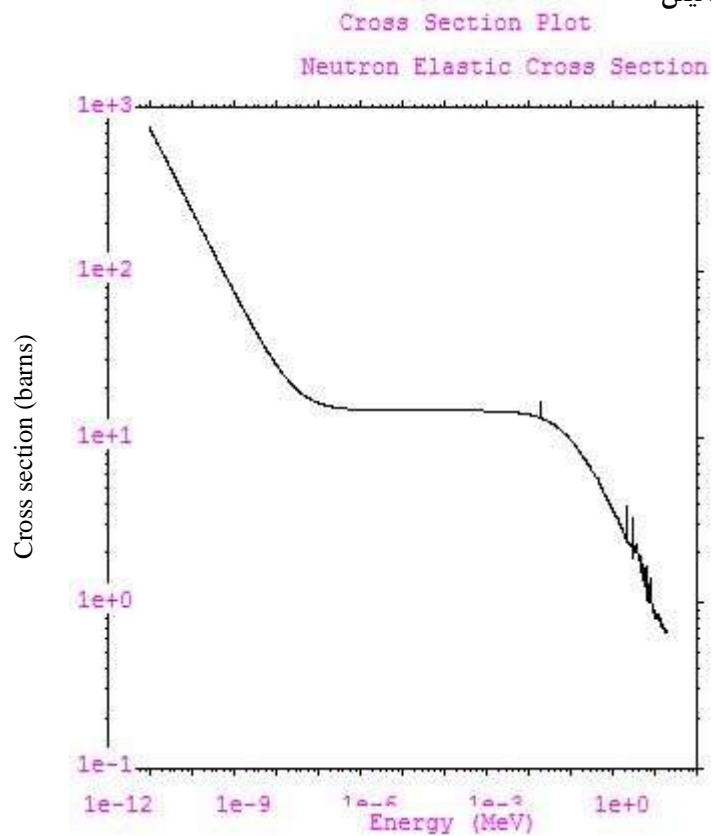
شکل ۲. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



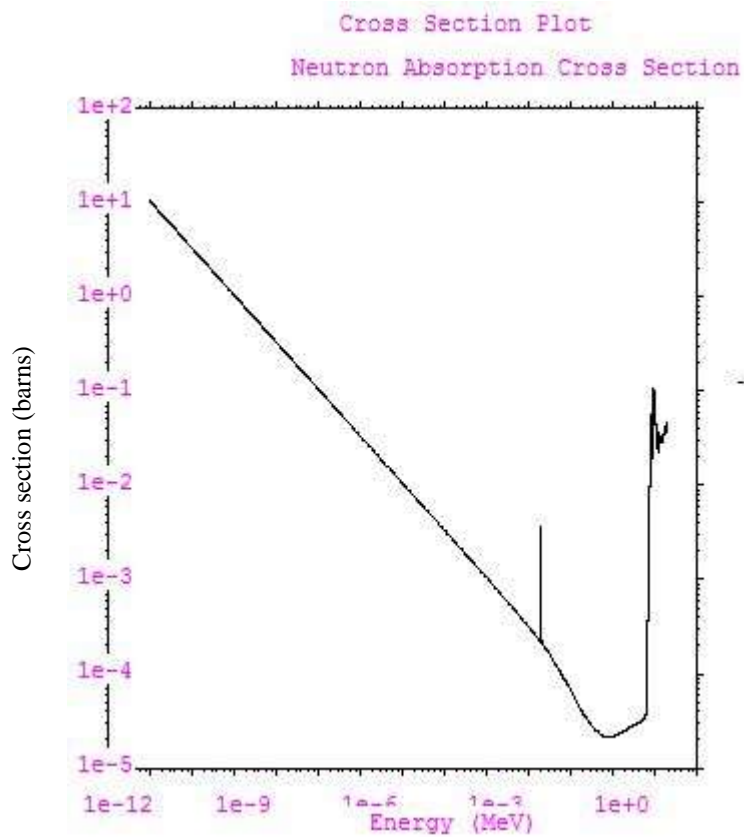
شکل ۳. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



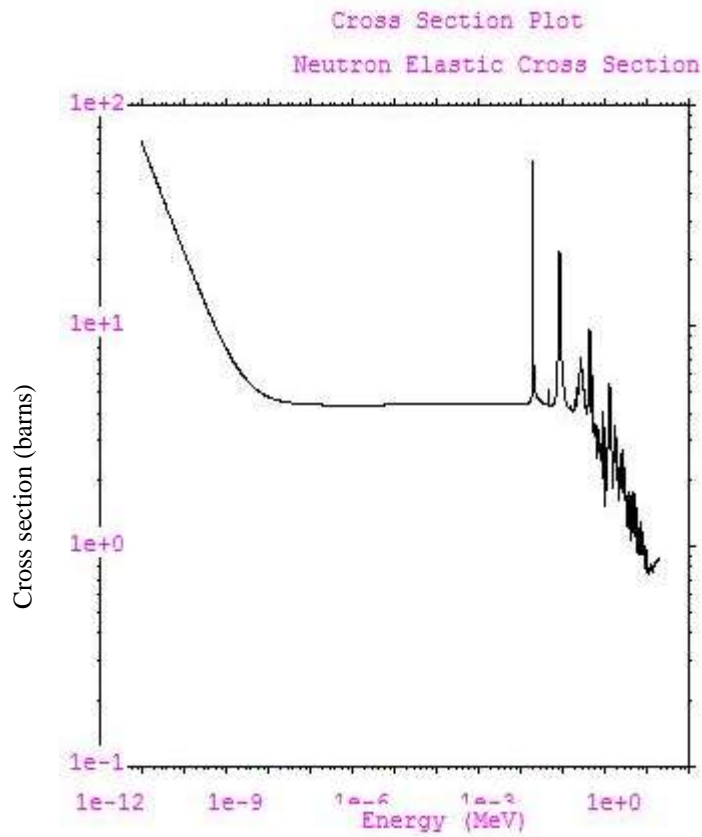
شکل ۴. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



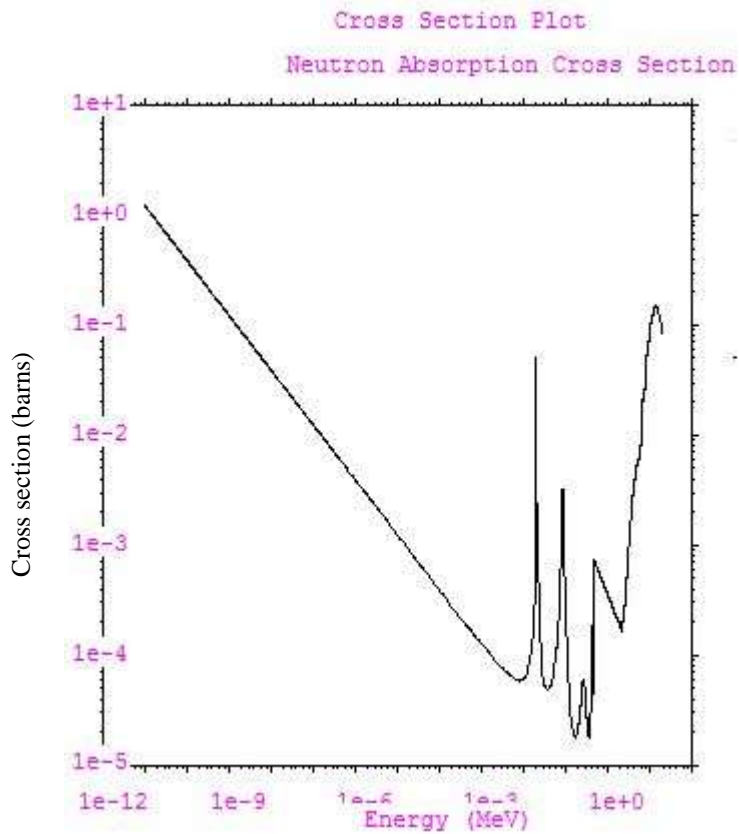
شکل ۵. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



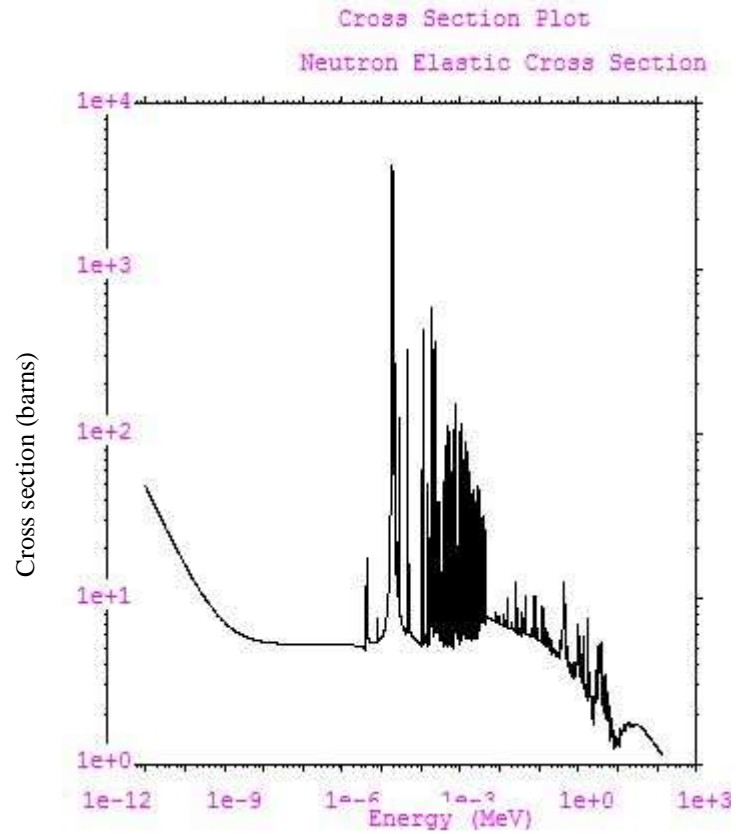
شکل ۶. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



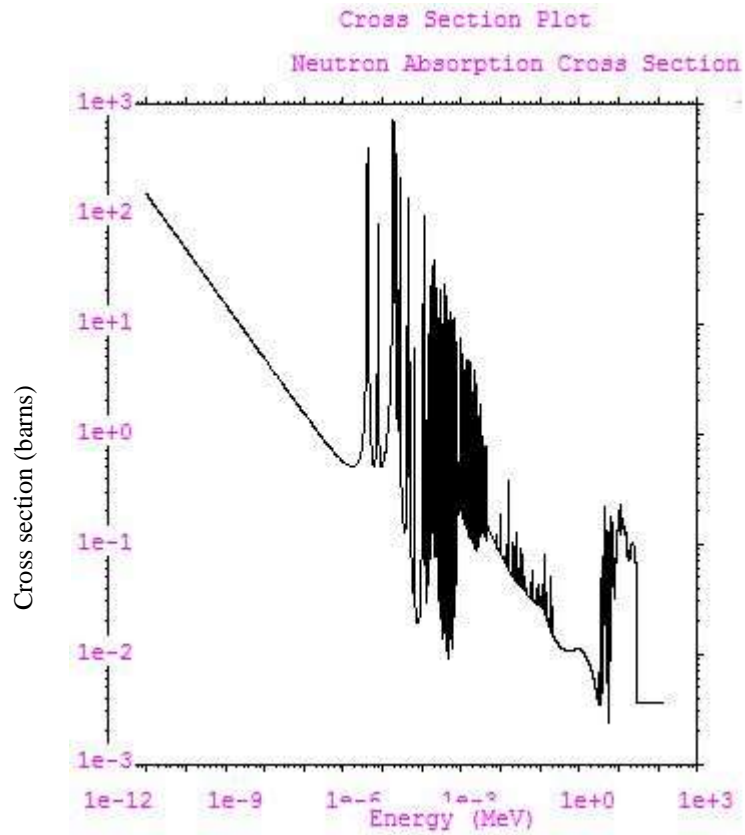
شکل ۷. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



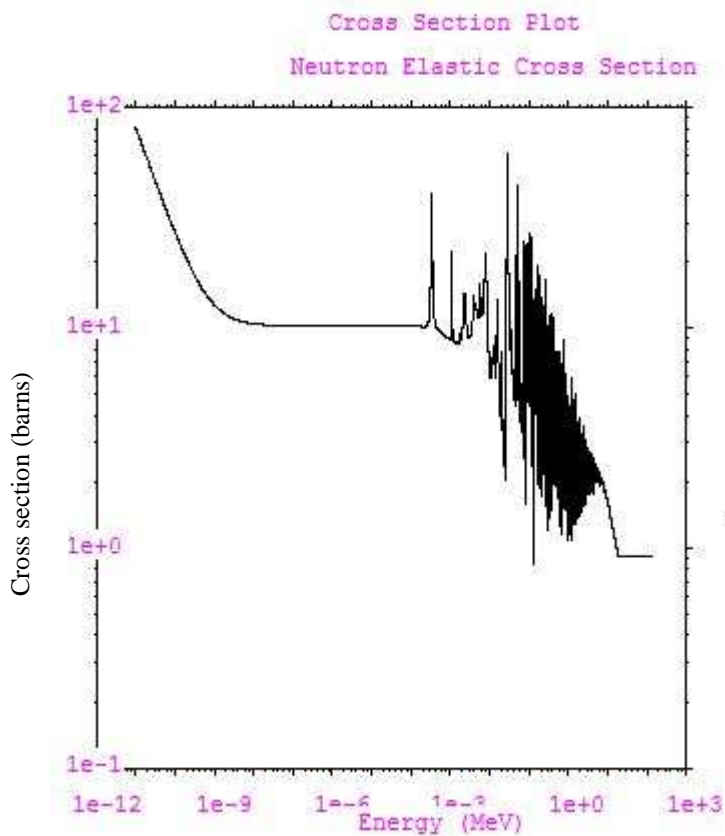
شکل ۸. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



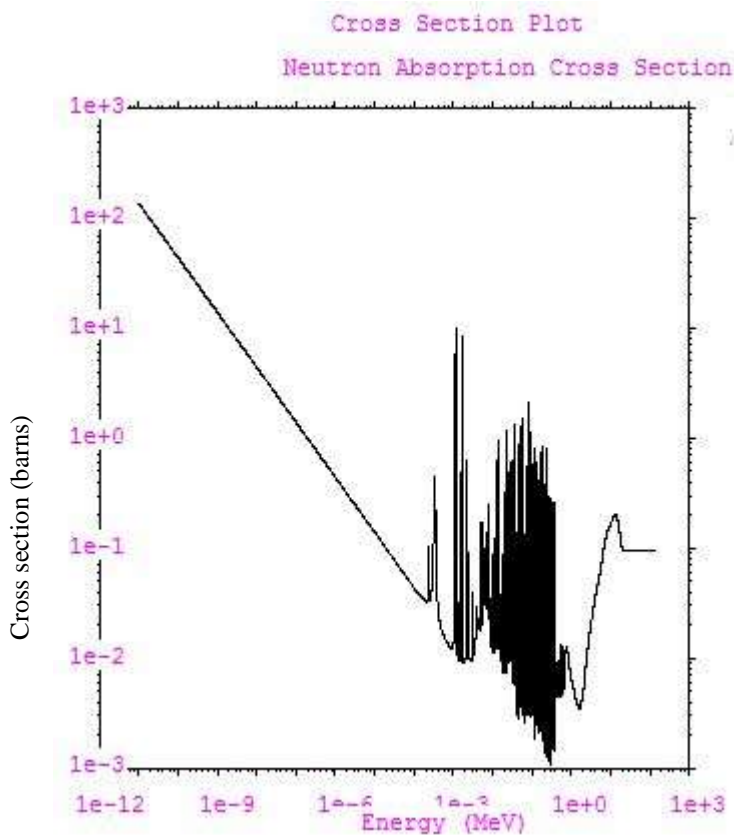
شکل ۹. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



شکل ۱۰. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.



شکل ۱۱. نمودار سطح مقطع پراکندگی الاستیک برای نوترون سریع.



شکل ۱۲. نمودار سطح مقطع جذب برای نوترون حرارتی.

منابع و مراجع

- [۱] A.B. Chilton, J.K. Shultis, and R.E. Faw, (1984), “**Principles of Radiation Shielding**”, Prentice Hall Englewood Cliffs, pages: 366-370.
- [۲] J. K. Shultis, R.E. Faw, (1996), “**Radiation shielding**”, published by American nuclear society.
- [۳] هرمان. سمبر، ۱۳۸۰، فیزیک بهداشت از دیدگاه پرتوشناسی، ابراهیم ابوکاظمی، انتشارات نشر دانشگاهی، تهران، ص ۲۳۲.
- [۴] دی. جی. بنت و آر. تامسون، ۱۹۹۵، مبانی نیروگاه‌های هسته‌ای، ویرایش سوم، انتشارت کوهرنگ.
- [۵] نیکلاس سولفانیدیس، ۱۳۷۱، اندازه‌گیری و آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای، رحیم کوهی، انتشارات کتابستان مشهد.
- [۶] H. S. Hans, (2001), “Nuclear physics; Experimental and Theoretical”, New aged international Ltd.
- [۷] M. Asamoah et al, (2011), “Neutron flux distribution in the irradiation channels of Am–Be neutron source irradiation facility”, Annals of Nuclear Energy 38, 1219–1224.
- [۸] G. E. Knoll, (2000), “**Radiation Detection and Measurement**”, Third Edition.
- [۹] R.C. Martin, J.B. Knauer, P.A. Balo, (2000), “*Production, distribution and applications of californium-252 neutron sources*”, Applied Radiation and Isotopes, 785-792.
- [۱۰] S. Manojlovič, A. Trkov, G. Žerovnik and L. Snoj, (2015), “*Capture cross section measurement analysis in the Californium-252 spectrum with the Monte Carlo method*”, Applied Radiation and Isotopes: 101–106.
- [۱۱] F. Gönnewein, (2014), “Neutron and Gamma Emission in Fission”, University of Tübingen, Germany.
- [۱۲] Héctor René Vega-Carrillo, Eduardo Manzanares-Acuña, Víctor M. Hernández-Dávila, (2006), “*Neutron Shielding for a 252Cf Source*”, Primer Congreso Americano del IRPA Primer Congreso Americano del IRPA.
- [۱۳] J. E. Strain and G. W. Leddicotte, (1962), “*The Preparation, Properties, And Uses of Americium-241, Alpha, Gamma, And Neutron Sources*”, pages 3-20.
- [۱۴] A. W. Obst, T. B. Grandy and J. L. Weil, (1972), “*Reaction Be (α , n) C from 1.7 to 6.4 MeV*”, Physical review c, Volume 5, Number 3.
- [۱۵] H. R. Vega-Carrillo, E. Manzanares-Acuña and et al, (2007), “*Spectrometry And Dosimetry Of A Neutron Source*”, International Symposium/National Congress on Solid State Dosimetry, September 24-27.
- [۱۶] I. Murataa, I. Tsudaa et al, (2014), “*Neutron and gamma-ray source-term characterization of Am–Be sources in Osaka University*”, Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4: pp. 345-348.

- [۱۷] J.W. Marsh, D.J. Thomas and M. Burke,(1995), “*High resolution measurements of neutron energy spectra from Am-Be and Am-B neutron sources*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 366, 340-348.
- [۱۸] H. M. Hakimabadi, A. V. Noghreiyani and H. Panjeh. (2007), “*Gamma Shielding Design Studies on ²⁵²Cf and ²⁴¹Am-Be Neutron Sources*”, Asian J. Exp. Sci., Vol. 21, No. 2, page 247-256.
- [۱۹] A. Waheed, N. Ali, M. A. Baloch et al, 2017, “*Optimization of moderator assembly for neutron flux measurement: experimental and theoretical approaches*”, Nuclear Science Technology, 28:61.
- [۲۰] Carron, N.J. (2007), “**An Introduction to the Passage of Energetic Particles Through Matter**”, pp307-309.
- [۲۱] جی. آر. لامارش، ۱۳۶۱، مقدمه‌ای بر مهندسی هسته‌ای، علی پذیرنده، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۵۱.
- [۲۲] J.H. Wu et al., (2015), “*Energy spectrum measurement and dose rate estimation of natural neutrons in Tibet region*”. Nucl. Sci. Tech. 26, 060202.
- [۲۳] M. A. Gomaa, B. A. Henaish and E. M. Ali, (1993), “*Calculated Neutron and Gamma Dose Rates around a Moderated Am-Be Neutron Source*”, Applied Radiation Isotopes, Vol. 44, No. 3, Pages 638-640.
- [۲۴] K. Shtejer-Diaza, C.B. Zamboni, G.S. Zahnb, J.Y. Zevallos Chavezc, (2003), “*Determination of neutron flux distribution in an Am-Be irradiator using the MCNP*”, Applied Radiation and Isotopes, 263–266.
- [۲۵] M.N. Nasrabadi and G. Baghban, (2013), “*Neutron shielding design for ²⁴¹Am-Be neutron source considering different sites to achieve maximum thermal and fast neutron flux using MCNPX code*”, Annals of Nuclear Energy 59, pp47–52.
- [۲۶] Pelowitz, D. B. (2005), “*MCNPXTM user’s manual*”. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos.
- [۲۷] D.C. Ward, (2009), “*Impact of Switching To The ICRP-74 Neutron Flux-To-Dose Equivalent Rate Conversion Factors At The Sandia National Laboratory Building 818 Neutron Source Range*”, Sandia Report.
- [۲۸] M. E. Battat, (1977), “**American National Standard Neutron and Gamma-Ray Flux-to-Dose Rate Factors, ANSI/ANS-6.1.1-1977 (N666)**”, American Nuclear Society, LaGrange Park, Illinois.
- [۲۹] IAEA-TECDOC-1223; (2001), “**Current status of neutron capture therapy**”, international atomic energy agency.
- [۳۰] T. A. Tomberlin, (2004), “*Beryllium – A Unique Material In Nuclear Applications*”, 36th International SAMPE Technical Conference.

Abstract

Neutron sources are suitable for some applications such as medical, industrial, agricultural etc. The main aim of this thesis is devoted to the design and simulation of appropriate neutron shielding materials based on a ^{252}Cf source, using MCNPX code to reduce weight and volume of neutron shielding structures based on multi-layered materials. Another purpose of this study is to compare neutron flux and dose of ^{252}Cf source with that of $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source, using MCNPX code. The proposed design is composed of three-concentric cylinder layers with source. It consists of three parts including paraffin and paraffin with 10% graphite as moderator, beryllium as reflector and borated polyethylene and lead Tungstate as thermal neutron and gamma absorber. The results show that compared with the traditional shielding structures, the volume and the weight of the proposed design is significantly decreased by about 89% and 58%, respectively. Finally, in addition to designing shield for ^{252}Cf neutron source, we consider some radiation sites that are used in applications such as NAA, PGNAA etc.

Key-words: neutron source, californium-252, Americium- beryllium-241, shielding, flux, equivalent dose, moderator, reflector, absorber, paraffin, borated poly ethylene, beryllium, lead tungstate, paraffin content graphite, radiation site, MCNPX code.



Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in Nuclear Physics

Designing appropriate shield for ^{252}Cf source in order to build and compare its dose and flux with $^{241}\text{Am-Be}$ source.

By

Maryam Nasrabadi

Supervisors

Dr. Hossein Tavakoli-Anbaran

Dr. Ehsan Ebrahimibasabi

January 2018