

الله الرحمن الرحيم



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

رشته فیزیک گرایش هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی حفاظ و کندکننده مناسب جهت افزایش شار نوترون‌های حرارتی چشمه نوترون Am-Be به روش مونت کارلو

نگارنده: حمید بصیری

استاد راهنما

دکتر حسین توکلی عنبران

شهریور ۹۶

شماره:

تاریخ:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

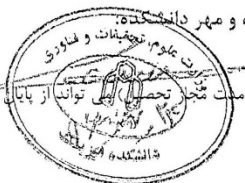
با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حمید بصیری با شماره دانشجویی ۹۳۰۳۹۵۴ رشته فیزیک گرایش هسته‌ای تحت عنوان طراحی حفاظ و کندکننده مناسب جهت افزایش شار نوترون‌های حرارتی چشمه نوترون Am-Be به روش مونت کارلو که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز ... درجه ...)	☐
مردود	☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر حسین توکلی عنبران	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید علی حسینی منصوری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمدرضا شجاعی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مسلم سوهانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی مومنی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیلی) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

پیشگاه امام رئوفی که هرچه دارم از عنایت‌های اوست.

روح آسمانی پدربزرگم که تا واپسین لحظات عمرش مشغول آموختن و مطالعه بود و همواره بر علم آموزی و بالابردن سطح علمی خود تاکید داشت.

پدر و مادر عزیزم که لبخند رضایت آن‌ها بزرگترین دلیل برای ادامه تحصیل بود و هیچگاه مهر و محبت خود را از من دریغ نکرده و نگذاشتند به کوچکترین مشکلی برخورد کنم.

همسر مهربانم که در میانه این مسیر همراه و یاور من شد تا با انگیزه مضاعف و محکم تر گام‌های بعدی خود را بردارم.

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می دانم از زحمات جناب آقای دکتر حسین توکلی عنبران که همچون پدری دلسوز در تمام مراحل تحصیلی این مقطع، این حقیر را مورد لطف خود قرار دادند و با پندهایشان منجر به ارتقای سطح علمی و اخلاقی اینجانب شدند کمال تشکر را داشته باشم.

همچنین مراتب قدردانی خود را از کتابخانه آستان قدس رضوی بویژه کارکنان محترم بخش تالار محققان که بستر بسیار مناسبی را برای پژوهش فراهم کرده اند، اعلام می دارم.

اقرارنامه

دانشجو تایید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

چکیده

نوترون ذره‌ای ناپایدار و دارای نیمه عمر کوتاه، در حدود یازده دقیقه، است و به منظور استفاده از آن در صنعت، پزشکی و تحقیقات آزمایشگاهی باید بطور مصنوعی تولید شود. راکتورهای هسته‌ای به عنوان مهم‌ترین چشمه نوترون شناخته شده‌اند اما ابعاد بسیار بزرگ و تکنولوژی پیشرفته آن‌ها و همچنین نگرانی‌های ایمنی و امنیتی و هزینه‌های گزاف نگهداری و تعمیر، استفاده از آن را در بسیاری از امور غیرممکن کرده است. جایگزین مناسبی برای راکتورهای هسته‌ای شکافت، چشمه‌های آلفا-نوترون می‌باشند. در تحقیق پیش رو از رایج‌ترین چشمه نوترون یعنی Am-Be استفاده گردیده است. نوترون‌های تولید شده از این چشمه دارای انرژی‌های مختلفی در بازه $11\text{ MeV} - 0$ می‌باشند. به منظور کندی سازی نوترون‌های غیرحرارتی و افزایش شار نوترون‌های حرارتی از ماده کندکننده در اطراف چشمه استفاده می‌شود.

در این تحقیق با استفاده کد مبتنی بر روش مونت کارلو MCNP به شبیه سازی و محاسبه شار نوترون‌های حرارتی در چشمه Am-Be با کندکننده‌های مختلف پرداخته شده است و در نهایت کندکننده مناسب و ضخامت بهینه آن جهت استفاده از نوترون‌های حرارتی این چشمه پیشنهاد شده است. سپس اثر افزودن لایه‌ای از مواد بازتابنده و تکثیرکننده به چشمه بر شار نوترون‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت حفاظ سازی مناسب به منظور به حداقل رساندن آسیب های بیولوژیکی در هنگام کار با چشمه نوترون برای پیکربندی نهایی پیشنهادی انجام شده است.

بر اساس یافته‌های این تحقیق استفاده از هندسه کروی برای کندکننده بجای هندسه استوانه‌ای مورد استفاده در اکثر پژوهش‌های پیشین، می‌تواند منجر به افزایش شار نوترون‌ها شود. همچنین در نتیجه شبیه سازی‌ها پارافین به عنوان بهترین کندکننده انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از بازتابنده و تکثیرکننده می‌تواند اثر مثبتی روی شار نوترون‌های حرارتی داشته باشد و ضخامت اثرگذاری آن تعیین گردید. در پایان نیز به مقایسه و انتخاب حفاظ برتر برای به حداقل رساندن گاما‌های تولید شده در اثر جذب

نوترون در مواد مورد استفاده از چشمه و نوترون‌هایی که از سطح خارجی پیکربندی چشمه فرار می کنند، با استفاده از کره ICRU پرداخته شده است.

نتیجه نهایی بصورت کره پارافین تا شعاع ۷ سانتی‌متر، بازتابنده و تکثیرکننده از جنس بریلیوم به ضخامت ۲۳ سانتی‌متر، مجددا پارافین به ضخامت ۳۱ سانتی‌متر جهت کاهش دز نوترون در کره ICRU و بطور همزمان افزایش شار حرارتی در سیستم و در نهایت آلیاژ کنرتیوم به ضخامت ۷ سانتی‌متر به عنوان پیکربندی که با اهداف تحقیق سازگار است، پیشنهاد می شود. همچنین در نتیجه شبیه سازی ها مشاهده گردید شار حرارتی در فاصله ۴ الی ۷ سانتی‌متر بیشترین مقدار را داشته که به عنوان انتهای سایت پرتودهی و محل قرار دادن نمونه‌ای که قرار است با حداکثر شار نوترون حرارتی بمباران شود، پیشنهاد می شود.

کلمات کلیدی:

نوترون حرارتی، چشمه نوترون، کندکننده، حفاظ، Am-Be

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

1- H Basiri and H Tavakoli-Anbaran, Journal of Physics: Conference series, Investigation of some possible changes in Am-Be neutron source configuration in order to increase the thermal neutron flux using Monte Carlo code, 2017

۲- ح. بصیری و ح. توکلی عنبران، "بررسی اثر حفاظ‌های مختلف برای چشمه نوترون Am-Be با استفاده از کد MCNPX"، ارائه شده در هشتمین همایش ملی فیزیک دانشگاه پیام نور، شیراز-ایران، ۱۳۹۶.

فهرست مطالب

فصل اول	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تاریخچه کشف نوترون	۲
۳-۱ برهم‌کنش نوترون با ماده	۳
۴-۱ سطح مقطع نوترون	۷
۱-۴-۱ سطح مقطع میکروسکوپی	۷
۲-۴-۱ سطح مقطع ماکروسکوپی	۹
۳-۴-۱ پویش آزاد میانگین	۹
۵-۱ تغییر سطح مقطع‌ها با انرژی نوترون	۱۰
۶-۱ چشمه‌های نوترون	۱۲
۱-۶-۱ چشمه α , Be	۱۲
۱-۱-۶-۱ چشمه Am-Be	۱۴
۲-۶-۱ چشمه‌های فوتونوترونی:	۱۵
۳-۶-۱ شکافت خود به خود:	۱۶
۴-۶-۱ واکنش‌های هسته‌ای:	۱۶
۵-۶-۱ چشمه راکتور:	۱۷
۷-۱ طبقه بندی نوترون‌ها	۱۷
۸-۱ کاربردهای باریکه نوترون	۱۸
۱-۸-۱ استفاده از پراکندگی نوترون	۱۸
۱-۱-۸-۱ تعیین ساختار اتمی برای طراحی مواد	۱۸
۲-۱-۸-۱ اقتصاد هیدروژن و ذخیره سازی آن	۱۹
۳-۱-۸-۱ مغناطیس و ابر رسانایی	۱۹
۲-۸-۱ رادیوگرافی نوترون	۱۹
۱-۲-۸-۱ تکنولوژی سوخت هسته‌ای	۲۰
۲-۲-۸-۱ صنایع هوافضا	۲۰

۲۰	۱-۸-۲-۳ پزشکی و کشاورزی
۲۱	۱-۸-۲-۴ مهندسی عمران
۲۱	۱-۸-۲-۵ صنایع تسلیحاتی
۲۱	۱-۸-۲-۶ میراث فرهنگی
۲۱	۱-۸-۳ تحلیل فعالسازی نوترونی
۲۲	۱-۸-۴ نوترون‌ها در نقش کاوشگر
۲۲	۱-۹ راه‌های افزایش شار نوترون حرارتی در چشمه‌های نوترون
۲۵	فصل دوم
۲۶	۲-۱ مقدمه
۲۶	۲-۲ اصول حفاظت در برابر پرتوها
۲۶	۲-۲-۱ زمان
۲۷	۲-۲-۲ فاصله
۲۸	۲-۲-۳ حفاظ
۲۹	۲-۳-۱ حفاظت در برابر نوترون‌ها
۳۱	۲-۳ اصل ALARA
۳۱	۲-۴ کمیت‌های مورد استفاده در حفاظت پرتوی
۳۱	۲-۴-۱ دز جذبی
۳۱	۲-۴-۲ دز معادل
۳۲	۲-۴-۳ دز معادل موثر
۳۳	۲-۵ محدودیت‌های دز دریافتی
۳۴	۲-۵-۱ حدود دز معادل موثر
۳۴	۲-۵-۲ حدود دز پرتوکاران و افراد جامعه
۳۴	۲-۶ کاهش انرژی نوترون در برخوردهای پراکندگی
۳۷	۲-۶-۱ یافتن تعداد برخوردهای لازم جهت رسیدن نوترون به انرژی دلخواه
۳۹	۲-۷ بازتابنده
۳۹	۲-۸ کندکننده

۴۰	۲-۸-۱ آب معمولی.....
۴۰	۲-۸-۲ آب سنگین.....
۴۰	۲-۸-۳ برلیوم.....
۴۱	۲-۸-۴ گرافیت.....
۴۱	۲-۸-۵ کندکننده‌های آلی.....
۴۲	۲-۸-۶ هیدریدها.....
۴۳	فصل سوم.....
۴۴	۳-۱ مقدمه.....
۴۴	۳-۲ معرفی روش مونت کارلو.....
۴۵	۳-۳ کد MCNP.....
۴۶	۳-۴ بکارگیری کد MCNP جهت شبیه‌سازی چشمه Am-Be.....
۴۸	۳-۴-۱ ساختار ورودی MCNP جهت شبیه‌سازی چشمه Am-Be.....
۵۱	۳-۴-۲ دستورات لازم در کد MCNP.....
۵۱	۳-۴-۲-۱ دستور تعریف نوع مسئله.....
۵۱	۳-۴-۲-۲ دستور تعریف چشمه.....
۵۳	۳-۴-۲-۳ تعریف خروجی Tally card مورد استفاده.....
۵۴	۳-۴-۲-۴ دستور تعریف مواد Mn (Material card).....
۵۵	۳-۴-۲-۵ دستورهای خاتمه دهنده به اجرای کد.....
۵۵	۳-۵ محاسبات ترابرد نوترون در MCNP.....
۵۹	فصل چهارم.....
۶۰	۴-۱ انتخاب شکل هندسی کندکننده.....
۶۰	۴-۱-۱ مقایسه شار در سطح کندکننده کره و استوانه با حجم‌های برابر.....
۶۳	۴-۱-۲ مقایسه شار در حجم کره و استوانه کندکننده دارای حجم‌های برابر.....
۶۵	۴-۲ انتخاب ماده کندکننده.....
۶۸	۴-۳ یافتن شعاع اثرگذاری پارافین بر شار نوترون.....
۶۸	۴-۳-۱ بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین به کمک مقایسه شار حرارتی و غیرحرارتی در سطح.....

۲-۳-۴	بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین به کمک مقایسه شار حرارتی و غیرحرارتی در حجم.....	۷۱
۳-۳-۴	بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین به کمک مقایسه شار حرارتی و غیرحرارتی در آشکارساز نقطه‌ای.....	۷۴
۴-۳-۴	بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین تا شعاع ۳۱,۴۲ سانتی‌متر بر شار سطح کره پارافین به شعاع ۷ سانتی‌متر.....	۷۶
۴-۴	بررسی اثر افزودن بازتابنده به پیکربندی چشمه.....	۷۷
۱-۴-۴	افزودن بازتابنده به کندکننده در شعاع ۷ سانتی‌متر.....	۷۸
۲-۴-۴	محاسبه شعاع اثرگذاری برلیوم بر کره پارافین به شعاع ۷ سانتی‌متر.....	۸۲
۳-۴-۴	مقایسه اثر افزودن بازتابنده های مختلف به کندکننده در شعاع ۳۱,۴۲ سانتی‌متر.....	۸۳
۴-۴-۴	محاسبه شعاع اثرگذاری برلیوم بر کره پارافین به شعاع ۳۱,۴۲.....	۸۴
۵-۴	بررسی امکان استفاده از تکثیر کننده نوترون در پیکربندی چشمه.....	۸۵
۶-۴	پیکربندی های پیشنهادی از نتایج شبیه سازی ها.....	۸۷
۱-۶-۴	مقایسه شار نوترون در سطوح مختلف برای هندسه‌های پیشنهادی.....	۸۸
۷-۴	مقایسه اثر حفاظ‌های مختلف برای دو هندسه پیشنهادی.....	۸۹
۱-۷-۴	مقایسه اثر حفاظ‌های مختلف بر کره پارافین به شعاع ۳۱,۴۲ سانتی‌متر.....	۸۹
۱-۱-۷-۴	بررسی اثر افزودن ضخامت‌های مختلف حفاظ کنتیوم.....	۹۲
۲-۷-۴	مقایسه اثر حفاظ‌های مختلف بر کره پارافین به شعاع ۷ سانتی‌متر و بازتابنده به شعاع ۳۰ سانتی‌متر.....	۹۳
۱-۲-۷-۴	بررسی اثر افزودن ضخامت‌های مختلف حفاظ کنتیوم.....	۹۴
۲-۴-۷-۴	بررسی افزودن پارافین جهت حفاظت در برابر نوترون.....	۹۵
۸-۴	هندسه نهایی پیشنهادی.....	۹۸

فهرست جداول

جدول ۱-۱	مقایسه گستره شطح مقطع گیراندازی نوترون.....	۵
جدول ۲-۱	خواص چشمه‌های نوترون برای واکنش $C^{12}(\alpha,n)Be^9$	۱۳
جدول ۳-۱	طبقه بندی نوترون‌ها بر حسب انرژی.....	۱۷
جدول ۱۱-۲	اثر ضخامت‌های مختلف HVL.....	۲۸
جدول ۲-۲	HVL سرب برای رایونوکلئیدهای مختلف.....	۲۹
جدول ۳-۲	فاکتور کیفیت برای تابش‌های مختلف.....	۳۲
جدول ۴-۲	فاکتور وزنی برای بافت‌های مختلف.....	۳۳
جدول ۵-۲	میانگین تعداد برخورد‌های لازم برای رساندن انرژی نوترون از 2MeV به 1eV	۳۹
جدول ۱-۳	واحد کمیت‌های فیزیکی در کد MCNP.....	۴۶
جدول ۲-۳	متغیرها در تعریف چشمه در کد MCNP.....	۵۲
جدول ۱-۴	مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده پارافین در سطح کندکننده‌های کروی و استوانه‌ای.....	۶۱
جدول ۲-۴	مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده آب در سطح کندکننده‌های کروی و استوانه‌ای.....	۶۲
جدول ۳-۴	مقایسه شار نوترون‌ها در حجم برای کندکننده آب با هندسه کروی و استوانه‌ای.....	۶۳
جدول ۴-۴	شار نوترون‌های حرارتی محاسبه شده در سطح کره کندکننده‌های مختلف بر حسب شعاع.....	۶۶
جدول ۵-۴	مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در سطح کره کندکننده پارافین.....	۶۹
جدول ۶-۴	مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در حجم کره کندکننده پارافین.....	۷۲
جدول ۷-۴	مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در آشکارسازهایی به شعاع 1 cm در پارافین.....	۷۴
جدول ۸-۴	مقایسه شار نوترون‌ها در سطح کره پارافین به شعاع 7 cm در اثر افزودن ضخامت پارافین.....	۷۶
جدول ۹-۴	مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع 7 سانتی‌متر پارافین در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده.....	۷۸
جدول ۱۰-۴	مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع 7 سانتی‌متر پلی اتیلن در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده.....	۷۹
جدول ۱۱-۴	مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع 8 سانتی‌متر آب در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده.....	۸۰

جدول ۴-۱۲ برهم‌کنش‌های گامای منجر به تولید نوترون ۸۶

جدول ۴-۱۳ دز معادل برای گاما و نوترون بر حسب میلی سیورت بر ساعت برای حفاظ‌های مختلف چشمه Am-Be یک کوری در فاصله ۱,۳ متری از چشمه در کره ICRU ۱۰۵

جدول ۴-۱۴ دز معادل برای گاما و نوترون بر حسب میلی سیورت بر ساعت برای حفاظ‌های مختلف چشمه Am-Be یک کوری در فاصله ۱,۳ متری از چشمه در کره ICRU ۱۰۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ باریکه نوترون فرودی بر هدف نازک..... ۷
- شکل ۲-۱ وابستگی سطح مقطع به انرژی نوترون برای برخی عناصر..... ۱۲
- شکل ۱-۲ نمایش قانون عکس مجذور..... ۲۷
- شکل ۲-۲ کاهش شدت اشعه در اثر ضخامت HVL..... ۲۸
- شکل ۳-۲ پراکندگی الاستیک نوترون به وسیله هسته..... ۳۵
- شکل ۱-۳ چشمه امرسیوم-بریلیوم در محفظه دو لایه (مدل ۱۴.X)..... ۴۷
- شکل ۲-۳ طیف نوترون پیشنهادی موسسه استاندارد برای چشمه Am-Be (ISO ۸۵۲۹-۲)..... ۵۳
- شکل ۱-۴ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده پارافین در سطح کره و استوانه دارای حجم‌های برابر..... ۶۱
- شکل ۲-۴ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده آب در سطح کره و استوانه دارای حجم‌های برابر..... ۶۳
- شکل ۳-۴ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی در حجم برای کندکننده کروی و استوانه ای..... ۶۴
- شکل ۴-۴ مقایسه شار کل نوترون‌ها در حجم برای کندکننده کروی و استوانه ای..... ۶۴
- شکل ۵-۴ پیکربندی چشمه در کپسول محافظ و کندکننده اطراف آن در کد MCNP..... ۶۵
- شکل ۶-۴ نمودار شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده‌های مختلف بر حسب شعاع..... ۶۶
- شکل ۷-۴ نمودار شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده‌های مختلف بر حسب شعاع..... ۶۷
- شکل ۸-۴ نمودار شار نوترون‌های حرارتی در سطح کندکننده پارافین بر حسب شعاع..... ۷۰
- شکل ۹-۴ نمودار شار نوترون‌های غیرحرارتی در سطح کندکننده پارافین بر حسب شعاع..... ۷۰
- شکل ۱۰-۴ نمودار نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی به درصد بر حسب شعاع کندکننده..... ۷۱
- شکل ۱۱-۴ نمودار شار نوترون‌های حرارتی در حجم کندکننده پارافین بر حسب شعاع شعاع کندکننده..... ۷۳
- شکل ۱۲-۴ نمودار شار نوترون‌های غیرحرارتی در حجم کندکننده پارافین بر حسب شعاع شعاع کندکننده..... ۷۳
- شکل ۱۳-۴ نمودار نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی به درصد بر حسب شعاع کندکننده..... ۷۳
- شکل ۱۴-۴ مقایسه نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در محیط پارافین به کمک آشکارساز نقطه‌ای..... ۷۵
- شکل ۱۵-۴ مقایسه درصد افزایش شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در سطح کره پارافین به شعاع ۷cm در اثر افزودن ضخامت‌های بیشتر پارافین..... ۷۷
- شکل ۱۶-۴ پیکربندی چشمه نوترون در مرکز کندکننده و بازتابنده اطراف آن..... ۷۷
- شکل ۱۷-۴ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۷ سانتی‌متر پارافین در اثر افزودن ضخامت‌های سه بازتابنده..... ۷۹

- شکل ۴-۱۸ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۷ سانتی‌متر پلی اتیلن در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده ۸۰
- شکل ۴-۱۹ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۸ سانتی‌متر آب در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده ۸۱
- شکل ۴-۲۰ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در اثر افزودن ضخامت‌های بازتابنده برلیوم به کندکننده پارافین ۸۲
- شکل ۴-۲۱ مقایسه درصد افزایش شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در اثر افزودن ضخامت‌های بازتابنده برلیوم به کندکننده پارافین ۸۳
- شکل ۴-۲۲ مقایسه اثر بازتابنده‌های مختلف بر شار نوترون‌های حرارتی سطح کره کندکننده پارافین به شعاع ۳۱,۴۲ ۸۴
- شکل ۴-۲۳ بررسی شار نوترون‌ها در اثر افزودن بازتابنده برلیوم به اطراف کندکننده پارافین به شعاع ۳۱,۴۲ ۸۵
- شکل ۴-۲۴ سطح مقطع برلیوم برای نوترون به منظور شرکت در واکنش $(n, 2n)$ ۸۷
- شکل ۴-۲۵ مقایسه تغییرات شار نوترون حرارتی در سطوح کره فرضی داخل هندسه‌های پیشنهادی ۸۸
- شکل ۴-۲۶ مقایسه تغییرات شار نوترون‌های غیرحرارتی در سطوح کره فرضی داخل هندسه‌های پیشنهادی ۸۸
- شکل ۴-۲۷ هندسه بدون بازتابنده استفاده شده در محاسبات حفاظ ۸۹
- شکل ۴-۲۸ مقایسه تغییرات دز معادل برای گاما در اثر افزودن ضخامت حفاظ‌های مختلف در داخل حجم کره ICRU ۹۱
- شکل ۴-۲۹ مقایسه تغییرات دز معادل برای نوترون در اثر افزودن ضخامت حفاظ‌های مختلف در داخل حجم کره ICRU ۹۲
- شکل ۴-۳۰ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار نوترون در حجم کره ICRU ۹۲
- شکل ۴-۳۱ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار گاما در حجم کره ICRU ۹۳
- شکل ۴-۳۲ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار نوترون در حجم کره ICRU ۹۴
- شکل ۴-۳۳ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار نوترون در حجم کره ICRU ۹۵
- شکل ۴-۳۴ تغییرات دز معادل برای نوترون در اثر افزودن ضخامت پارافین، در داخل حجم کره ICRU برای چشمه یک کوری Am-Be ۹۶
- شکل ۴-۳۵ تغییرات دز معادل برای گاما در اثر افزودن ضخامت پارافین، در داخل حجم کره ICRU برای چشمه یک کوری Am-Be ۹۶
- شکل ۴-۳۶ تغییرات دز معادل برای گاما و نوترون در اثر افزودن ضخامت کنتریوم، در داخل حجم کره ICRU برای چشمه یک کوری Am-Be ۹۷
- شکل ۴-۳۷ تصویر هندسه نهایی پیشنهادی در کد MCNP ۹۸

فصل اول

فیزیک نوترون

و

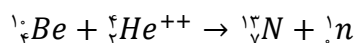
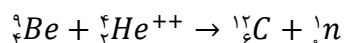
چشمه‌های نوترونی

۱-۱ مقدمه

پس از کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ توسط جیمز چادویک، این ذره بدون بار همواره از موضوعات مورد مطالعه دانشمندان فیزیک هسته‌ای بوده و با گذشت زمان کاربردهای مختلف آن رو به افزایش بوده است. با توجه به اینکه نوترون ذره‌ای ناپایدار و دارای نیمه عمری کوتاه است، به منظور استفاده از آن باید به صورت مصنوعی تولید شود. راکتورهای هسته‌ای به عنوان مهم‌ترین چشمه نوترون شناخته شده‌اند. راکتورها دارای ابعاد بسیار بزرگی هستند و تکنولوژی پیشرفته‌ای را می‌طلبند. همچنین وجود نگرانی‌های ایمنی و امنیتی و همچنین هزینه‌های گزاف نگهداری و تعمیر، استفاده از راکتورها را در بسیاری از امور غیرممکن کرده است. جایگزین مناسبی برای راکتورهای هسته‌ای شکافت، چشمه‌های نوترون می‌باشند. در این فصل به شناخت بیشتر فیزیک نوترون و برهم‌کنش‌های آن و بررسی انواع چشمه‌های نوترون و در نهایت کاربردهای باریکه نوترون پرداخته شده است.

۱-۲ تاریخچه کشف نوترون

تلاش‌های بی‌نتیجه زیادی برای پیدا کردن شواهدی مبنی بر پیشنهاد رادرفورد در رابطه با وجود نوترون صورت گرفت. در سال ۱۹۳۲ این موفقیت نصیب چادویک شد و وی در جریان تحقیقاتش بر روی اشعه نافذی که در تابش آلفا بر بریلیوم و بور پی به وجود نوترون برد.



هنگامی که دریافتند این اشعه می‌تواند پروتون‌های پر انرژی را از ترکیبات هیدروژن‌دار مانند پارافین به بیرون پرتاب کند نظرات پیشین از جمله این که اشعه‌های گامای بسیار پرانرژی موجب آن می‌شوند، به فراموشی سپرده شد. چادویک نشان داد که تمام شواهد با فرض وجود پرتوی از نوترون‌ها، با جرم نزدیک به پروتون و بار صفر تطبیق می‌کند. سپس، اندازه‌گیری‌های دقیق تر نشان داد که جرم نوترون حدود ۰٫۰۰۸۵ برابر

درصد بزرگتر از جرم اتم هیدورژن است. به دلیل خنثی بودن بار الکتریکی آن، نوترون‌ها یونش مستقیم در عبور از ماده ایجاد نمی‌کنند و بنابراین، به سهولت ذرات باردار قابل ردیابی نیستند. همچنین، آن‌ها در حالت آزاد پایدار نبوده و در اثر تجزیه به پروتون و الکترون (با نیمه عمری در حدود ۱۱ دقیقه) تبدیل می‌شوند. شاید به همین جهت بود که نوترون تا مدت مدیدی کشف نشده مانده بود [۱].

۱-۳ برهم‌کنش نوترون با ماده

نوترون‌ها ذراتی بدون بار هستند و تحت تاثیر الکترون‌های اتم و یا میدان الکتریکی ناشی از بار مثبت هسته قرار نمی‌گیرند. لذا نوترون‌ها پس از تولید بصورت خطوط مستقیم به حرکت خود ادامه می‌دهند و تنها در صورتی که با هسته برخورد انجام دهند از مسیر خود منحرف شده و در جهت جدیدی پراکنده می‌شوند یا جذب هسته می‌شوند. واکنش‌های نوترون بطور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: واکنش‌های پراکندگی و واکنش‌های گیراندازی. واکنش‌های دسته اول نوع هدف را عوض نمی‌کنند، بلکه طیف نوترون را تغییر می‌دهند، نوترون‌های سریع را کند نموده و توزیع آن‌ها را در فضای فاز تعدیل می‌نمایند. در مقابل، واکنش‌های گیراندازی، یک نوترون به هسته‌های هدف اضافه می‌کنند، هویت هسته‌ای هدف‌ها را با افزایش وزن اتمی آن‌ها تغییر می‌دهند.

بطور کلی بر این باور هستیم که واکنش‌های گیراندازی مستلزم تشکیل یک هسته مرکب با برانگیختگی بالا هستند، که سپس این هسته به سرعت با انتشار یک فوتون اشعه گاما، یا با دفع یک ذره یا ترکیبی از ذرات شامل فوتون‌ها، نوترون‌ها و ذرات آلفا، یا با شکستن هدف مرکب به دو پاره بزرگ به یک حالت پایدار بازمی‌گردد [۲].

نوترون می‌تواند به یکی از چند طریق زیر به هسته برخورد کند:

الف) پراکندگی الاستیک:

در این عمل نوترون به هسته که در تراز عادی است برخورد می‌کند، نوترون پس از برخورد از هسته دور شده و هسته در تراز پایه باقی می‌ماند. این برخورد هسته‌ای را به اختصار با علامت (n,n) نشان می‌دهند و به برخوردی اطلاق می‌شود که در آن مجموع انرژی‌های جنبشی نوترون و ذرات هسته هدف ثابت می‌ماند. برای برخوردهای سر به سر، انرژی‌های مربوطه به وسیله معادلات زیر داده می‌شوند:

$$E = \alpha^2 E_0 = \left[\frac{(M-m)}{(M+m)} \right]^2 E_0 \quad 1-1$$

$$E' = E_0 (1 - \alpha^2) \quad 2-1$$

که در آن E انرژی اولیه نوترون، E' و E به ترتیب انرژی‌های نوترون پراکنده و هدف، m و M به ترتیب جرم‌های نوترون‌های فرودی و هسته هدف هستند.

این معادلات نشان می‌دهند که در برخورد با هیدروژن، نوترون می‌تواند کلیه انرژی جنبشی خود را تنها در یک برخورد از دست بدهد، در حالیکه در برخورد با هسته‌های سنگین‌تر تنها قسمتی از انرژی اولیه از دست می‌رود. لذا برای کند نمودن نوترون‌ها معمولاً از مواد هیدروژن‌دار استفاده می‌شود.

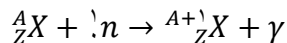
(ب) پراکندگی غیر الاستیک:

این عمل شبیه پراکندگی الاستیک می‌باشد با این تفاوت که هسته به حالت تحریک در می‌آید. چون پس از برخورد مقداری انرژی در داخل هسته باقی می‌ماند. این برخورد از نوع برهم‌کنش‌های انرژی گیر بوده و آن را با علامت (n,n') نشان می‌دهند. هسته تحریک شده با تابش اشعه گاما انرژی تحریک را از دست می‌دهد.

آستانه‌های پراکندگی غیرالاستیک با عناصری با اعداد جرمی متوسط و سنگین، بین ۱،۰ تا ۱ MeV است. در عناصر سبک این انرژی آستانه عموماً بیشتر است. به عنوان مثال انرژی آستانه برای اکسیژن تقریباً ۶MeV بوده و در هیدروژن پراکندگی غیرالاستیک کلاً رخ نمی‌دهد.

ج) جذب تابش زا:

در این حالت نوترون جذب هسته شده و یک یا چند گاما - که گامای جذبی نامیده می‌شود - تابش می‌گردد و این برخورد را انرژی زا نامیده و با (n, γ) نشان می‌دهند. این فرایند را می‌توان به صورت نمادی زیر نشان داد:



اغلب هسته‌های هدف پس از انتشار گامای آنی، ناپایدار بوده، بتای تاخیری و تشعشع گاما منتشر می‌کنند. در این صورت گفته می‌شود که آن‌ها فعال شده یا رادیواکتیو هستند. سطح مقطع‌های گیراندازی در گستره‌های بالایی قرار دارند که نمونه‌هایی از آن‌ها را در جدول زیر مشاهده می‌کنید.

جدول ۱-۱ مقایسه گستره سطح مقطع گیراندازی نوترون برای نوترون‌های حرارتی

عنصر	سطح مقطع (بارن)
${}^{10}\text{B}$	۳۸۳۷
${}^{11}\text{B}$	۰.۰۰۵
${}^{12}\text{C}$	۰.۰۰۳۵
${}^1\text{H}$	۰.۳۳
${}^{14}\text{N}$	۱.۷۰
${}^{35}\text{Cl}$	۴۳.۶
${}^{23}\text{Na}$	۰.۵۳۴
${}^{157}\text{Gd}$	۲۵۴۰۰۰
${}^{153}\text{Gd}$	۰.۰۲

د) واکنش‌های مولد ذرات باردار:

نوترون ممکن است در نتیجه برخوردهای جذبی از نوع (n, α) و (n, p) ناپدید شود. چنین برخوردهایی ممکن است انرژی‌زا یا انرژی‌گیر باشند. در نتیجه این برهم‌کنش‌ها ذرات بارداری مانند آلفا و پرتون تولید می‌شوند.

ه) واکنش‌های نوترون‌زا:

برخوردهایی هستند که در اثر آن‌ها یک نوترون جذب ماده شده و بیش از یک نوترون از آن ماده کنده می‌شود. مانند برهم‌کنش‌های $(n, 2n)$ و $(n, 3n)$ که عموماً با نوترون‌های پراثری رخ می‌دهند. بطور کلی سطح مقطع آن‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از سطح مقطع‌های واکنش‌های (n, γ) است. این برخوردها بدون شک انرژی‌گیر می‌باشند. زیرا در واکنش $(n, 2n)$ یک نوترون و در واکنش $(n, 3n)$ دو نوترون از هسته کنده می‌شود. واکنش $(n, 2n)$ در مواردی که محیط دارای آب سنگین یا برلیوم باشد، مهم می‌باشند زیرا 3H و 9Be دارای نوترون‌هایی هستند که به آسانی جدا می‌شوند.

و) واکنش شکافت:

در رابطه با بعضی از هسته‌های خاص، مانند اورانیوم و توریم، گیراندازی نوترون می‌تواند باعث شکسته شدن آن‌ها به دو پاره بزرگ و آزاد شدن مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی به همراه چندین نوترون گردد. این واکنش برای نگهداری یک واکنش زنجیره‌ای در راکتورهای هسته‌ای، بکار رفته و به عنوان چشمه‌ای از نوترون برای فعال‌سازی نوترونی مورد استفاده قرار گیرند.

انرژی مورد نیاز برای ایجاد شکافت بستگی به ویژگی‌های هسته‌ای هدف دارد، بطور مثال ^{235}U دارای سطح مقطع بزرگی برای نوترون‌های حرارتی (۵۴۹ بارن) است، در حالیکه ^{238}U تنها زمانی شکافته می‌شود که تحت پرتودهی نوترون‌های سریع قرار گیرد [۳].

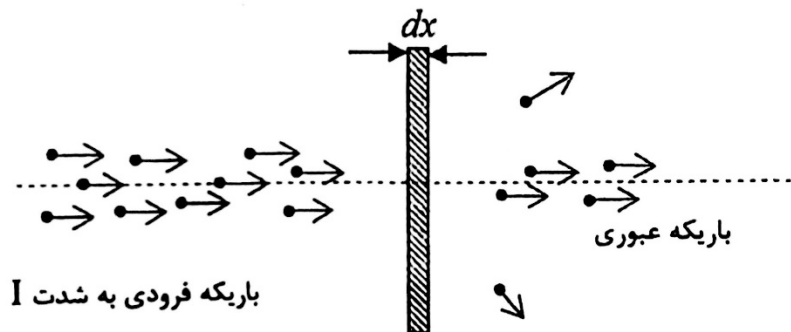
۴-۱ سطح مقطع نوترون

۱-۴-۱ سطح مقطع میکروسکوپی

واکنش‌های هسته‌ای رویدادهایی تصادفی و احتمالی هستند. احتمال وقوع این واکنش‌ها را می‌توان برحسب کمیتی به نام سطح مقطع بیان نمود. شاخص‌ترین واکنش‌های هسته‌ای که به صورت گسترده با پارامتر سطح مقطع بررسی می‌شوند، واکنش‌های نوترون با هسته اند. برای تعریف سطح مقطع، همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، باریکه‌ای از نوترون تک انرژی به شدت I بر لایه نازکی از ماده فرود می‌آید. فرض می‌شود که لایه هدف آن قدر نازک باشد که تمام هسته‌ها برای نوترون‌های فرودی قابل مشاهده باشند. تعریف شدت برای باریکه عبارت است از تعداد نوترونی که در واحد سطح عمود بر هدف می‌گذرد. اگر باریکه نوترون یکنواخت و شامل n ذره در واحد حجم باشد که با سرعت v در حرکت هستند شدت آن به صورت زیر داده خواهد شد:

$$I = nv$$

۳-۱



شکل ۱-۱ باریکه نوترون فرودی بر هدف نازک

آهنگ برخورد نوترون‌ها با هسته‌ها R ، متناسب با تعداد اتم‌ها در واحد حجم و ضخامت لایه است:

$$R \propto nVdx$$

و یا

$$R = \sigma nVdx$$

۴-۱

که در آن σ ضریب تناسب است. این ضریب تناسب که دارای ابعاد سطح است، سطح مقطع نامگذاری شده است. سطح مقطع را می توان همانند سطح موثری تصور کرد که هسته هدف برای واکنش خاص در اختیار ذره تابشی می گذارد. این سطح می تواند بزرگتر یا کوچکتر از سطح هندسی قرص هسته هدف باشد اما در هر حال مقدار بسیار کوچکی است. سطح مقطع را با واحد بارن (b) می سنجند که هر بارن معادل $10^{-28} m^2$ است. احتمال وقوع برهم کنش برابر است با احتمال برخورد ذره تابشی به سطح موثر هدف که هرچه این سطح بزرگتر باشد، احتمال برهم کنش نیز زیادتر خواهد بود. در اینجا به چند نکته کلی در مورد سطح مقطع برهم کنش نوترون اشاره می شود:

(۱) سطح مقطع ها، بخصوص برای واکنش های جذب و گیراندازی حتی وقتی انرژی نوترون فوق العاده کم باشد، می توانند مقادیر بزرگی داشته باشند.

(۲) سطح مقطع نوترون برای هر واکنشی به طور جداگانه تعریف می شود به عبارت دیگر برای هر رویداد نوترون با هسته σ_x خاصی که x نماد آن رویداد است، وجود دارد. در ادامه سطح مقطع واکنش ها معرفی شده اند:

سطح مقطع جذب σ_a

سطح مقطع گیراندازی پرتوزا σ_c یا σ_γ

سطح مقطع پراکندگی σ_s

سطح مقطع پراکندگی کشسان σ_{el}

سطح مقطع پراکندگی ناکشسان σ_{in}

سطح مقطع شکافت σ_f

۳) سطح مقطع‌های میکروسکوپی، روی یک هسته معین، برای مجموعه‌ای از برهم‌کنش‌های مستقل با هم جمع می‌شوند. به عبارت دیگر سطح مقطع‌ها خصوصیت جمع پذیری دارند [۴].

$$\sigma_s = \sigma_{el} + \sigma_{in}$$

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$$

$$\sigma_a = \sigma_c + \sigma_f + \dots$$

۱-۴-۲ سطح مقطع ماکروسکوپی

شکل دیگری از سطح مقطع که کاربردهای فراوانی دارد، سطح مقطع ماکروسکوپی است که به برهم‌کنش نوترون روی تمام هسته‌های واحد حجم هدف مربوط می‌شود و با Σ نشان داده می‌شود.

$$\Sigma = N\sigma \quad ۵-۱$$

مقدار N را می‌توان بر اساس تعریف آن از رابطه زیر بدست آورد:

$$N = \frac{\rho N_A}{A} \quad ۶-۱$$

که در آن ρ جرم ویژه محیط، N_A عدد آووگادرو و A عدد جرمی عنصر محیط است. Σ دارای واحد عکس طول است و می‌توان آن را احتمال برهم‌کنش نوترون در واحد طول مسیر دانست.

۱-۴-۳ پویش آزاد میانگین

یکی از کمیت‌هایی که در انتقال نوترون اهمیت دارد پویش آزاد میانگین است که عبارتست از میانگین مسافت بین دو برهم‌کنش متوالی. می‌توان نشان داد که مقدار این کمیت برابر است با:

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} \quad ۷-۱$$

λ بر اساس نوع برهم‌کنش، تعریف خاص خود را دارد. $\lambda_s = 1/\Sigma_s$ میانگین فاصله‌ای است که نوترون بین دو پراکندگی متوالی می‌پیماید. $\lambda_a = 1/\Sigma_a$ مسافت متوسطی است که نوترون از لحظه تولید در

محیط، یا از بدو ورود به محیط، می پیماید تا جذب شود و ... بطور مثال برای اورانیوم طبیعی که در آن $\Sigma_a = 0.39 \text{ cm}^{-1}$ است، $\lambda_a = 2.56 \text{ cm}$ می باشد [۵].

۱-۵ تغییر سطح مقطع ها با انرژی نوترون

در بسیاری از موارد سطح مقطع برهم کنش های نوترون ثابت نیستند و با توجه به انرژی نوترون تغییر می کنند. بطور کلی، سطح مقطع به نوع برهم کنش و عدد جرمی عنصر هدف وابسته است. برای عناصر سبک، سطح مقطع پراکندگی کشسان تا انرژی حدود ۱ MeV کم و بیش مستقل از انرژی است. برای عناصر سنگین، سطح مقطع پراکندگی کشسان در انرژی های پایین ثابت است و در انرژی های بالا دستخوش تغییراتی می شود. در پراکندگی کشسان معمولا عناصر سبک مورد توجه هستند، به طوری که به عنوان یک کلیت می توان δ_s را در تمام انرژی ها برای همه عناصر مورد نظر ثابت تلقی کرد. علاوه بر این، از یک عنصر به عنصر دیگر تغییرات فاحشی دیده نمی شود، و تقریبا تمام عناصر سطح مقطع های پراکندگی کشسان در گستره ۲ تا ۲۰ بارن است. (در این مورد، آب و آب سنگین استثنا هستند)

پراکندگی ناکشسان اصولا بین نوترون های انرژی بالا و عناصر متوسط و سنگین رخ می دهد و اهمیت آن از این بابت است که نوترون های انرژی بالا می توانند کسر بزرگی از انرژی خود را در پراکندگی ناکشسان با عناصر سنگین همچن اورانیوم از دست بدهند. پراکندگی ناکشسان با عناصر سبک از اهمیت چندانی برخوردار نیست زیرا انرژی آستانه ای که پایین تر از آن $\sigma_i = 0$ است، خیلی بالاست.

سطح مقطع های جذب، در مقایسه با سطح مقطع های پراکندگی کشسان، تغییرات خیلی بیشتری از خود نشان می دهند، و این نه تنها از یک ایزوتوپ به ایزوتوپ دیگر بلکه با تغییر انرژی نوترون نیز مشهود است. سطح مقطع برای بسیاری از ایزوتوپ های سبک، و در گستره بزرگی از انرژی متناسب با عکس سرعت نوترون است، یعنی:

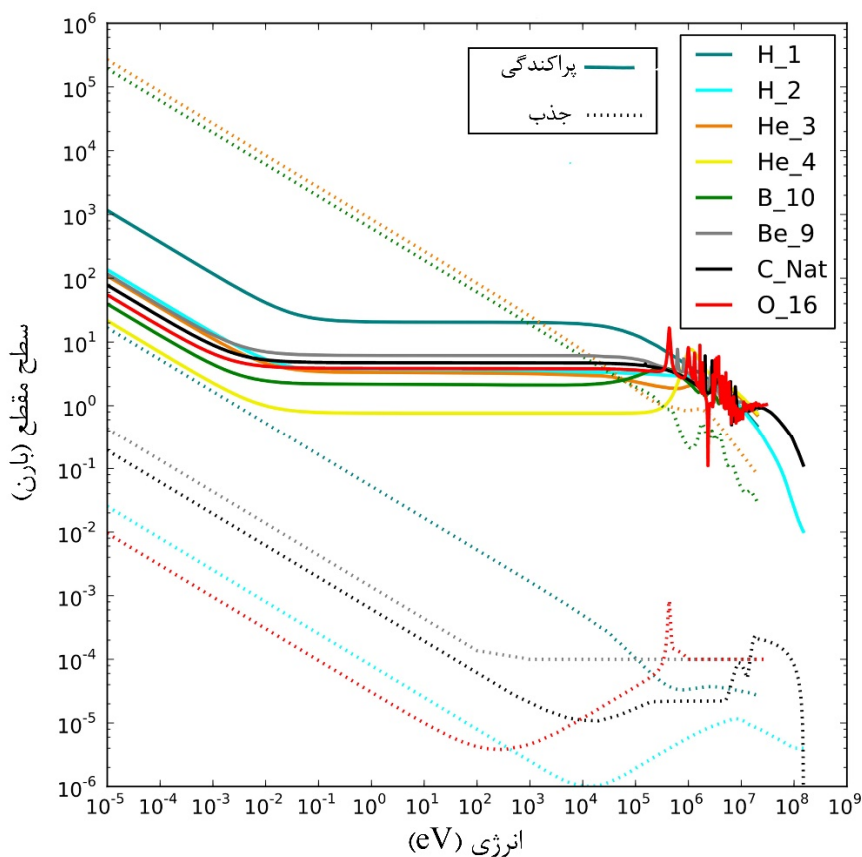
$$\sigma_a \propto \frac{1}{v} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

برای عناصر سنگین تغییر متناسب با $1/v$ در انرژی‌های پایین حدود ۱۰ eV مشاهده می‌شود. در گستره انرژی‌های میانی از حدود ۱۰ eV تا ۱۰۰۰ eV سطح مقطع، رفتار نامنظمی از خود نشان می‌دهد و به قله‌هایی موسوم به تشدید صعود می‌کند که در آن‌ها مقادیر سطح مقطع ممکن است خیلی بزرگ باشند. در انرژی‌های بالاتر از ۱۰۰۰ eV، تشدیدها از هم جدا نیستند و سطح مقطع به مقدار نسبتاً ثابت چند بارن می‌رسد.

ایزوتوپ‌های میان وزن رفتاری بین ایزوتوپ‌های سبک و سنگین دارند به طوری که تغییرات نوعی سطح مقطع آن‌ها در انرژی‌های پایین به صورت $\sigma_a \propto \frac{1}{v}$ ، سپس چند تشدید در انرژی‌های میانی، و بالاخره مقدار نسبتاً پایین و اندک متغیری در انرژی‌های بالاست. برخی از دلایل تغییرات رفتاری سطح مقطع جذب را می‌توان بطور کیفی بیان کرد. در انرژی‌های زیر ناحیه تشدیدها احتمال برهم‌کنش با مدت زمانی که نوترون در نزدیکی هسته سپری می‌کند تعیین می‌شود و این مدت زمان متناسب با عکس مقدار سرعت تغییر می‌کند. بنابراین، تغییرات سطح مقطع جذب به صورت $\sigma_a \propto \frac{1}{v}$ است.

برای توجیه قله‌های تشدید باید توجه داشت که ما با برهم‌کنش‌های شامل تشکیل هسته مرکب سر و کار داریم. هسته مرکب در انرژی $E_c + B$ ، که در آن B انرژی بستگی نوترون در هسته مرکب و E_c حاصل‌ضرب انرژی نوترون در $A/A+1$ است، تشکیل می‌شود. اگر انرژی نوترون طوری باشد که هسته مرکب در یک حالت برانگیخته، یا خیلی نزدیک به آن تشکیل بشود، احتمال وقوع برهم‌کنش زیاد خواهد بود، که این به معنای یک سطح مقطع بالاست. از طرف دیگر، اگر انرژی نوترون فرودی طوری باشد که هسته مرکب در انرژی بین دوتراز برانگیخته تشکیل بشود، احتمال وقوع برهم‌کنش کم و در نتیجه سطح مقطع پایین

خواهد بود [۶]. شکل زیر وابستگی سطح مقطع به انرژی برای برخی مواد سبک که در ادامه این تحقیق مورد استفاده قرار خواهند گرفت آورده شده است.

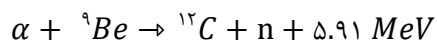


شکل ۱-۲ وابستگی سطح مقطع به انرژی نوترون برای برخی عناصر [۲. ENDF/B-VII.]

۱-۶ چشمه‌های نوترون

۱-۶-۱ چشمه α , Be

بسیاری از چشمه‌های نوترونی از برهم‌کنش α با ${}^9\text{Be}$ استفاده می‌کنند. طیف‌های این نوترون‌ها تا ۱۰ الی ۱۲ MeV گسترده است. ساطع‌کننده‌های متداول آلفا که در این مورد به کار رفته اند عبارتند از: ${}^{241}\text{Am}$ ، ${}^{239}\text{Pu}$ ، ${}^{210}\text{Po}$ ، Ra خواص اصلی چشمه‌ها در جدول زیر آورده شده است و برهم‌کنش عبارتست از [۷]:



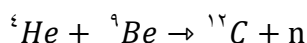
در این حالت ^{12}C در حالت برانگیخته 4.43 MeV قرار دارد.

جدول ۱-۲ خواص چشمه‌های نوترون برای واکنش $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ [۸]

ساطع کننده آلفا	^{210}Po	^{239}Pu	^{241}Am
بهره نوترون ($\text{n s}^{-1}\text{Ci}^{-1}$)	2.5×10^6	1.7×10^6	2.2×10^6
نیمه عمر	۱۳۸،۴ روز	۸۶،۴ سال	۴۵۸ سال
اندازه تقریبی ($\text{cm}^2 \text{Ci}^{-1}$)	۰.۱	۱۲	۳
گرمایش (mW Ci^{-1})	۳۲	۳۱	۳۳
دز گاما ($\text{rad h}^{-1} \text{Ci}^{-1}$)	۰.۱۱	۰.۰۸	$10(60\text{ eV}),$ $(0.1 \times 4.43\text{ MeV})$
	(4.43 MeV)	(4.43 MeV)	

با اختلاط پودر ریز بریلیوم با فلز پولونیوم یا اکسید امرسیوم، چشمه‌های Po-Be و Am-Be ساخته می‌شود. مخلوط یاد شده یا ترکیب بین فلزی، دوبار کپسول می‌گردد. در ۸۰ درصد برهم‌کنش‌های (α, n) ، هسته ^{12}C در حالت برانگیخته 4.43 MeV مانده و با تابش فوتون‌های گامای 4.43 MeV فروپاشی می‌کند. با وجود این، مقدار γ از حالت قبل یعنی Ra-Be پایین تر است.

ایزوتوپ پایدار بریلیوم ^9Be دارای یک نوترون مقید نسبتا سست است (با انرژی بستگی 1.7 MeV). هرگاه یک ذره آلفای حاصل از واپاشی پرتوزا ($5-6\text{ MeV}$) به هسته ^9Be برخورد کند، یک نوترون می‌تواند آزاد شود.



مقدار Q برای این واکنش مساوی 5.7 MeV است. هرگاه یک ماده گسیل کننده α با طول عمر طولانی نظیر ^{226}Ra را با ^9Be مخلوط کنیم، نوترون با آهنگ ثابتی تولید خواهد شد. از ^{226}Ra و دخترانش ذرات

آلفایی گسیل می‌شوند که انرژی‌شان در حدود ۵ تا ۸ MeV است، و از این رو نوترون‌هایی در اختیار خواهیم داشت که طیف انرژی آن‌ها تا حدود ۱۳ MeV می‌رسد. نوترون‌ها به دلایل زیر تک انرژی نیستند: (۱) استفاده از چند گروه آلفا، (۲) کند شدن ذرات آلفا در اثر برخورد در ماده جامد، (۳) راستاهای مختلف گسیل نوترون نسبت به ذرات آلفا (که راستاهایشان را نمی‌شناسیم)، (۴) امکان تولید ^{12}C در حالت‌های مختلف برانگیخته. محتملترین انرژی نوترون در حدود ۵ MeV و آهنگ تولید در حدود 10^7 نوترون در ثانیه برای هر کوری از ^{226}Ra است. به دلیل گسیل بالای گاما که از ^{226}Ra و دخترانش ناشی می‌شود، چشمه نوترون رادیم-بریلیم با چشمه‌های دیگری جایگزین شده است که در آن‌ها از ^{210}Po ، ^{238}Pu و ^{241}Am استفاده می‌شود. قدرت این چشمه‌ها در حدود $2-3 \times 10^6$ نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از اکتیویته آن‌ها است.

۱-۱-۶-۱ چشمه Am-Be

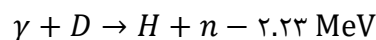
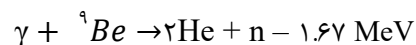
چشمه نوترون Am-Be یکی از رایج‌ترین چشمه‌های نوترون بوده که دارای کاربردهای مختلفی مانند استفاده در PGNA^۱ می‌باشد [۹]. این چشمه دارای بهره نوترن $2,2 \times 10^6$ در ثانیه به ازای هر کوری است و نیمه عمر آن حدود ۴۵۸ سال می‌باشد. در برخی موارد از این چشمه به عنوان چشمه گاما نیز استفاده شده است [۱۰]. گاماها در اثر جذب نوترون در مواد سازنده چشمه یا کندکننده و محیط اطراف چشمه ساطع می‌شوند. انرژی نوترون‌های تولید شده از این چشمه بین ۰ تا ۱۱ MeV می‌باشد و میانگین انرژی نوترون‌های آن ۴,۲ MeV است. که می‌توان با در نظر گرفتن کاربرد مورد نظر، از نوترون دارای انرژی مد نظر استفاده کرد [۱۱].

^۱ prompt gamma neutron activation analysis

ماده Am-Be بصورت گرمی فروخته می‌شود و هر گرم آن دارای اکتیویته در حدود ۰,۱۲۷ TBq یا ۳,۴ کوری می‌باشد. عمر پیشنهادی برای این چشمه ۱۵ سال است و پس از آن باید مجدداً توسط شرکت سازنده مورد ارزیابی قرار گیرد [۱۲].

۱-۶-۲ چشمه‌های فوتونوترونی :

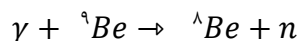
ساطع کننده‌های گاما در چشمه‌های فوتونوترونی بوسیله برلیوم یا دوتریوم (بصورت D₂O) احاطه شده و نوترون‌ها بوسیله واکنش (n, γ) ساطع می‌گردد [۱۳].



تعداد معدودی از رادیونوکلئیدها با نیمه عمر معقول، پرتوهای گاما با چنین انرژی‌های بالایی ساطع می‌کنند. به همین دلیل، همراه با مشکل برد بلند اشعه گاما کاربرد چنین چشمه‌های نوترونی بسیار محدود است. معمول ترین چشمه نوترون فوتونی بکار رفته ^{۱۲۴}Sb-Be است که نوترون‌های $26 \pm 1.5 \text{ eV}$ پخش می‌کنند. ^{۱۲۴}Sb از پرتودهی آنتیموان طبیعی در راکتور حاصل می‌گردد. این رادیونوکلئید چند اشعه گاما شامل فوتون‌های 1.692 MeV (با شدت ۰.۴۸) ساطع کرده و دارای نیمه عمری معادل ۶۰,۹ روز است. چشمه نوترونی دارای دو قسمت است، قلب (کره ای یا استوانه ای) ساخته شده از فلز آنتیموان پرتودیده و لایه ای از فلز برلیوم با ضخامت ۲ سانتی‌متر، بهره عملی تقریباً برابر 10^7 nS^{-1} بر یک کوری از ^{۱۲۴}Sb است.

در فرایندی مشابه فرایند چشمه‌های (α, n) که در بالا بحث شد، می‌توان واکنش‌های (γ, n) را برای ایجاد نوترون به کار برد. مزیت ایجاد فوتونوترون آن است که می‌توان نوترون‌ها را خیلی بیشتر تک انرژی ساخت، خصوصاً اگر چشمه فوتون تقریباً تک انرژی باشد. مثلاً ^{۲۴}Na پرتوهای گامای با انرژی ۲,۷۶ گسیل می‌کند.

جذب این فوتون برای غلبه بر انرژی بستگی نوترون در ${}^9\text{Be}$ کافی خواهد بود و در نتیجه واکنش زیر را خواهیم داشت:



بهره این فرایند قابل قبول است (2×10^6 نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از اکتیویته ${}^{24}\text{Na}$)، اما نیمه عمر ${}^{24}\text{Na}$ کوتاه (۱۵h) بوده و انرژی نوترون در حدود ۸ MeV، ۰ است.

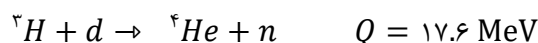
۱-۶-۳ شکافت خود به خود:

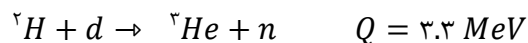
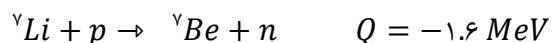
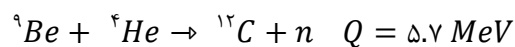
چشمه متداول حاصل از شکافت خود به خود، ایزوتوپ‌هایی نظیر ${}^{252}\text{Cf}$ است. نوترون‌ها مستقیماً در فرایند شکافت با آهنگی حدود ۴ نوترون در هر شکافت ایجاد می‌شوند. شکافت حدود ۳ درصد واپاشی‌ها را تشکیل می‌دهد (و بقیه از نوع واپاشی آلفا است)، آهنگ ایجاد نوترون 2.3×10^6 نوترون در ثانیه به ازای هر گرم از ${}^{252}\text{Cf}$ یا 4.3×10^9 نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از ${}^{252}\text{Cf}$ است. انرژی نوترون از مشخصه شکافت است و یک توزیع پیوسته با انرژی‌های متوسط ۱-۳ MeV را نشان می‌دهد.



۱-۶-۴ واکنش‌های هسته‌ای:

تعداد کمی از واکنش‌های هسته‌ای هستند که در آن‌ها نوترون ایجاد می‌شود. این امر نیاز به یک شتابدهنده برای ایجاد باریکه‌ای از ذرات دارد تا واکنش را آغاز کنند، و لذا استفاده از آن‌ها به آسانی کاربرد واپاشی پرتوزای چشمه مورد بحث بالا نیست. با این حال، با انتخاب دقیق انرژی تابشی و زاویه ای که در آن نوترون گسیل شده را مشاهده می‌کنیم، غالباً می‌توان باریکه تک انرژی قابل قبولی را برای هر انرژی به دست آورد. پاره ای از واکنش‌های مورد استفاده عبارتند از:





۱-۶-۵ چشمه راکتور:

شار نوترون در قلب یک راکتور شکافت هسته‌ای می‌تواند خیلی بالا، نوعاً 10^{14} نوترون در سانتی‌متر مربع در ثانیه، باشد. طیف انرژی تا ۷-۵ MeV ادامه می‌یابد، ولی قله در ۱-۲ MeV قرار دارند. انرژی این نوترون‌ها عموماً در داخل راکتور به انرژی گرمایی کاهش می‌یابد، ولی نوترون‌های سریع نیز در قلب راکتور حضور دارند. با ایجاد حفره کوچکی در حفاظ و محفظه راکتور می‌توان باریکه‌ای از نوترون‌ها را برای آزمایش‌هایی مختلف به داخل آزمایشگاه برد. شار نوترونی بالای حاصل از راکتور خصوصاً برای ایجاد ایزوتوپ‌های پرتوزا از طریق گیراندازی نوترون مورد استفاده اند، که نمونه آن تحلیل فعالسازی نوترونی است [۷].

۱-۷ طبقه بندی نوترون‌ها

باریکه‌های نوترونی را می‌توان در انواع مختلف واکنش‌های هسته‌ای ایجاد کرد. نوترون‌ها همانند ذرات باردار شتاب داده نمی‌شوند، ولی می‌توان از نوترون‌های با انرژی بالا شروع کرده و انرژی آن‌ها را از طریق برخوردهای با اتم‌های مختلف کاهش داد. نوترون‌ها بر اساس انرژی بصورت زیر دسته بندی می‌شوند.

جدول ۱-۳ طبقه بندی نوترون‌ها بر حسب انرژی [۱۴]

نوع نوترون	حدود انرژی
سرد	10^{-3} eV
حرارتی	0.05 eV
فوق حرارتی	$0.05 - 1 \text{ eV}$
تشدید	$1 \text{ eV} - 1 \text{ keV}$
میانی	$1 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$
سریع	$1 \text{ MeV} - 20 \text{ MeV}$

شایان ذکر است انرژی های مطرح شده در جدول فوق در مراجع مختلف اندکی اختلاف داشته و مقادیر ثابتی نمی باشند.

۱-۸ کاربردهای باریکه نوترون

استفاده از راکتورهای تحقیقاتی در توسعه صنعت هسته ای نقش مهمی داشت. با راه اندازی اولین راکتورها در آمریکای شمالی و اروپا در اواخر دهه ۱۹۶۰ استفاده از نوترون ها بسیار مورد توجه قرار گرفت. نوترون با توجه به ویژگی های منحصر به فرد خود با مواد مختلف به روش های متفاوتی برهم کنش می کند. نوترون ها نقش مهمی در شناسایی، پیشرفت و بررسی مواد مختلف در طول ۶۰ سال گذشته داشته اند. با استفاده از اندازه گیری دقیق نوترون های عبور کرده و پراکنده شده، ساختار و دینامیک مواد می تواند با روشی منحصر بفرد شناسایی شود و اطلاعات درباره مواد با این مطالعه بدست آید [۱۳].

۱-۸-۱ استفاده از پراکندگی نوترون

کاربرد پراکندگی نوترون بسیاری از شاخه های علم را فرا می گیرد، به عنوان مثال می توان به فیزیک، شیمی، علوم مواد، علوم مطالعه موجودات و همچنین بسیاری از شاخه های تحقیق و توسعه مهندسی اشاره کرد. در ادامه به برخی از کاربردهای پراکندگی نوترون اشاره شده است.

۱-۸-۱-۱ تعیین ساختار اتمی برای طراحی مواد

بسیاری از نوترون های تک فام بدون تغییر انرژی (با پراکندگی الاستیک) و در حالی که در برخی جهت های خاص تمایل بیشتری برای ادامه حرکت دارند (پراش)، نمونه را ترک می کنند. با شمارش نوترون ها بوسیله آشکارساز در حال چرخش، الگویی برای پراش بدست می آید که نشان دهنده موقعیت نسبی اتم ها در نمونه است. پراش نوترون معمولاً برای شناسایی پیشرفته مواد مورد استفاده قرار می گیرد [۱۵].

۸-۱-۲ اقتصاد هیدروژن و ذخیره سازی آن

مشکلات بنیادی و فنی مرتبط با اقتصاد هیدروژن محور در تمام مراحل چرخه تولید هیدروژن، ذخیره سازی، حمل و نقل و تبدیل انرژی قابل توجه هستند. به علت حساسیت نوترون ها به هیدروژن، استفاده از باریکه نوترون جهت بررسی مواد دارای پتانسیل مورد استفاده در انرژی هیدروژن مورد توجه قرار گرفته است. در زمینه توسعه پیل های سوختی، نوترون یک ابزار ایده آل برای مشاهده و بررسی هیدروژن ذخیره شده و سازوکار آزادسازی آن در ترکیبات مختلف است [۱۶].

۸-۱-۳ مغناطیس و ابر رسانایی

نوترون ها با کمک به شناخت ساختار مواد موجب افزایش دانش در زمینه تحقیق و توسعه ابررسانش شده اند. رفتار ابر رسانندگی ابررساناهای اکسید فلزات در دمای بالا به شدت به میزان تراکم و موقعیت اکسیژن ها در ساختار اتم دارد. با استفاده از پراش نوترون ها میزان تراکم و موقعیت اکسیژن ها را می توان مطالعه کرد.

۸-۲ رادیوگرافی نوترون

یکی از ویژگی های منحصر به فرد نوترون ها این است که آن ها بجای مشاهده ابر الکترونی اطراف هسته که توسط اشعه ایکس مشاهده می شود، خود هسته را مشاهده کرده و با آن واکنش می دهند. رادیوگرافی نوترون از این خصوصیت به منظور بررسی اتم های سبک در حضور اتم های سنگین استفاده می کند. از آنجایی که نوترون ها خنثی هستند و تا عمق زیادی نفوذ می کنند، رادیوگرافی نوترون یک تکنیک ارزیابی غیرمخرب است که آن را از رادیوگرافی فوتون متمایز می کند. واکنش نوترون ها با ماده از قوانین هسته ای بجای ویژگی های الکتریکی محیط پیروی می کند و این روش مکمل رادیوگرافی با اشعه ایکس است.

رادیوگرافی نوترون دارای کاربردهای صنعتی زیادی است، به عنوان مثال در صنایع حرکتی برای بازرسی موتورهای در حال کار استفاده می شود. دیگر کاربردها در بازرسی مواد هسته ای است به عنوان نمونه بررسی سوخت های هسته ای تحت تابش قرار گرفته و اجزاء راکتورهای قدرت [۱۷].

پیشرفت‌های جدید در آشکارسازی شامل روش تصویربرداری دینامیک با زمان واقعی با استفاده از دستگاه‌هایی مانند دوربین‌های (Charge-coupled Device (CCD نوترون‌ها را ابزاری همه کاره جهت بررسی مواد می‌سازد. در ادامه به برخی کاربردهای رادیوگرافی نوترون اشاره شده است.

۱-۲-۸-۱ تکنولوژی سوخت هسته‌ای

از رادیوگرافی نوترون به منظور بررسی غیرمخرب سوخت‌های هسته‌ای تازه تولید شده و سوخت‌های تحت تابش قرارگرفته استفاده می‌شود. ویژگی‌هایی که می‌تواند مورد آزمایش قرارگیرند عبارتند از: توزیع ایزوتوپ‌های شکافت پذیر، تغییرات در ترکیب سوخت، یکپارچگی و بدون نقص بودن قرص‌های سوخت، اندازه گیری‌های چند بعدی و تغییرات رخ داده در مواد غلاف سوخت و دیگر اجزای راکتور. همچنین در بررسی غیرمخرب سوخت‌های هسته‌ای غنی شده با اورانیوم و پلوتونیوم جهت تعیین یکپارچگی مواد شکافت پذیر از نوترون‌ها استفاده می‌شود. در توسعه سوخت‌های پیشرفته برای راکتورهای جدید، رادیوگرافی نوترون نقش مهمی را در بهبود و شناسایی سوخت‌های هسته‌ای دارد.

۱-۲-۸-۲ صنایع هوافضا

بررسی تیغه‌های موتور توربین، چسبندگی‌های در ساختارهای فلزی لانه زنبوری، پایش و کنترل خوردندگی در بال‌های هواپیما و بازیابی تجهیزات گرمایشی مورد استفاده در پرتاب سفینه فضایی به علت اهمیت بالای غیرمخرب بودن بررسی این قطعات بوسیله رادیوگرافی نوترون انجام می‌شود.

۱-۲-۸-۳ پزشکی و کشاورزی

رادیوگرافی نوترون کاربردهای خودش را در پزشکی و کشاورزی نیز پیدا کرده است. اثر گازهای گلخانه‌ای روی رشد گیاهان و شناسایی مواد میکرو اوگانسیم برخی از استفاده‌های این روش هستند. میزان موثر بودن لایه‌های محافظ برای نگهداری چوب نیز با استفاده از رادیوگرافی نوترون مطالعه می‌شود. همچنین حرکت آب در گیاهان و خاک که در مطالعات رشد گیاهان کاربرد دارد، با رادیوگرافی نوترون مطالعه شده است. از

کاربردهای این روش در پزشکی می توان به بررسی توزیع بور در BNCT به منظور درمان سرطان و بررسی دریاچه های قلب اشاره کرد. از دیگر کاربردهای ارزشمند آن می توان به بررسی و تهیه مواد برای دندان پزشکی اشاره کرد [۱۸].

۱-۸-۲-۴ مهندسی عمران

تشخیص جذب آب در مواد ساختمان سازی و استفاده از عوامل محافظ در نمونه های آجر با بکارگیری از رادیوگرافی نوترون انجام می شود. همچنین برای بررسی زمین شناختی مواد، شناسایی ترک ها در بتن و تشخیص منفذها در سنگ ها از این روش استفاده می شود. اگرچه تست غیرمخرب بتن عمدتاً با استفاده از روش های فراصوتی انجام می شود اما رادیوگرافی نوترون برای مطالعه صخره ها و مواد ساختمانی استفاده می شود.

۱-۸-۲-۵ صنایع تسلیحاتی

برخی مواد منفجره را می توان با استفاده از رادیوگرافی نوترون کشف کرد و می توان سیستم هایی طراحی کرد که بصورت آنی به تشخیص مواد منفجره در بسته بندی ها بپردازند [۱۹].

۱-۸-۲-۶ میراث فرهنگی

رادیوگرافی نوترون از اشیاء هنری مختلف اطلاعات مهمی درباره شیوه ساخت و تاریخ این اشیاء قیمتی و تاریخی را آشکار می کند.

۱-۸-۳ تحلیل فعال سازی نوترونی

در این روش نمونه را تحت تابش نوترون قرار می دهند و با استفاده از بررسی تابش های ساطع شده از آن، به شناسایی عناصر پرداخته می شود. این روش کاربردهای مختلفی در کشاورزی، صنایع غذایی و تغذیه، علوم جنایی، تحقیقات بنیادی و صنایع مختلف دارد. شناسایی ردیابی عناصر در مواد، توصیف نمونه های

باستان‌شناسی و بررسی آثار هنری مانند نقاشی‌ها، به وسیله تحلیل فعالسازی نوترون انجام شده است. یک کاربرد جدید این روش در تحلیل نمونه‌های جنایی است که این روش ویژگی‌های نمونه‌ها را آشکار می‌کند [۹].

۱-۸-۴ نوترون‌ها در نقش کاوشگر

ویژگی مهم نوترون‌های حرارتی که آن‌ها را به عنوان کاوشگر مطرح می‌کند، عبارتند از: الف) نوترون‌ها از نظر الکتریکی خنثی هستند و می‌توانند به صورت مستقیم با هسته‌های اتم‌ها برهم‌کنش کنند. ب) نوترون‌ها دارای ممان دوقطبی مغناطیسی هستند که از آن‌ها کاوشگری ایده آل برای مواد مغناطیسی می‌سازد. ج) طول موج آن‌ها می‌تواند به آسانی در بازه بین ۰.۵ nm تا ۲۰۰ nm تنظیم شود که محدوده فاصله بین اتمی و مولکولی را در ماده چگال پوشش می‌دهد. در نتیجه نوترون‌ها اغلب اطلاعاتی را که مکمل اطلاعات بدست آمده از مطالعات اشعه ایکس و طیف بینی الکترون است را فراهم می‌کند. به عنوان مثال در علوم زیست‌شناسی، هیدروژن و دوتریوم می‌توانند بصورت انتخابی به قسمت‌های مولکولی مشخص در حال کار مبادله شوند و در نتیجه این امکان وجود دارد که از روی تفاوت‌های مشاهده شده در نوترون پراکنده شده بیان کرد که کدام قسمت‌ها فعال هستند و کدام قسمت‌ها درگیر برهم‌کنش‌های بیوشیمیایی خاص نیستند.

۱-۹ راه‌های افزایش شار نوترون حرارتی در چشمه‌های نوترون

با توجه به بررسی‌ها و مطالعات انجام گرفته می‌توان نتیجه گرفت راه‌های افزایش شار نوترون حرارتی را به صورت زیر جمع بندی کرد:

۱- افزودن ماده کندکننده به پیکربندی چشمه

کندکننده ماده‌ای است که نوترون‌های سریع در آن محیط با انجام برخوردهای متوالی انرژی خود را از دست داده و به نوترون‌های کند تبدیل می‌شوند. ویژگی‌های لازم برای کندکننده یعنی عدد جرمی پایین، سطح مقطع جذب نوترون کم و سطح مقطع پراکندگی بالا گزینش را به چند ماده محدود می‌کند.

۲- افزودن ماده بازتابنده به پیکربندی چشمه

در راکتورهای هسته‌ای روش‌های مختلفی به منظور استفاده بیشتر از نوترون‌های تولید شده و جلوگیری از فرار و نشت آن‌ها به محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها که یکی از آنها استفاده از ماده بازتابنده است، می‌توانند منجر به استفاده بهینه از نوترون‌های تولید شده و در نتیجه کاهش میزان جرم سوخت لازم در راکتورها شوند. به علت اینکه در چشمه‌های نوترون نیز شرایطی تقریباً مشابه با راکتور را شاهد هستیم و نوترون‌های سریعی داریم که باید کند شده و از فرار آنها جلوگیری شود استفاده از ماده بازتابنده در چشمه نوترون نیز پیشنهاد می‌شود. این ماده دارای سطح مقطع جذب نوترون اندک و پراکندگی بالا است.

۳- استفاده از واکنش‌های جذب گاما که منجر به تولید نوترون می‌شود.

گاما در اثر جذب توسط برخی مواد منجر به تولید نوترون می‌شود. البته گاما و هدف باید شرایط خاصی را داشته باشند.

۴- استفاده از مواد تکثیر کننده نوترون

در این برهم‌کنش‌ها عموماً نوترون فرودی دارای انرژی زیادی است و در اثر برخورد به هدف بیش از یک نوترون از آن جدا می‌کند.

فصل دوم

حفاظت در برابر نوترون و کندسازی آن

۲-۱ مقدمه

حفظ سلامت فرد در حال کار با اشعه از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه است. در این فصل به آشنایی با اصول حفاظت در برابر پرتوها و بطور خاص نوترون‌ها پرداخته شده است.

۲-۲ اصول حفاظت در برابر پرتوها

بلافاصله پس از کشف پرتو X از آن برای کارهای درمانی استفاده شد. در طی چندین ماه تشخیص داده شد که پرتوها می‌توانند سبب تاثیرات مضر گردند. اولین مرگ گزارش شده از تابش پرتوها مربوط به همکار توماس ادیسون، کلارنس دالی بود. از آن واقعه به بعد تلاش‌های زیادی جهت توسعه ابزارها، تکنیک‌ها و روش‌های کنترل سطوح تابش‌ها و کاهش تابش‌های یونیزان غیرضروری به کارکنان و عموم مردم گردید. اصول اولیه حفاظت پرتویی قواعد ساده‌ای هستند که جهت اطمینان از ایمنی در نواحی تابشی برای کارکنان طراحی شده‌اند. در سال ۱۹۳۱ اولین توصیه برای محدود نمودن دز به وجود آمد. پس از آن انجمن‌های بین‌المللی بطور دائم دزهای پیشنهادی را مرور می‌کنند. یکی از اولین سازمان‌هایی که استانداردهایی جهت استفاده از پرتوها ارائه نمود کمیسیون بین‌المللی حفاظت در رادیولوژی ICRP^۲ بود. سپس در ایالات متحده آمریکا NCRP^۳ به وضع قوانین در رابطه با حفاظت در برابر پرتوها پرداخت [۲۰].

سه اصل اولیه برای حفاظت فعالیت‌های هسته‌ای زمان، فاصله و حفاظ‌گذاری است. در صورتی که این اصول به درستی به کار گرفته شوند تابش دریافت شده از محیط به حداقل خود می‌رسد.

۲-۲-۱ زمان

به حداقل رساندن مدت زمان صرف شده در محیط تشعشع، مقدار کلی تشعشع دریافتی را محدود می‌کند. با استفاده از رابطه زیر می‌توان کل دز دریافتی را در زمان پرتوگیری محاسبه کرد:

^۲ International Commission on Radiological Protection

^۳ National Council on Radiation Protection and Measurements

$$1-2 \quad \text{زمان} \times \text{آهنگ دز} = \text{کل دز}$$

زمان و تابش گیری از اشعه رابطه مستقیم دارند. اگر زمان صرف شده در محیط دو برابر شود، تابش گیری از اشعه نیز دو برابر خواهد شد. این رابطه را می توان با محاسبه زیر نشان داد:

$$2-2 \quad \frac{t_1}{t_2} = \frac{I_1}{I_2}$$

که t_1 = زمان اولیه تابش گیری، t_2 = زمان نهایی تابش گیری، I_1 = شدت اولیه، I_2 = شدت ثانویه می باشد.

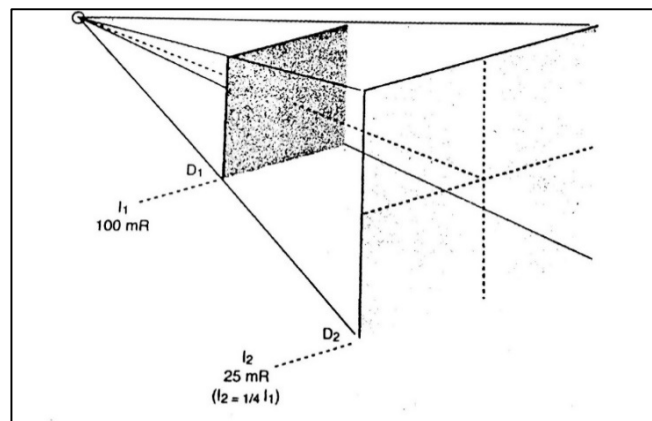
۲-۲-۲ فاصله

با افزایش فاصله بین منبع تشعشع و شخص میزان تابش به شدت کاهش می یابد. آهنگ دز پرتو (دز در واحد زمان) از یک منبع تشعشع با حجم کوچک با مربع فاصله از منبع ارتباط معکوس دارد. این رابطه قانون عکس مربع نامیده می شود. با دو برابر شدن فاصله از چشمه آهنگ دز پرتو به یک چهارم مقدار اولیه کاهش می یابد. فرمول قانون عکس مربع به صورت زیر بیان می شود [۲۱]:

$$3-2 \quad (I_1)(D_1)^2 = (I_2)(D_2)^2$$

که در آن I_1 شدت در فاصله D_1 از منبع و I_2 شدت در فاصله D_2 از منبع می باشد. و یا می توان نوشت:

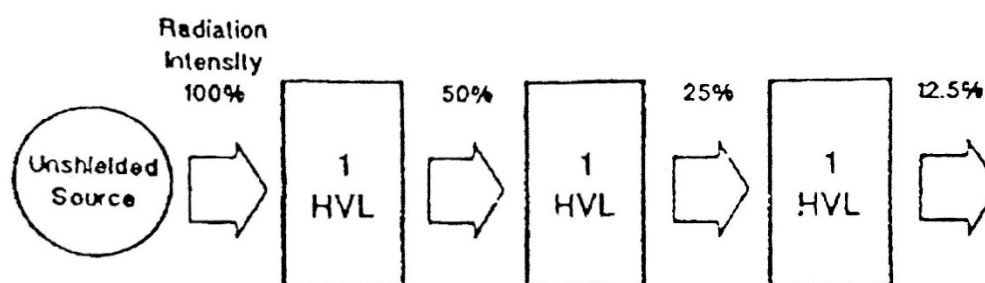
$$4-2 \quad \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \text{تغییر در تابش گیری در نتیجه افزایش فاصله}$$



شکل ۱-۲ نمایش قانون عکس مجذور

۳-۲-۲ حفاظ

سومین روش کاهش تابش گیری استفاده از حفاظ است. حفاظ متشکل از موانع ساختمانی ثابت (ساخته شده از بتن و سرب) یا وسایلی مانند حفاظهای متحرک است. ضخامت حفاظ با اصطلاح ضخامت نیم لایه HVL^۴ اندازه گیری می شود. این اصطلاح به معنای مقدار ماده مورد نیاز از هر عنصری است که بتواند تابش گیری را به نصف مقدار اول کاهش دهد. لایه ۰,۱ جذب را TVL^۵ می نامند.



شکل ۲-۲ کاهش شدت اشعه در اثر ضخامت HVL

جدول زیر میزان کاهش پرتو را در اثر ضخامت های مختلف HVL بیان می کند.

جدول ۱-۲ اثر ضخامت های مختلف HVL

تعداد ضخامت HVL	درصد میزان تابش اصلی	نسبت میزان تابش اصلی
۱	۵۰٪	۰.۵
۲	۲۵٪	۰.۲۵
۳	۱۲.۵٪	۰.۱۲۵
۴	۶.۳٪	۰.۰۶۳
۵	۳.۱٪	۰.۰۳۱
۶	۱.۶٪	۰.۰۱۶
۷	۰.۸٪	۰.۰۰۸
۸	۰.۴٪	۰.۰۰۴
۹	۰.۲٪	۰.۰۰۲
۱۰	۰.۱٪	۰.۰۰۱

^۴ Half Value Layer

^۵ Tenth Value Layer

جدول ۲-۲ HVL سرب را برای نوکلئیدهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به انرژی فوتون گسیل شده می‌توان مشاهده کرد با افزایش انرژی فوتون اولیه ضخامت بیشتری از سرب جهت حفاظسازی مورد نیاز است.

جدول ۲-۲ HVL سرب برای رایونوکلئیدهای مختلف

رادیونوکلئید	انرژی فوتون اولیه keV	HVL سرب mm
^{125}I	۲۷.۵	۰.۰۴
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	۱۴۰	۰.۲۷
^{51}Cr	۳۲۰	۲.۰
^{131}I	۳۶۴	۳.۰
^{18}F	۵۱۱	۴.۱
^{137}Cs	۶۶۲	۶.۵

۲-۳-۱ حفاظت در برابر نوترون‌ها

نوترون‌ها دارای بار الکتریکی نیستند و در برخورد با مواد به راحتی انرژی خود را از دست نمی‌دهند. حداکثر انتقال انرژی هنگامی رخ می‌دهد که نوترون با هسته اتم هیدروژن یعنی پروتون برخورد کند که دارای جرم مساوی با نوترون می‌باشد. اگر در برخورد بین نوترون و پروتون، پروتون رو به جلو حرکت کند، کلیه انرژی نوترون به پروتون انتقال می‌یابد و نوترون به سکون می‌رسد. میزان انرژی نوترون که در برخورد با مواد سنگین تر از هیدروژن می‌تواند انتقال یابد با افزایش عدد جرمی ماده کاهش می‌یابد. این موضوع با استفاده از روابط در قسمت‌های بعدی نشان داده شده است.

حفاظت‌گذاری در برابر نوترون‌ها بر پایه کندسازی نوترون‌های سریع و جذب نوترون‌های کم انرژی استوار است. به دلیل اینکه مواد هیدروژن‌دار نقش اساسی در کندسازی و تضعیف نوترون دارند، برای حفاظ از مواد هیدروژن دار مانند آب ، پارافین و غیره استفاده می‌شود.

هنگامی که نوترون انرژی خود را کاملاً از دست می‌دهد، جذب ماده حفاظ می‌شود و یک رادیوایزوتوپ گامازا تولید می‌نماید که باعث انتشار پرتوهای گاما از حفاظ چشمه نوترون می‌شود. بنابراین، برای طراحی حفاظ نوترون لازم است پرتوهای گامای ناشی از جذب نوترون در ماده را نیز در نظر گرفت. برای جذب پرتوهای گامای تولید شده در حفاظ اولیه نوترون لازم است از مواد سنگین مانند سرب به عنوان حفاظ ثانویه استفاده شود. بطور کلی، حفاظ چشمه‌های نوترونی از دو لایه تشکیل می‌گردد: لایه اول از مواد هیدروژن‌دار و لایه دوم از مواد سنگین مانند سرب به ضخامت کافی برای جذب گاماها تولید شده در لایه اول.

می‌توان از عناصری که جذب نوترون حرارتی بالایی دارند مانند ${}^6\text{Li}$ ، ${}^{10}\text{Be}$ ، ${}^{113}\text{Cd}$ و عناصر نادر خاکی مانند Sm، Eu، Gd و Dy برای جذب نوترون‌های حرارتی استفاده کرد. بتن نیز با توجه به قیمت بسیار مناسب و قابلیت شکل پذیری آن بیشترین کاربرد را به عنوان حفاظ دارد. مطالعات بسیاری بر روی حفاظ‌های بتنی انجام شده است و برخی از دانشمندان در تلاش بوده‌اند تا با افزودن ترکیبات دارای بور به بتن بر قابلیت جذب نوترون آن بیفزایند [۲۲].

توانایی حفاظ‌سازی در برابر نوترون برای مواد مختلف را می‌توان با استفاده از کمیت سطح مقطع ماکروسکوپی Σ_T که حاصل جذب تمام سطح مقطع‌های برهم‌کنش‌های نوترون از جمله برهم‌کنش‌های الاستیک و غیر الاستیک و برهم‌کنش‌های جذب نوترون (n,α) و (n,γ) است، بیان نمود. Σ_T احتمال این است که در هر واحد مسیر هر گونه برهم‌کنشی رخ دهد. این احتمال را با سطح مقطع σ_n به ازای هر هسته برای هر نوع برهم‌کنش بیان می‌کنند. هنگامی که کمیت فوق در N تعداد هسته‌ها در واحد حجم ضرب شود σ_n به Σ_T تبدیل می‌شود [۲۳].

$$\Sigma_{\text{tot}} = N \sigma_n \text{ and } \Sigma_{\text{tot}} = \Sigma_{\text{scatter}} + \Sigma_{\text{capture}} \dots \quad ۵-۲$$

۲-۳ اصل ALARA^۶

به منظور بالا بردن آگاهی‌ها در زمینه تکنیک‌های حفاظت در برابر اشعه و کاهش پرتوگیری شغلی^۷ NRC فلسفه‌ای به نام اصل ALARA (هرچه کمتر منطقی تر) را مطرح می‌کند. افرادی که نظریه ALARA را به عمل درمی‌آورند تلاش دارند که پرتوگیری خود را حتی المقدور به کمترین میزان در محدوده منطقی از نظر هزینه و نیاز برسانند.

۲-۴ کمیت‌های مورد استفاده در حفاظت پرتوی

۲-۴-۱ دز جذبی

دز جذبی کمیت اصلی بیان کننده انرژی به جا مانده در ماده است. واحدی که در گذشته برای دز جذبی مورد استفاده قرار می‌گرفته rad است که $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$ می‌باشد. در سیستم SI واحد دز جذبی ژول بر کیلوگرم است که گری (Gy) نامیده می‌شود و $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ می‌باشد. همچنین $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ می‌باشد.

۲-۴-۲ دز معادل

این کمیت بیانگر این است که آسیب بیولوژیکی به جا مانده از یک پرتو تنها به مجموع انرژی به جا مانده در ماده بستگی نداشته بلکه به نرخ انرژی به جا مانده در واحد طول هر ذره نیز وابسته است. (به نوع پرتو نیز وابسته است.) به عنوان مثال ذرات آلفا نسبت به الکترون‌ها آسیب بسیار بیشتری به ازای هر واحد انرژی ایجاد می‌کنند. دز معادل (H) توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$H = D \times Q \quad ۲-۶$$

که D دز جذب شده و Q فاکتور کیفیت پرتو می‌باشد در صورتی که دز بر حسب راد بیان شود، واحد دز معادل رم (rem) نامیده می‌شود و رابطه بصورت زیر می‌شود:

^۶ As Low As Reasonably Achievable

^۷ Nuclear Regulatory Commission

$$H(\text{rem}) = D(\text{rad}) \times Q$$

۷-۲

Q یک فاکتور است، بنابراین واحد ندارد. اگر دز جذبی بر حسب گری نوشته شود، واحد دز معادل سیورت (Sv) خواهد بود که واحد دز جذبی در سیستم SI نیز می باشد:

$$H(\text{Sv}) = D(\text{Gy}) \times Q$$

۸-۲

از روابط فوق می توان نتیجه گرفت $1\text{ Sv} = 100\text{ rem}$ می باشد.

فاکتور کیفیت Q پیشنهاد شده توسط ICRP در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۲-۳ فاکتور کیفیت برای تابش‌های مختلف [۲۴]

فاکتور کیفیت	نوع تابش و گستره انرژی
۱	فوتون‌ها در تمام انرژی‌ها
۱	الکترون‌ها و میون‌ها در تمام انرژی‌ها
۵	نوترون‌ها با انرژی کمتر از ۱۰ keV
۱۰	نوترون‌ها با انرژی بین ۱۰ keV تا ۱۰۰ keV
۲۰	نوترون‌ها با انرژی بین ۱۰۰ keV تا ۲ MeV
۱۰	نوترون‌ها با انرژی بین ۲ MeV تا ۲۰ MeV
۵	نوترون‌ها با انرژی بیش از ۲۰ MeV
۵	پروتون‌ها با انرژی بیش از ۲ MeV
۲۰	ذرات آلفا، پاره‌های شکافت، هسته‌های سنگین

۲-۴-۳ دز معادل موثر

به ندرت تابش به تمام بدن یکنواخت است. برای یک پرتودهی معین دریافت شده، بطور داخلی یا خارجی، دز معادل برای انواع بافت‌ها ممکن است به طور مشخص فرق داشته باشد. همچنین بافت‌ها در برابر اثرات پرتو حساسیت متفاوتی دارند. برای در نظر گرفتن این موقعیت‌های غیریکنواختی تابشی، دز معادل موثر توسط ICRP و NRCP ارائه گردید. دز معادل موثر (H_E)، مجموع دزهای معادل وزنی برای تابش بافتها یا ارگان‌ها تعریف شده که بصورت زیر است:

$$H_E = \sum W_T H_T$$

بطوریکه W_T فاکتور وزنی از بافت T و H_T میانگین دز معادل دریافت شده بوسیله بافت T می‌باشد. فاکتورهای وزنی بیانگر خطر نسبی بافت هنگامی که بدن مورد تابش یکنواخت قرار می‌گیرد، می‌باشد. جدول زیر تعدادی از فاکتورهای وزنی برای انواع مختلف بافت‌ها و ارگان‌ها را ارائه می‌دهد [۲۵].

جدول ۲-۴ فاکتور وزنی برای بافت‌های مختلف [۲۴]

عضو یا بافت	فاکتور وزنی
غده جنسی	۰.۰۸
مغز استخوان قرمز	۰.۱۲
شش	۰.۱۲
معهده	۰.۱۲
سینه	۰.۱۲
کلیه	۰.۰۴
کبد	۰.۰۴
مری	۰.۰۴
غده تیروئید	۰.۰۴
پوست	۰.۰۱
سطح استخوان	۰.۰۱
مغز	۰.۰۱
غدد بزاقی	۰.۰۱
سایر اعضا یا بافت‌ها	۰.۱۲

۲-۵ محدودیت‌های دز دریافتی

مسئله مهمی که توسط مراکز پرتودهی باید رعایت شود محدودیت در دز دریافتی کارکنان آن مجموعه است و مراجع خاصی با استفاده از تجهیزاتی نظیر فیلم بیج به پایش دائمی شرایط کارکنان می‌پردازند. پرتوکار نباید ملزم به کار بیش از حد با تابش (بحث زمان که در بخش حفاظت بیان شد) و یا کار با چشمه‌هایی که حفاظ مناسب ندارند، شود. از این رو کمیته‌های نظارت حدودی را برای دز دریافتی پرتوکاران و افراد عادی جامعه بیان کرده‌اند.

۲-۵-۱ حدود دز معادل موثر

توصیه‌های NCRP بر روی حدود تابشی پرتوکاران بر پایه معیارهای زیر می‌باشد:

الف) در تابش‌های سطح پایین، از اثرات غیرتصادفی بطور اساسی اجتناب شده است.

ب) پیش‌بینی خطر برای اثرات تصادفی نباید بزرگتر از میانگین خطر مرگ در بین کارکنان در صنایع بی‌خطر باشد.

ج) اصل ALARA باید رعایت شود تا خطر تا حد امکان پایین و در سطح منطقی و قابل قبولی نگه داشته شود، که به عنوان فاکتور اقتصادی اجتماعی به حساب آورده می‌شود.

۲-۵-۲ حدود دز پرتوکاران و افراد جامعه

دز معادل موثر سالیانه برای پرتوکاران از 5 mSv (5 rem) و مردم عادی یک دهم این مقدار (0.5 rem) برای پرتوگیری‌های غیر تکراری و از 1 mSv (0.1 rem) برای پرتوگیری‌های پیوسته و تکراری نباید تجاوز کند [۲۶].

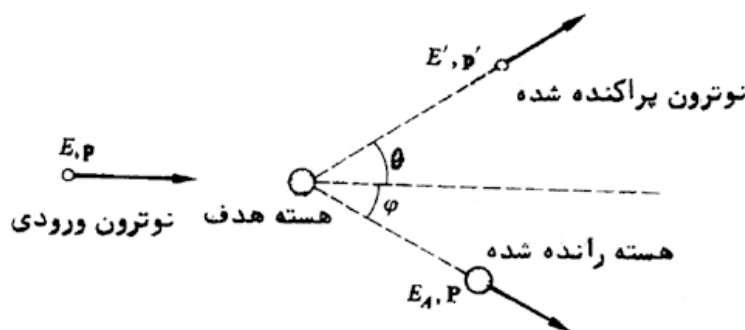
۲-۶ کاهش انرژی نوترون در برخوردهای پراکندگی

با توجه به اینکه موادی که سطح مقطع جذب بالایی برای نوترون‌های سریع داشته باشند بسیار محدود هستند، به منظور حفاظت در برابر نوترون‌ها ابتدا آن‌ها را در اثر برهم‌کنش‌های پراکندگی در محیط کند کرده و سپس نوترون‌های کند شده را (که جذب راحت‌تری دارند) جذب می‌کنند. در ادامه به مکانیزم کندشدن نوترون در اثر برخوردهای الاستیک که در افزایش شار نوترون‌های حراری نیز نقش دارند، اشاره شده است.

وقتی نوترون در نتیجه برخورد الاستیک با هسته‌هایی که در حالت سکون هستند، پراکنده می‌شود هسته از محل خود جابجا می‌شود. بنابراین انرژی جنبشی نوترون پراکنده شده نسبت به انرژی جنبشی نوترون

فرودی به اندازه انرژی هسته رانده شده کمتر می‌باشد. بدین ترتیب نوترون‌ها در اثر برخورد الاستیک حتی اگر انرژی داخلی هسته تغییر نکند، انرژی از دست می‌دهند.

کاهش انرژی در برخوردهای الاستیک را با استفاده از قوانین بقای انرژی و بقای اندازه حرکت می‌توان بدست آورد. فرض می‌کنیم E ، p ، E' ، p' به ترتیب انرژی جنبشی و بردار اندازه حرکت نوترون قبل و بعد از برخورد و E_A ، P انرژی و اندازه حرکت هسته رانده شده پس از برخورد می‌باشد. نوترون تحت زاویه φ پراکنده شده و هسته تحت زاویه θ جابجا می‌شود.



شکل ۳-۲ پراکندگی الاستیک نوترون به وسیله هسته

با توجه به اینکه برخورد الاستیک می‌باشد نتیجه می‌شود که

$$E_i = E' + E_A \quad ۱۰-۲$$

و با توجه به اصل بقای اندازه حرکت داریم:

$$\vec{P}_i = \vec{P}' + \vec{P}_A \quad ۱۱-۲$$

در نهایت برای انرژی نوترون پراکنده شده داریم [۲۷]:

$$E' = \frac{E_i}{(A+1)^2} [\cos \theta + \sqrt{A^2 - \sin^2 \theta}]^2 \quad ۱۲-۲$$

با توجه به رابطه فوق برای بدست آوردن حداقل و حداکثر انرژی نوترون پراکنده شده مقادیر π و صفر را به زاویه θ نسبت می دهیم:

الف) $\theta=0$

$$E'_{max} = \frac{E_0(A+1)^2}{(A+1)^2} = E_0 \quad 13-2$$

رابطه فوق بدین معنی است که نوترون به هسته برخورد کرده و بدون از دست دادن انرژی به راه خود ادامه می دهد.

ب) $\theta=\pi$

$$E'_{min} = \frac{E_0(A-1)^2}{(A+1)^2} = E_0 \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 = \alpha E_0 \quad 14-2$$

α که پارامتر برخورد نامیده می شود و به عدد جرمی هدف وابسته است، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \quad 15-2$$

بطور خاص در مورد پراکندگی نوترون به وسیله هیدروژن داریم:

$$E'_{max} = E_0$$

$$\alpha = 0 \rightarrow E'_{min} = 0$$

این پراکندگی منحصر به فرد می باشد. زیرا جرم نوترون و هسته هیدروژن (پروتون) تقریباً برابر هستند و به کمک مکانیک کلاسیک می توان نشان داد که معمولاً وقتی یک ذره با هم جرمش که در حال سکون است برخورد می کند نمی تواند در زاویه ای بزرگتر از 90° پراکنده شود. بنابراین برای به دست آوردن انرژی حداقل نوترون در برخورد با هیدروژن بایستی در معادله حداقل انرژی بایستی $\theta = \frac{\pi}{2}$ قرار داد [27].

۲-۶-۱ یافتن تعداد برخوردهای لازم جهت رسیدن نوترون به انرژی دلخواه

حال به دنبال این هستیم تا تعداد برخوردهایی که نوترون لازم است در محیطهای مختلف انجام دهد تا به انرژی مد نظر ما (در این تحقیق انرژی حرارتی) برسد را محاسبه کنیم. از آنجا که نمی توان تک تک نوترون ها را دنبال کرد در محاسبات نیاز به یک مقدار میانگین داریم. می پذیریم انرژی متوسط نوترون های پراکنده شده از رابطه زیر بدست می آید [۲۸]:

$$\overline{E'} = \frac{1}{2}(1 + \alpha)E. \quad ۱۶-۲$$

مقدار متوسط افت انرژی در هر برخورد $\overline{\Delta E}$ برابر است با:

$$\overline{\Delta E} = E - \overline{E'} = \frac{1}{2}(1 - \alpha)E. \quad ۱۷-۲$$

در نتیجه متوسط افت نسبی انرژی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\overline{\Delta E}}{E} = \frac{1}{2}(1 - \alpha) \quad ۱۸-۲$$

مقدار کسر فوق همواره مثبت خواهد بود، چون α عددی بین صفر تا یک می باشد. بیشترین افت انرژی وقتی $\alpha = 0$ باشد و در این برخورد نوترون می تواند تمام انرژی خود را از دست بدهد. در نتیجه هرچه α کوچکتر باشد (A کمتر باشد)، هسته کندکننده بهتری برای نوترون است و نوترون سریع تر به انرژی های پایین می رسد.

کمیتی به نام کاهش نسبی لگاریتمی انرژی بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$u = \ln\left(\frac{E_M}{E}\right) \quad ۱۹-۲$$

که E_M بالاترین انرژی نوترون در سیستم و E انرژی مورد نظر برای نوترون است.

آنچه برای ما اهمیت دارد کمیت $\overline{\Delta u}$ است که عبارتست از متوسط افت لگاریتمی انرژی نوترون در یک برخورد و با علامت ξ نشان داده می‌شود. می‌توان نشان داد که ξ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1} \quad 20-2$$

برحسب پارامتر برخورد α :

$$\xi = 1 + \frac{\alpha \ln \alpha}{1-\alpha} \quad 21-2$$

برای هسته‌های متوسط و سنگین ξ می‌توان با تقریب خوب از رابطه ساده زیر بدست آورد:

$$\xi \cong \frac{2}{A+2/3} \quad 22-2$$

در نهایت تعداد برخوردهای لازم برای رساندن نوترون از انرژی اولیه E به انرژی E از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{تعداد برخوردهای نوترون} = \frac{\ln(\frac{E_0}{E})}{\xi} \quad 23-2$$

با توجه به روابط فوق بهترین ماده کندکننده باید دارای عناصر سبک با پراکندگی بالا و سطح مقطع جذبی کوچک باشد. از بهترین و اقتصادی ترین انتخاب‌ها می‌توان به آب، آب سنگین، بریلیوم، گرافیت و هیدرید زیرکونیوم اشاره کرد.

جدول زیر مقدار ξ و تعداد برخوردهای لازم برای رساندن نوترون‌های دارای انرژی ۲ MeV به ۱ eV آورده شده است:

جدول ۲-۵ میانگین تعداد برخوردهای لازم برای رساندن انرژی نوترون از ۲ MeV به ۱ eV [۲۸]

کندکننده	H	D	H ₂ O	D ₂ O	He	Be	C	Na	Fe	²³⁸ U
ξ	۱	۰.۷۲۵	۰.۹۲۰	۰.۵۰۹	۰.۴۲۵	۰.۲۰۹	۰.۱۵۸	۰.۰۸۴	۰.۰۳۵	۰.۰۰۸
تعداد برخورد	۱۴	۲۰	۱۶	۲۹	۴۳	۶۹	۹۱	۱۷۱	۴۱۱	۱۷۳۰

۲-۷ بازتابنده

نقش بازتابنده بازگرداندن نوترون‌ها به درون محیط کندکننده است. موادی که می‌خواهند نقش بازتابنده را ایفا کنند باید قسمتی از نوترون‌ها را جذب نموده و قسمت دیگر را عبور دهد. آب سنگین بهترین بازتابنده است (توانایی بازتابندگی در حدود ۹۷ درصد) ولی به علت گرانی قیمت آن اغلب از آب معمولی (توانایی بازتابندگی ۸۲ درصد) و یا گرافیت (۹۳ درصد) جانشین می‌شود. برلیوم با توانایی بازتابندگی ۸۹ درصد و اکسید برلیوم با ۹۳ درصد می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند [۲۹].

۲-۸ کندکننده

کندکننده ماده‌ای است که برای کندنمودن یا حرارتی ساختن نوترون‌های سریع به کار می‌رود. بهترین هسته‌ها برای کندنمودن نوترون‌ها، آن‌هایی هستند که دارای جرم نزدیک به خود نوترون باشند. کندکننده‌ها باید سطح مقطع جذب نوترون پایینی باشند. بر همین اساس، انتخاب مواد کندکننده به چند عنصر مانند هیدروژن، دوتریوم، برلیوم و کربن محدود می‌شود. از طرف دیگر، چگالی کندکننده بایستی به اندازه‌ای باشد که بتواند برخوردهای کافی با نوترون ایجاد نماید و به همین دلیل است که گازها را نمی‌توان به عنوان کندکننده مورد استفاده قرار داد. در ادامه به بررسی برخی خواص کندکننده‌ها می‌پردازیم [۳۰]:

۲-۸-۱ آب معمولی

آب معمولی به علت فراوانی زیاد آن در طبیعت ارزانه‌ترین کندکننده‌ها محسوب می‌شود و همچنین هسته آن بسیار سبک و نزدیک به جرم نوترون بوده و خالص سازی آن به سادگی امکان پذیر است. عیب آب سبک این است که هیدروژن آن جذب نوترون نسبتاً زیادی دارد.

۲-۸-۲ آب سنگین

آب سنگین از بهترین کندکننده بوده ولی نقص آن گرانی نسبتاً زیاد آن می‌باشد. سطح مقطع جذب پایین ^2H نسبت به نوترون (52 mb , °) یکی از ویژگی‌های مهم این کندکننده می‌باشد. ماده اولیه لازم جهت تولید آب سنگین همان آب معمولی است که محتوی ۱۵,۰ درصد آب سنگین به صورت HDO و مقدار کمی به صورت D_2O است که به روش‌هایی از جمله الکترولیز، تقطیر جزء به جزء و تعویض ایزوتوپی می‌توان آن را تهیه کرد.

۲-۸-۳ بریلیوم

بریلیوم یکی از اجسام کندکننده با کیفیت بسیار عالی محسوب می‌شود و دارای توانایی کندکنندگی خوب، جذب ضعیف برای نوترون و چگالی کم ۱,۸۵ است. مقاومت مکانیکی آن بسیار عالی بوده و هادی خوبی برای گرما می‌باشد و در ۱۲۸۰ درجه سانتی گراد ذوب می‌شود. از لحاظ شیمیایی، مقاومت آن در مقابل اجسام مختلف نسبتاً زیاد است، بطوریکه در برابر هوا و CO_2 تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد و در مقابل آب تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد مقاومت می‌کند. برای تهیه بریلیوم از ترکیب معدنی آن به نام سیلیکات مضاعف آلومینیوم و بریلیوم به فرمول $6\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{BeO}$ استفاده می‌شود. مقدار BeO آن در حدود ده درصد جرم سیلیکات است. به علت نادر بودن بریلیوم در طبیعت و نیز سمی بودن آن و پیچیدگی در جدا ساختن بریلیوم از ترکیبات معدنی آن، این فلز نسبتاً گران است و در صنایع اتمی به حالت فلزی یا اکسید بریلیوم کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۸-۴ گرافیت

گرافیت کندکننده‌ای است که در اولین راکتورهای هسته‌ای به کار گرفته شد. به علت فشردگی کم و سنگینی نسبی اتم کربن خاصیت کندکنندگی آن به خوبی آب نیست با این وجود تهیه آن با خلوص بالا آسان تر بوده و نسبتا ارزان است. اختلاف زیاد بین چگالی نظری (۲,۲۵) و چگالی حقیقی (۱,۶ تا ۱,۷۵) وجود تخلخل زیاد را در این جسم نشان می‌دهد و در نتیجه دارای قابلیت نفوذ در مقابل گازها بوده و توسط برخی از آن‌ها نظیر هوا، گاز کربنیک و بخار آب در حرارت‌های بالا بطور ضعیف اکسید می‌شود. تهیه گرافیت به صورت کاملا خالص دشوار است. وجود ناخالصی‌هایی نظیر بور به غلظت 5×10^{-5} ppm^۱ به تنهایی می‌تواند جذب نوترون را تا ده درصد افزایش دهد و در نتیجه موجب از دست رفتن نوترون‌ها می‌شود.

۲-۸-۵ کندکننده‌های آلی

ترکیبات آلی به دلیل دارا بودن اتم‌های سبک نظیر هیدروژن و کربن می‌توانند کندکننده‌های مناسبی باشند. از این ترکیبات تنها ترکیبات حلقه‌ای از جمله پلی‌فنیل‌ها می‌توانند در مقابل تشعشعات هسته‌ای مقاومت نمایند. از بین پلی‌فنیل‌ها، دی‌فنیل‌ها و مخصوصا ترفنیل‌ها بیشتر از سایرین می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و اغلب مخلوط آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. کندکننده‌های آلی مزیت‌های دارای بودن فشار بخار کم (نقطه جوش آن‌ها بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد است) و قدرت خوردندگی کم (حتی کمتر از آب) اجازه می‌دهد از دستگاه‌های ساخته شده توسط فولادهای معمولی و آلومینیوم و غیره استفاده شایانی شود. وجود هیدروژن در آن‌ها ممکن است منجر به جذب نوترون شود. ترکیبات آلی نسبتا ناپایدار بوده و هنگامی که تحت حرارت‌های بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند و یا تحت اثر تشعشعات مختلف باشند، رادیولیز حاصل می‌نمایند، موجب خرد شدن مولکول‌ها و پلمیزه شدن آن‌ها توام با پیدایش مواد سنگینی به نام گودرون می‌گردد. پلی‌فنیل‌هایی که دارای پایداری قابل قبول در مقابل تشعشعات مختلف و حرارت

^۱ part per milion

هستند دارای قیمت نسبتاً زیادی می باشند. در برخی از راکتورهای پژوهشی از پلی اتیلن به عنوان کندکننده استفاده شده است [۳۱].

۲-۸-۶ هیدریدها

در برخی از راکتورهای تحقیقاتی از ترکیب هیدروژن یا فلزاتی که شرایط استعمال در راکتورها را داشته باشند نظیر زیرکونیوم، اورانیوم و غیره استفاده شده است.

فصل سوم

آشنایی با کد MCNPX

و

شبیه‌سازی چشمه Am-Be

۳-۱ مقدمه

با توجه به هزینه‌های زیاد آزمایش‌های هسته‌ای و دشواری و خطرات انجام این آزمایش‌ها، استفاده از کدهای هسته‌ای یک روش رایج و بصره جهت استخراج اطلاعات و تصحیح خطاها پیش از انجام آزمایش اصلی است. کد MCNP^۱ بر پایه روش مونت‌کارلو بوده و توانایی بسیار بالایی در شبیه‌سازی مسئله‌های مختلف دارد. در این فصل به بررسی روش مونت‌کارلو و آشنایی با کد هسته‌ای MCNP پرداخته شده است.

۳-۲ معرفی روش مونت‌کارلو

تقریباً اولین مرجع مونت‌کارلو به سال ۱۷۷۷ و نتیجه تحقیقات Comle de Buffon برمی‌گردد که روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو را برای یافتن احتمال پرتاب سوزن بر روی یک صفحه خط دار استفاده نمود. بعد از آن Laplace برنامه‌ای را پیشنهاد داد که مقدار عدد پی را تعیین می‌کرد. در سال ۱۹۹۴ مونت‌کارلو توسط Von Neuman و Ulam با پیشرفت سلاح‌های گرما هسته‌ای شکل جدیدی به خود گرفت و نام مونت‌کارلو نیز توسط این دو نفر با الهام گرفتن از شهری به این نام در فرانسه که دارای قمارخانه‌های فراوانی است، بر این روش شبیه‌سازی اطلاق گردید. آن‌ها مونت‌کارلو را به نحوی تعریف کردند که برای کامپیوترهای دیجیتال قابل فهم و استفاده بود.

ایده اصلی در روش مونت‌کارلو بدین صورت است که یک مدل آماری که با مسئله مورد نظر توافق داشته باشد ساخته شده و یا دقیقاً خود مسئله مورد نظر همانندسازی می‌گردد. در هر حالت، پارامترهای تصادفی مورد نیاز بر اساس قواعد خاصی ساخته می‌شوند و بر اساس آن‌ها چندین بار پدیده مورد نظر نمونه‌برداری می‌گردد و در پایان، نتایج بدست آمده بصورت آماری تحلیل می‌شوند. از این روش شبیه‌سازی با روش مونت‌کارلو را می‌توان یک آزمایش نظری دانست. در شبیه‌سازی ترابرد ذرات با این روش، تعداد زیادی ذره با توزیع‌های انرژی مکانی مختلف در هندسه‌های متفاوت از چشمه تابیده می‌شود. سپس کلیه اندرکنش‌هایی

^۱ Monte Carlo N-Particle

که برای آن‌ها رخ می‌دهد، بصورت آماری و با استفاده از توزیع‌های احتمالی مربوطه شبیه‌سازی می‌گردد، ضمن آن، اطلاعات مورد نیاز نیز ثبت می‌شوند. پیگیری حرکت هر ذره از زمانی که از چشمه تابیده می‌شود تا زمانی که جذب یا از سیستم خارج یا انرژی آن از مقدار مشخصی کمتر می‌شود و یا به هر دلیل دیگری حذف گردد ادامه می‌یابد.

از مزایای روش مونت کارلو این است که مسائل نسبتاً پیچیده را می‌توان به صورت ساده‌ای حل کرد و از طرفی تصحیح‌های لازم را بدون دردسرهای زیاد اعمال نمود. مزیت مهم آن در ترابرد پرتوها و ذرات هسته‌ای، در مقایسه با دیگر روش‌ها، امکان به کارگیری آن در مورد هر شکل هندسی با هر پیچیدگی می‌باشد. از معایب روش مونت کارلو زیاد بودن تعداد محاسبات و در نتیجه بالا بودن زمان اجرای برنامه‌های کامپیوتری مربوطه است، بطوریکه برای افزایش یک رقم معنی‌دار به نتایج محاسبات، زمان اجرای برنامه کامپیوتری تقریباً صد برابر می‌شود [۳۲].

۳-۳ کد MCNP

کد MCNP یک کد چند منظوره مستقل از زمان است و توسط آزمایشگاه بین المللی لوس آلاموس تهیه و گسترش داده شده است. این کد می‌تواند به منظور آنالیز انتقال نوترون، فوتون، الکترون، پرتون و سایر ذرات به تنهایی و با هم به کار برده شود.

انواع برهم‌کنش‌هایی که در MCNP در نظر گرفته شده اند عبارتند از:

الف) نوترون‌ها:

پراکندگی کشسان و ناکشسان، جذب، شکافت، تولید فوتون و پراکندگی نوترون‌ها در انرژی پایین.

ب) فوتون‌ها:

(۱) پراکندگی کامپتون (ناهمدوس)

(۲) پراکندگی رایلی (همدوس)

(۳) اثر فوتوالکتریک

(۴) تولید زوج

این کد قابلیت‌های زیادی در توصیف شکل‌های هندسی چشمه، چشمه‌های بحرانی، سطحی و قابلیت‌های گرافیکی نمایش هندسه مسئله و جواب‌ها و درستی آن به مجموعه وسیعی از اطلاعات کتابخانه‌ای همچنین مشخص کردن نوع خواسته‌های کاربر را دارا می‌باشد. خواسته‌ها همان نتایجی است که کاربر از برنامه انتظار دارد.

کمیات فیزیکی در این کد با واحدهای زیر به کار می‌روند:

جدول ۱-۳ واحد کمیت‌های فیزیکی در کد MCNP

نوع کمیت	طول	انرژی	زمان	دما	چگالی اتمی	چگالی جرمی	سطح مقطع	عدد گرمایی
واحد	cm	MeV	Shake	MeV	Atom/Barn.cm	g/cm	barn	MeV/collision

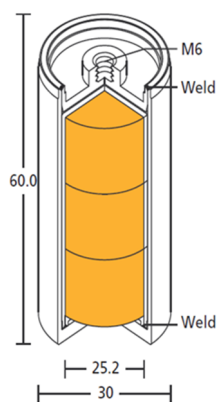
۳-۴ بکارگیری کد MCNP جهت شبیه‌سازی چشمه Am-Be

برای استفاده از کد MCNP باید اطلاعات لازم و دقیق توسط یک فایل ورودی به برنامه داده شود، که این امر باعث بدست آوردن جواب‌های دقیق و قابل اعتماد در فایل خروجی می‌باشد. بدیهی است برای رسیدن به نتیجه مطلوب، این اطلاعات، اعم از هندسه سیستم، مواد بکار رفته و توزیع آن‌ها، چشمه و ویژگی آن و ... باید تا حد امکان منطبق بر سیستم آزمایش باشد.

اطلاعات مورد نظر در فایل ورودی از میان کارتهای ورودی کد MCNP انتخاب و در فایل ورودی گنجانده می‌شود. منظور از یک کارت یک خط ورودی MCNP است که شامل دستورالعمل‌های لازم در مورد چگونگی شبیه‌سازی هندسه مسئله، خواسته‌های مختلف و ... است. این کد برای نوشتن فایل ورودی دارای محیط خاصی نیست و فایل ورودی بصورت txt نوشته می‌شود. در حین اجرا، با دستور خاصی که به کد داده می‌شود هر نتیجه بدست آمده در فایل خروجی با عددی به عنوان خطای نسبی همراه است که از تقسیم مقدار تخمینی انحراف معیار S_N بر میانگین تخمینی X بدست می‌آید. بررسی یک نتیجه خروجی خوش رفتار خطای نسبی با $\frac{1}{\sqrt{N}}$ متناسب است که N تعداد تاریخچه‌های بررسی شده است.

از انواع مختلف چشمه‌های Am-Be موجود، در این مطالعه از مدل X.۱۴ استفاده شده است که ابعاد و تصویر شماتیک آن در شکل (۱-۳) آورده شده است. این چشمه از ترکیب فشرده اکسید امرسیوم AmO_2 با پودر فلز بریلیوم که در محفظه دولایه فولادی قرار گرفته است تشکیل شده است [۱۱].

در ادامه نحوه کار با کد و وارد کردن اطلاعات لازم در فایل ورودی جهت شبیه‌سازی این چشمه به عنوان مثالی کاربردی توضیح داده شده است.



شکل ۱-۳ چشمه امرسیوم-بریلیوم در محفظه دولایه (واحدها میلی‌متر است) (مدل X.۱۴)

۳-۴-۱ ساختار ورودی MCNP جهت شبیه سازی چشمه Am-Be

جهت شبیه سازی چشمه Am-Be به اطلاعات زیر در یک فایل ورودی MCNP نیاز است:

(۱) هندسه چشمه و محیط اطراف آن: باید هندسه چشمه مطابق با ابعاد موجود توسط سطح‌ها و

حجم‌ها به خوبی تعریف شود.

(۲) عناصر و مواد به کار رفته: نوع عناصر، ترکیبات شیمیایی آن‌ها و ویژگی‌های فیزیکی باید بر اساس

دستورالعمل مربوطه برای کد تعریف شود.

(۳) مکان و ویژگی‌های چشمه Am-Be: علاوه بر تعیین موقعیت مکانی چشمه (مختصات آن) برای

برنامه، بسته به این که چشمه دارای چه شکل هندسی است (منظور نقطه‌ای، سطحی و یا حجمی)

باید از تعاریف مربوطه استفاده کرد. همچنین اگر چشمه تک انرژی و یا دارای طیف انرژی است

باید برای کد معین شود. که در اینجا طیف انرژی نوترون‌های چشمه به صورت هیستوگرام به کد

داده شد.

(۴) خواسته‌ها: نوع خروجی و خواسته مورد نظر در برنامه، شامل شار حجمی، شار سطحی و ... باید

برای کد تعریف شوند.

(۵) تعداد ذره‌ها: این که کد چه تعداد از یک ذره خاص را انتخاب و تاریخچه آن را پیگیری کند بسته

به مقداری دارد که باید به برنامه بدهیم. انتخاب تعداد زیاد ذره، اگرچه زمان محاسبه را طولانی

می‌کند، اما نتایج مطلوب تری را تحویل می‌دهد و باعث کاهش خطا می‌شود.

فایل ورودی MCNP دارای سه بلوک اصلی است که این بلوک‌ها به وسیله یک خط خالی از هم تفکیک

شده‌اند. در ادامه به بررسی ساختار فایل ورودی پرداخته می‌شود:

الف) سلول‌ها:

سلول در MCNP به معنی محیطی شامل یک ماده مشخص که با سطوح معینی از هم جدا می‌شوند، می‌باشد. به عنوان مثال در این تحقیق خود چشمه دربردارنده ترکیب Am-Be به عنوان یک سلول و محیط کند کننده به عنوان سلول دیگر در نظر گرفته شده است. هر سلول توسط یک یا چند سطح تعریف می‌گردد و شکل کلی تعریف سلول به صورت زیر است:

j m d geom params

j: یک شماره شناسایی است که به یک سلول معین نسبت داده می‌شود و در هر مسئله تا صد هزار سلول برای کد قابل تعریف است.

m: شماره ماده ای است که سلول توسط آن پر گردیده است و در قسمت تعریف ماده معرفی می‌گردد. در صورتی که در سلولی خلاء باشد آن را با صفر نشان می‌دهیم.

d: چگالی ماده پرکننده سلول است و می‌تواند مقادیر مثبت و منفی را بگیرد. با علامت منفی به معنی چگالی جرمی بر حسب gr/cm^3 و با علامت مثبت چگالی اتمی بر حسب $atom/cm^3$ می‌باشد. در صورتی که سلول خالی باشد این قسمت وجود ندارد.

geom: در این قسمت شماره سطوحی که سلول را احاطه کرده اند مشخص می‌شود و بسته به اینکه سلول در کدام طرف صفحه مختصات واقع شده است علامت متناسبی به آن اختصاص داده می‌شود. در واقع این قسمت هندسه مسئله را مشخص می‌کند.

params: توضیحات اختیاری از پارامترهای سلول را با استفاده از کلمات کلیدی می‌توان در این قسمت وارد کرد.

به عنوان مثال سلول شماره یک که ماده اصلی چشمه است، به صورت زیر تعریف شده است که اعداد به ترتیب بیان گر کمیت‌های مطرح شده در بالا هستند:

۱ ۲ -۱.۲۴ -۱ -۴ ۵

(ب) سطوح:

سطوح شامل صفحه، استوانه، کره، مقاطع مخروطی و ... می‌باشد که بنا به شرایط مسئله و هندسه آن در این دستور قرار می‌گیرد. به عنوان مثال PX, PY, PZ به معنی صفحات عمود بر محورهای X, Y, Z و CX, CY, CZ به معنی استوانه‌های در راستای محورهای می‌باشد. و به همین ترتیب برای سایر هندسه‌ها سطوح مناسبی تعریف می‌شوند. ساختار کلی سطوح به صورت زیر بیان می‌شود.

j n a list

در شبیه سازی های مورد استفاده از سطوح کره، استوانه، صفحات استفاده شده است.

(پ) ثبت اطلاعات

بعد از اتمام بخش سلول‌ها و سطوح، یک خط خالی گذاشته و از این قسمت به بعد بخش اطلاعات فایل ورودی می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه سازی این پژوهش شامل مورد زیر است:

۱- نوع مسئله problem type

۲- تعریف چشمه Source specification

۳- خروجی‌های درخواستی tally specification

۴- تعریف مواد و سطح مقطع‌ها material and cross section specification

۵- خاتمه دهنده مسئله problem cutoffs

۳-۴-۲ دستورات لازم در کد MCNP

۳-۴-۲-۱ دستور تعریف نوع مسئله

در این خط دستور، فایل ورودی نوع ذرات موجود در مسئله که برای کاربرد مهم است معرفی می‌شود و نحوه نوشتن آن به صورت زیر است:

mode $x_1 \dots x_i$

که x_i برای نوترون با n برای فوتون با p و برای الکترون با e جایگزین می‌شود. در این تحقیق فقط از mode n p استفاده شده است. چون با نوترون ها و فوتون ها سروکار داریم.

۳-۴-۲-۲ دستور تعریف چشمه

یکی از مهمترین قسمت‌های هر فایل ورودی چگونگی چشمه پرتوزا و همچنین شرایط آن می‌باشد. از آنجا که در این پژوهش از چشمه‌های معمولی استفاده می‌شود به ذکر چگونگی استفاده از آن در فایل ورودی می‌پردازیم.

فرم کلی تعریف چشمه به صورت زیر است:

SDEF Source variable=Specification

متغیرهای یک چشمه عمومی مشخص کننده حالت چشمه، چگونگی پرتوزایی و دیگر خواص آن می‌باشد. این متغیرها بطور خلاصه در جدول زیر آورده شده اند.

جدول ۲-۳ متغیرها در تعریف چشمه در کد MCNP

متغیر	مفهوم	مقدار پیش فرض
CEL	سلولی که چشمه در آن تولید می‌شوند.	با توجه به X,Y,Z تعیین می‌شود.
ERG	انرژی ذرات چشمه	۱۴ MeV
POS	نقطه مرجع برای انتخاب مکتب اولیه ذرات چشمه	نقطه (۰، ۰، ۰)
X,Y,Z	مختصات محل تولید ذره چشمه در مختصات کارتزین	
PAR	تعیین نوع ذره ۱=نوترون ۲=فوتون ۳=الکترون	با توجه به کارت mode

خصوصیات متغیرهای چشمه یکی از سه شکل زیر را دارد:

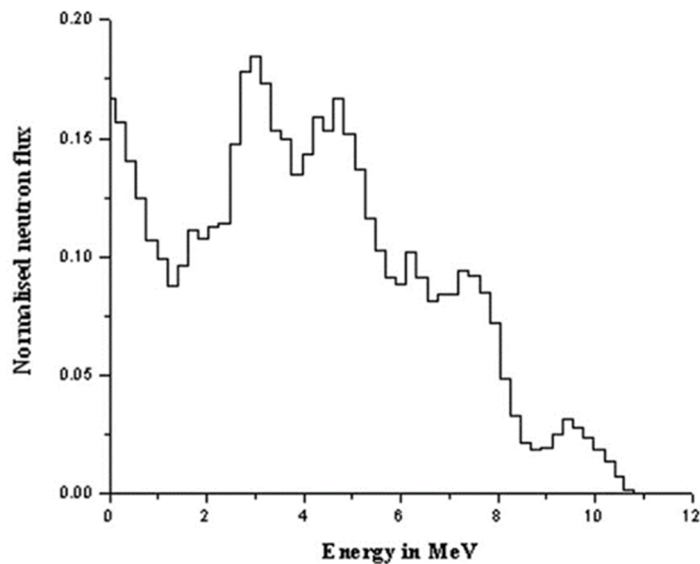
$$(۱) \text{ مقدار صریح، مانند } \text{ERG}=۲$$

$$(۲) \text{ یک توزیع که با پیشوند D نشان داده می‌شود، مانند } \text{ERG}=d\Delta$$

$$(۳) \text{ وابسته به یک متغیر دیگر که با پیشوند F نشان داده می‌شود، مانند } \text{ERG}=F_{\text{pos}}$$

تعریف متغیرها با استفاده از موارد ۲ و ۳ نیازمند استفاده از کارت‌های دیگری است. این کارت‌ها عبارتند از:

دستور اطلاعات چشمه SI (source information) و دستور احتمالات چشمه SP (source probability) چون در چشمه نوترون Am-Be طیف نوترون داریم و نوترون‌ها تک انرژی نیستند با استفاده از کارت‌های فوق طیف نوترون را در دستور ورودی وارد کردیم. طیف‌های انرژی مختلفی با استفاده از داده‌های تجربی و همچنین شبیه‌سازی‌ها برای نوترون‌های حاصل از چشمه Am-Be پیشنهاد شده است [۳۳]. شکل (۲-۳) طیف مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد که از مرجع استاندارد ISO استخراج گردیده است [۳۴].



شکل ۳-۲ طیف نوترون پیشنهادی موسسه استاندارد برای چشمه Am-Be ISO ۸۵۲۹-۲

۳-۲-۴-۳ تعریف خروجی Tally card مورد استفاده

در این محاسبات نیاز به محاسبه شار و انرژی در سطح و حجم و استفاده از آشکارساز شدیم که در ادامه به معرفی تالی های لازم پرداخته شده است:

دستور کلی خروجی بصورت Fna می باشد.

Fn: Pl S₁...S_k

n: شماره مربوط به نوع خروجی است.

Pl نوع ذره را مشخص می کند.

Si: شماره سطح یا سلول برای خروجی و یا T می باشد. بطور استاندارد برای نوترون ۶ مورد، برای فوتون ۶ مورد، برای الکترون ۵ مورد خروجی تعریف شده است.

F۲: متوسط شار روی سطح محاسبه می شود و واحد آن ذره بر سانتی متر مربع است.

F۲:N or F۲:P or F۲:E

F۴: متوسط شار را در سلول محاسبه می کند و واحد آن ذره بر سانتی متر مربع است.

$F_{\epsilon:N}$ or $F_{\epsilon:P}$ or $F_{\epsilon:E}$

F^{ϵ} : شار متوسط را در آشکارساز نقطه ای یا حلقوی محاسبه می کند. واحد آن بازهم ذره بر سانتی متر مربع است. برای نوترون و فوتون می تواند به کار رود.

F^{ϵ} : انرژی ذخیره شده در سلول را در اثر عبور ذرات بدست می آورد و واحد آن MeV/gr است.

$F_{\epsilon:N}$ or $F_{\epsilon:P}$ or $F_{\epsilon:P,N}$

F^{ϵ} : توزیع انرژی پرتوهایی که در آشکارساز تولید پالس می کنند را محاسبه می کند و واحد آن پالس است.

$F_{\epsilon:P}$ or $F_{\epsilon:E}$ or $F_{\epsilon:P,E}$

اگر به خروجی * اضافه شود، خروجی ها را بصورت متوسط انرژی نسبت به آن کمیت در نظر می گیرد و در محاسبات حفاظ و دزیمتری کاربرد دارد.

دستور تقسیم بندی انرژی در خروجی E_n :

به منظور تحلیل خروجی ها در انرژی های مختلف مثلاً یافتن نوترون های حرارتی، لازم است با استفاده از کارت E_n خروجی ها را بر اساس انرژی از یکدیگر تفکیک کنیم.

فرم کلی استفاده از دستور فوق بصورت زیر است:

$E_n \quad E_1 \dots E_k$

n : شماره خروجی که می خواهیم روی آن تقسیم بندی صورت گیرد.

E_i : حد بالای انرژی برای تقسیم بندی خروجی شماره n

۳-۴-۲-۴ دستور تعریف مواد (Material card) Mn

در کد MCNP مواد موجود در مسئله باید کاملاً تعریف و مشخص شوند. زیرا برای ردگیری ذرات در سلول های مختلف، نوع ماده موجود در آن ها کاملاً مهم و اساسی است. فرم کلی آن به صورت زیر است:

Mn ZAID₁ fraction₁ ZAID₂ fraction₂

n: شماره ماده دلخواه است. این شماره در بخش تعریف سلول‌ها مشخص شده است.

ZAID: عنصر شماره iام موجود در ماده شماره n می‌باشد. فرم کلی این متغیر به صورت ZA.nx می‌باشد که Z عدد اتمی، A عدد جرمی ایزوتوپ، n معرف کتابخانه سطح مقطع، x بیانگر کلاس اطلاعات است اما بطور کلی می‌توان ماده را بصورت $Z^*A+1000$ معرفی نمود. nx بطور معمول توسط خود کد انتخاب می‌شود.

fraction_i: کسر اتمی یا وزنی عنصر iام در ماده شماره n است. اگر از کسر وزنی استفاده شود علامت منفی در جلوی آن قرار می‌گیرد. داده‌ها باید به ۱ نرمال شده باشند. در این پژوهش مرجع [۳۵] جهت نوشتن مواد به کار گرفته شده در شبیه سازی‌ها استفاده شده است.

به عنوان مثالی کاربردی ماده پارافین به صورت زیر تعریف می‌شود:

۱۰۰۱. m^۳ -۰,۱۴۸۶۰۵ ۶۰۰۰. -۰,۸۵۱۳۹۵

۳-۴-۵ دستورهای خاتمه دهنده به اجرای کد

در کد MCNP کاربر می‌تواند با استفاده از یک سری دستورات، زمان اجرای برنامه را کنترل کند، به عنوان مثال تعداد کل ذراتی که باید دنبال شوند، یا زمان کار با کامپیوتر و غیره. این دستورها عبارتند از: CUT، ELPT، NPS، LOST، CTME. بجز دستور NPS استفاده از بقیه دستورها اختیاری است [۳۶، ۳۲]

۳-۵ محاسبات ترابرد نوترون در MCNP

اولین گام برای محاسبات ترابرد نوترون دانستن داده‌های هسته‌ای مختلف از قبیل سطح مقطع برهم‌کنش‌ها است. اگر ترابرد توام نوترون-گاما انجام شود لازم است که انرژی و جهت گسیل پرتوهای گاما حاصل از برهم‌کنش‌های نوترون نیز تعیین گردد. در کد، نوترون توسط چشمه یا در اثر برهم‌کنش‌های (n,۲n) و یا

شکافت تولید می‌شود. (در این کد تولید نوترون‌های حاصل از واکنش‌های (n,γ) که توسط پرتوهای گاما با برخی از مواد، نظیر برلیوم و دوتریوم، در نظر گرفته نمی‌شود.) سطح مقطع‌های نوترون از کتابخانه‌هایی مانند ENDF/B و ENDL استخراج می‌شود. سطح مقطع‌های موجود در ENDF/B به صورت خام ذخیره شده‌اند و کدهای جانبی مختلفی برای پردازش و آماده کردن آن‌ها جهت انجام محاسبات تدارک دیده شده است. استخراج سطح مقطع از بایگانی ENDF/B توسط کد MERGER و Σ و LINEAR و پردازش و آماده سازی آن برای دمای ۳۰۰ درجه کلوین با استفاده از کدهای RESEND انجام می‌شود.

سطح مقطع‌های موجود نوترون در MCNP برای تعداد محدودی از عناصر به حدود ۱۰۰ MeV می‌رسد. (برای تعداد زیادی از ایزوتوپ‌ها به انرژی ۳۲ MeV محدود می‌شود.)

به علت افزایش طول موج نوترون در انرژی‌های پایین (تقریباً کمتر از ۴ eV)، آثار مولکولی در برخورد نوترون با ماده ظاهر می‌شود که این موضوع در کد پیش بینی شده است. در این وضعیت سطح مقطع‌های برهم‌کنش با استفاده از رفتار تابع $S(\alpha,\beta)$ برای بعضی از مواد نظیر آب، آب سنگین، برلیوم و اکسید برلیوم در کتابخانه ی سطح مقطع‌های MCNP موجود است. داده‌های مربوط به $S(\alpha,\beta)$ با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری، از کتابخانه‌های خاص ENDF/B استخراج می‌گردد. در انرژی‌های بالاتر، اثرات شبکه اهمیت خود را از دست می‌دهد و انرژی بستگی بین مولکول‌ها را می‌توان نادیده گرفت. در این حالت محیط مانند گاز در نظر گرفته می‌شود که حرکت مولکول‌ها به دمای محیط بستگی دارد. سرعت هسته‌های محیط با توجه به توزیع مولکولی تعیین می‌شود، لذا در انرژی‌های حرارتی سطح مقطع پراکندگی، با در نظر گرفتن حرکت هسته و سرعت نسبی نوترون و هسته ی هدف، محاسبه می‌شود. در شبیه‌سازی های این پژوهش از لحاظ کردن $S(\alpha,\beta)$ صرف نظر شده است. زاویه پس از برخورد نیز با استفاده از جدول‌های مربوط به توزیع زاویه‌ی پراکندگی تعیین می‌گردد. این جدول‌ها شامل ۳۲ بازه کسینوس زاویه پراکندگی با

احتمال‌های مساوی است که بر اساس انرژی‌های مختلف نوترون فرودی تنظیم شده اند. بسته به نوع برهم‌کنش، کسینوس زاویه پراکندگی در مختصات آزمایشگاهی و یا مرکز جرم داده شده است [۳۷].

برای برهم‌کنش‌های ناکشسان (n,n') و یا برهم‌کنش‌های (n,f) ، (n,γ) و (n,n') بر حسب نوع برهم‌کنش، انرژی و زاویه‌ی نوترون‌های حاصل، تعیین می‌گردد. در صورتی که برهم‌کنش منجر به تولید پرتو گاما نیز گردد، لازم است انرژی و جهت حرکت این پرتو تعیین شود. این اطلاعات بر اساس داده‌ها و روابط مورد استفاده در کتابخانه‌های اصلی مانند ENDF/B تعیین می‌گردند. برهم‌کنش‌هایی نظیر (n,α) ، (n,γ) و (p,n) در MCNP در نظر گرفته نمی‌شوند. به عبارت دیگر تولید نوترون را فقط ناشی از چشمه‌های خارجی و یا برهم‌کنش‌های ناکشسان نوترون می‌داند. در صورتی که اثر برهم‌کنش‌های فوق در تولید نوترون قابل ملاحظه باشد لازم است به طور غیرمستقیم محاسبه شده و به صورت چشمه‌های خارجی مجزایی به برنامه مسئله افزوده شود.

فصل چهارم

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها

۱-۴ انتخاب شکل هندسی کندکننده

در راکتورهای هسته‌ای که مهمترین چشمه‌ی نوترون هستند، یکی از عوامل مهم در تعیین میزان نشت نوترون، هندسه و چیدمان مواد در قلب راکتور می‌باشد. در تئوری‌های ساده پخش می‌توان نشان داد که فرار نوترون متناسب با سطح است و برای یک جسم کروی کمیت سطح به ازای واحد حجم مقدار حداقل را دارد. بنابراین در چشمه نوترون نیز پیش‌بینی می‌شود اگر کندکننده اطراف چشمه دارای شکل کروی باشد، کسر نوترون‌هایی که در اثر نشت از دست می‌روند، کمتر از دیگر هندسه‌ها باشد و شار بیشتری از نوترون را خواهیم داشت. بطور کلی شکل هندسی سیستم هرچه به حالت کروی نزدیک‌تر باشد شار بیشتری را انتظار داریم. میانگین نشت نوترون به ازای واحد حجم در حجم کروی متناسب با $\frac{R^2}{R^3}$ یا $\frac{1}{R}$ می‌باشد که در آن R شعاع کره دربردارنده ماده است. همچنین در یک هندسه معین انتظار می‌رود تعداد نوترون‌های با انرژی بالا که در اثر نشت از سیستم از دست می‌رود نسبت به نوترون‌های حرارتی بیشتر باشد [۲۹،۳۰].

۱-۱-۴ مقایسه شار در سطح کندکننده کره و استوانه با حجم‌های برابر

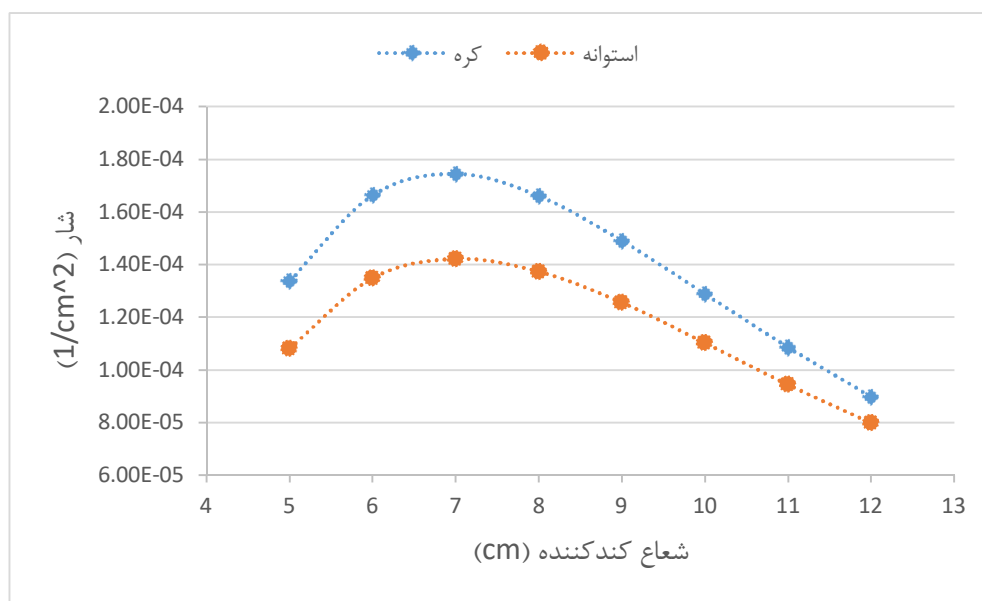
در این بخش با توجه به مطلب فوق و با در نظر گرفتن اینکه در اکثر چشمه‌های نوترون و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در اکثر مقالات، کندکننده اطراف چشمه را به دلیل راحت بودن حمل‌ونقل و دسترسی آسان‌تر به درون محیط کندکننده به صورت استوانه در نظر گرفته می‌شود، به مقایسه شار نوترون‌های حرارتی در سطح کره و استوانه‌ای با حجم‌های برابر که شعاع کره با شعاع قاعده استوانه نیز یکسان است، پرداخته شده است. طول استوانه به کمک رابطه زیر محاسبه گردیده است:

$$V_{\text{کره}} = V_{\text{استوانه}} \rightarrow \frac{4}{3}\pi r^3 = \pi r^2 l \rightarrow l = \frac{4}{3}r$$

به کمک تالی F۲ شار در سطح خارجی کندکننده برای دو حالت کره و استوانه برای کندکننده پارافین محاسبه شد و نتایج در جدول ۱-۴ و شکل ۲-۴ آورده شده است:

جدول ۴-۱ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده پارافین در سطح کندکننده‌های کروی و استوانه‌ای

شار هندسه استوانه ای ($1/cm^2$)	شار هندسه کروی ($1/cm^2$)	شعاع پارافین (cm)
$1.08E-04$	$1.34E-04$	۵
$1.35E-04$	$1.66E-04$	۶
$1.42E-04$	$1.74E-04$	۷
$1.37E-04$	$1.66E-04$	۸
$1.26E-04$	$1.49E-04$	۹
$1.10E-04$	$1.29E-04$	۱۰
$9.43E-05$	$1.09E-04$	۱۱
$7.98E-05$	$8.99E-05$	۱۲



شکل ۴-۱ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده پارافین در سطح کره و استوانه دارای حجم‌های برابر

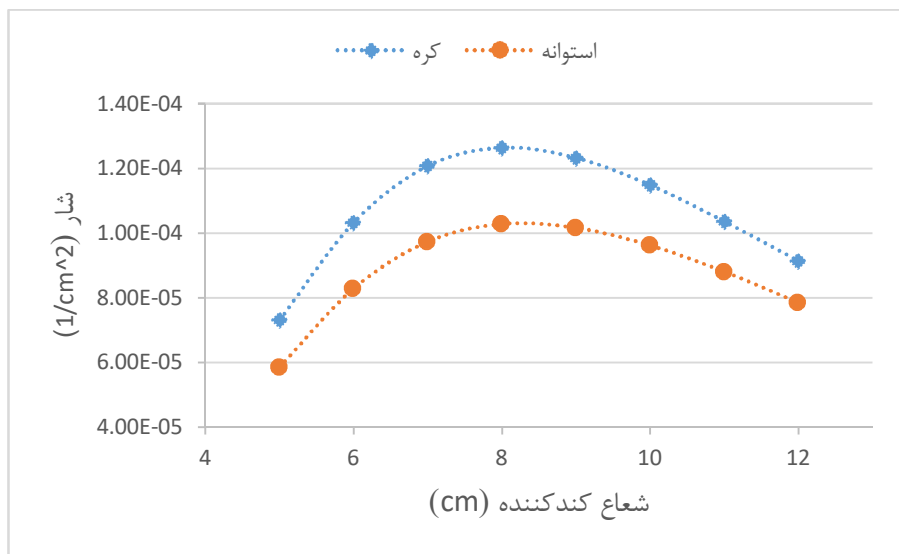
همانطور که از نظریه تئوری انتظار می‌رفت، در نتایج مشاهده می‌شود که شار در سطح کندکننده با هندسه کروی بیشتر از هندسه استوانه‌ای است.

شایان ذکر است که در تمام شبیه‌سازی‌هایی که در ادامه آورده شده است، نتایج حاصل از کد به صورت میانگین‌گیری شده و برای یک نوترون گزارش می‌شود. در صورتیکه اکتیویته چشمه مشخص باشد، می‌توان از ضرب آن در مقادیر گزارش شده مقدار شار را برای چشمه مورد نظر محاسبه کرد. همچنین در تمام شبیه‌سازی‌های این پژوهش خطای آماری وارد شده در نتایج، که ناشی از ماهیت مونت کارلویی کد MCNPX است، کمتر از ده درصد می‌باشد.

به منظور بررسی مجدد، محاسبات فوق برای کندکننده آب نیز به همان روش انجام گردید و نتایج محاسبات در جدول ۳-۴ شکل ۴-۴ آورده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در کندکننده آب نیز شار نوترون‌های حرارتی در سطح چشمه دارای کندکننده کروی بیشتر از استوانه‌ای است و تغییر شکل کندکننده به کره می‌تواند منجر به افزایش شار نوترون‌های حرارتی که در این تحقیق به دنبال آن هستیم، شود.

جدول ۲-۴ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده آب در سطح کندکننده‌های کروی و استوانه‌ای

شار هندسه استوانه ای ($1/cm^2$)	شار هندسه کروی ($1/cm^2$)	شعاع (cm)
$1.08E-04$	$1.34E-04$	۵
$1.35E-04$	$1.66E-04$	۶
$1.42E-04$	$1.74E-04$	۷
$1.37E-04$	$1.66E-04$	۸
$1.26E-04$	$1.49E-04$	۹
$1.10E-04$	$1.29E-04$	۱۰
$9.43E-05$	$1.09E-04$	۱۱
$7.98E-05$	$8.99E-05$	۱۲



شکل ۴-۲ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده آب در سطح کره و استوانه دارای حجم های برابر

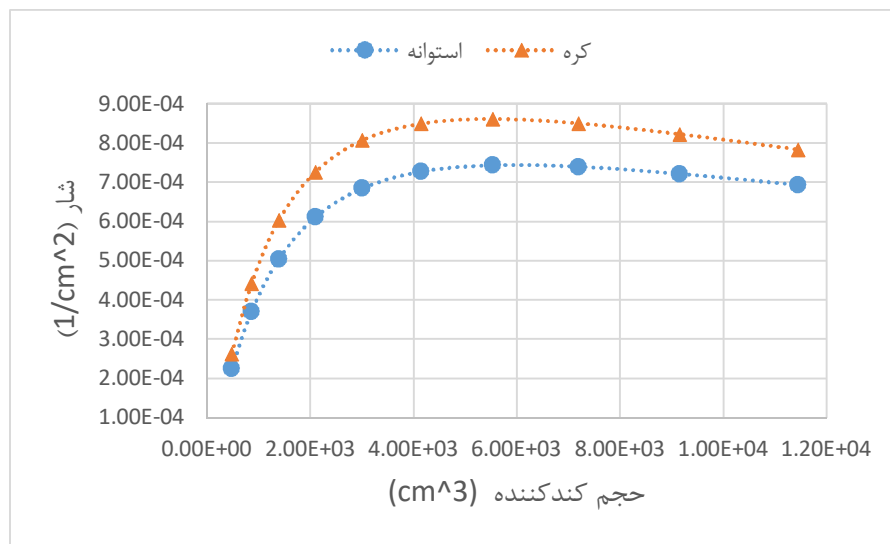
۴-۱-۲ مقایسه شار در حجم کره و استوانه کندکننده دارای حجم های برابر

به منظور بررسی بیشتر اثر شکل هندسی کندکننده، شار نوترون‌های غیرحرارتی و حرارتی در حجم‌های

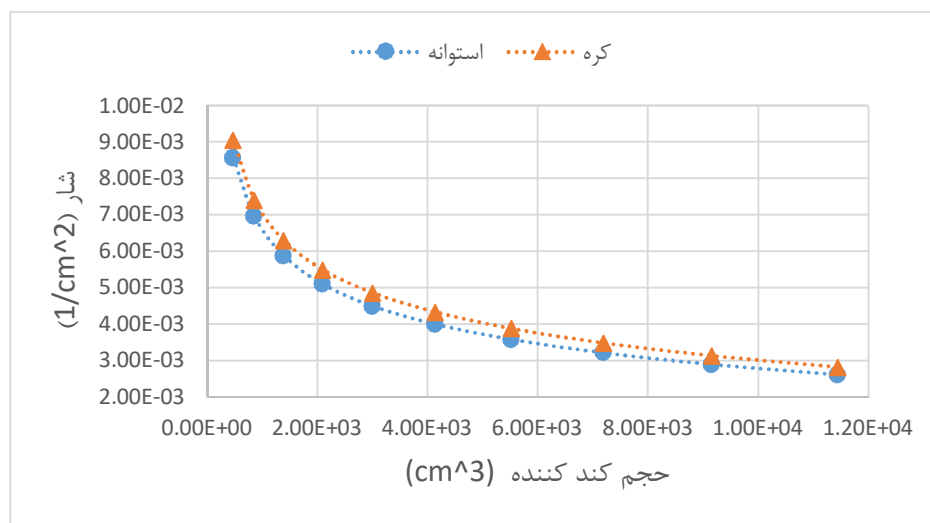
یکسانی از کره و استوانه کندکننده آب توسط تالی f۴ مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج عبارتند از:

جدول ۴-۳ مقایسه شار نوترون‌ها در حجم برای کندکننده آب با هندسه کروی و استوانه‌ای

حجم کندکننده (cm³)	استوانه		کروی	
	شار حرارتی (۱/cm²)	شار کل (۱/cm²)	شار حرارتی (۱/cm²)	شار کل (۱/cm²)
۴.۸۱E+۰۲	۲.۲۵E-۰۴	۸.۵۶E-۰۳	۲.۶۲E-۰۴	۹.۰۵E-۰۳
۸.۶۲E+۰۲	۳.۷۰E-۰۴	۶.۹۵E-۰۳	۴.۴۱E-۰۴	۷.۴۰E-۰۳
۱.۳۹E+۰۳	۵.۰۴E-۰۴	۵.۸۸E-۰۳	۶.۰۳E-۰۴	۶.۳۰E-۰۳
۲.۱۰E+۰۳	۶.۱۱E-۰۴	۵.۱۰E-۰۳	۷.۲۶E-۰۴	۵.۴۹E-۰۳
۳.۰۱E+۰۳	۶.۸۴E-۰۴	۴.۴۹E-۰۳	۸.۰۷E-۰۴	۴.۸۶E-۰۳
۴.۱۵E+۰۳	۷.۲۷E-۰۴	۴.۰۰E-۰۳	۸.۴۹E-۰۴	۴.۳۳E-۰۳
۵.۵۳E+۰۳	۷.۴۳E-۰۴	۳.۵۸E-۰۳	۸.۶۱E-۰۴	۳.۸۸E-۰۳
۷.۲۰E+۰۳	۷.۳۹E-۰۴	۳.۲۲E-۰۳	۸.۵۰E-۰۴	۳.۴۹E-۰۳
۹.۱۶E+۰۳	۷.۲۱E-۰۴	۲.۹۰E-۰۳	۸.۲۲E-۰۴	۳.۱۴E-۰۳
۱.۱۵E+۰۴	۶.۹۳E-۰۴	۲.۶۱E-۰۳	۷.۸۳E-۰۴	۲.۸۲E-۰۳



شکل ۳-۴ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی در حجم برای کندکننده کروی و استوانه ای



شکل ۴-۴ مقایسه شار کل نوترون‌ها در حجم برای کندکننده کروی و استوانه ای

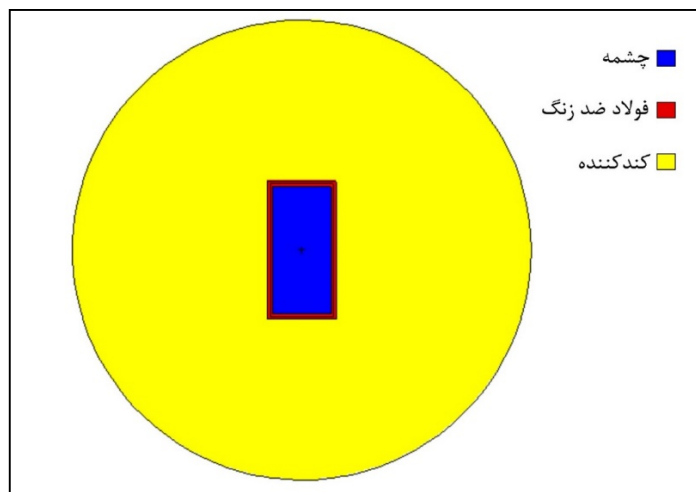
نتایج نشان می‌دهد برای نوترون‌های غیرحرارتی و حرارتی شار چشمه دارای هندسه کروی بیشتر از استوانه‌ای می‌باشد. همچنین با افزایش حجم کندکننده، محیط بیشتری برای کندسازی نوترون‌ها فراهم شده و در نتیجه شار نوترون‌های غیرحرارتی کاهش و شار نوترون‌های سریع افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج دو بخش اخیر در ادامه هندسه کروی برای کندکننده اطراف چشمه مورد استفاده قرار گرفت. حال باید نوع کندکننده، شعاع مناسب برای آن را پیدا کنیم.

۴-۲ انتخاب ماده کندکننده

همانطور که در فصل های گذشته مطرح شد ماده کندکننده باید دارای جرمی نزدیک به نوترون بوده و سطح مقطع پراکندگی بالا و جذب کمی داشته باشد. در این بخش با مقایسه کندکننده های مطرح به دنبال یافتن گزینه مناسب برای هدف این پژوهش که داشتن شار نوترون حرارتی بیشتر است، می باشیم.

به منظور بررسی و مقایسه میزان شار نوترون های حرارتی (در شبیه سازی ها نوترون های با انرژی کمتر از 0.05 eV حرارتی در نظر گرفته شده اند.) تولید شده در مواد کندکننده مختلف، چشمه Am-Be در مرکز کره ای از جنس کندکننده قرار داده شد و شار نوترون های حرارتی در سطح خارجی این کره برای چند ماده با استفاده از تالی F۲ محاسبه گردید.

شکل ۴-۶ پیکربندی استفاده شده در شبیه سازی را نشان می دهد. همچنین تعداد ذرات تولید شده توسط کد به میزانی افزایش یافت که خطای آماری محاسبات کمتر از مقدار قابل قبول ۵ درصد باشد.



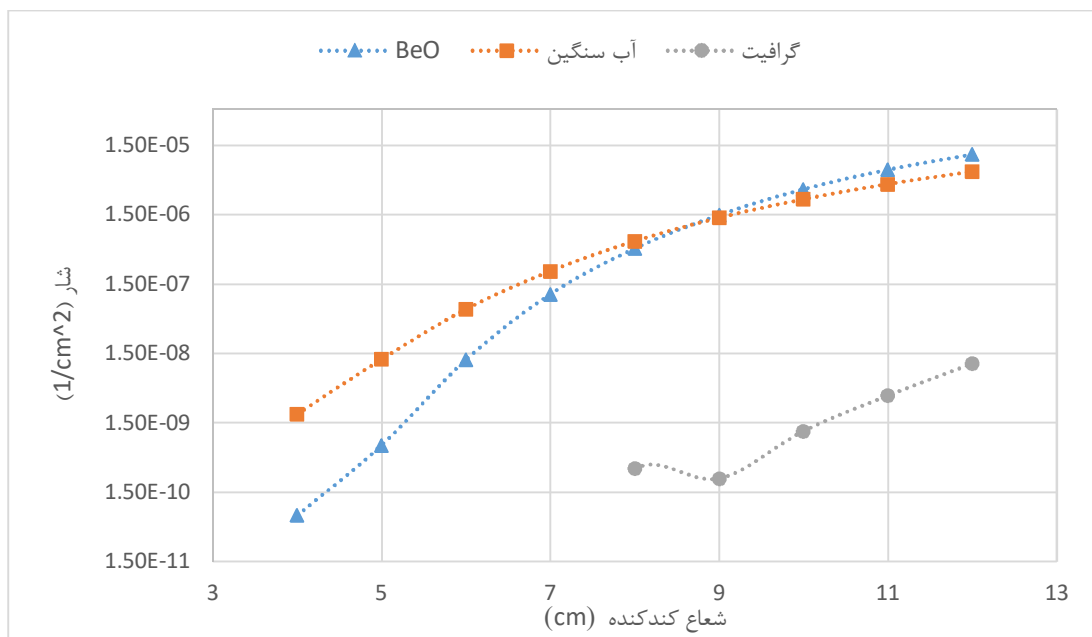
شکل ۴-۵ پیکربندی چشمه در کپسول محافظ و کندکننده اطراف آن در کد MCNP

علت استفاده از تالی محاسبه کننده شار در سطح این است که در نهایت به دنبال یافتن محلی برای پرتو دهی نمونه هستیم که بیشترین شار نوترون حرارتی را داشته باشد، این محل با توجه به نمونه هایی که برای

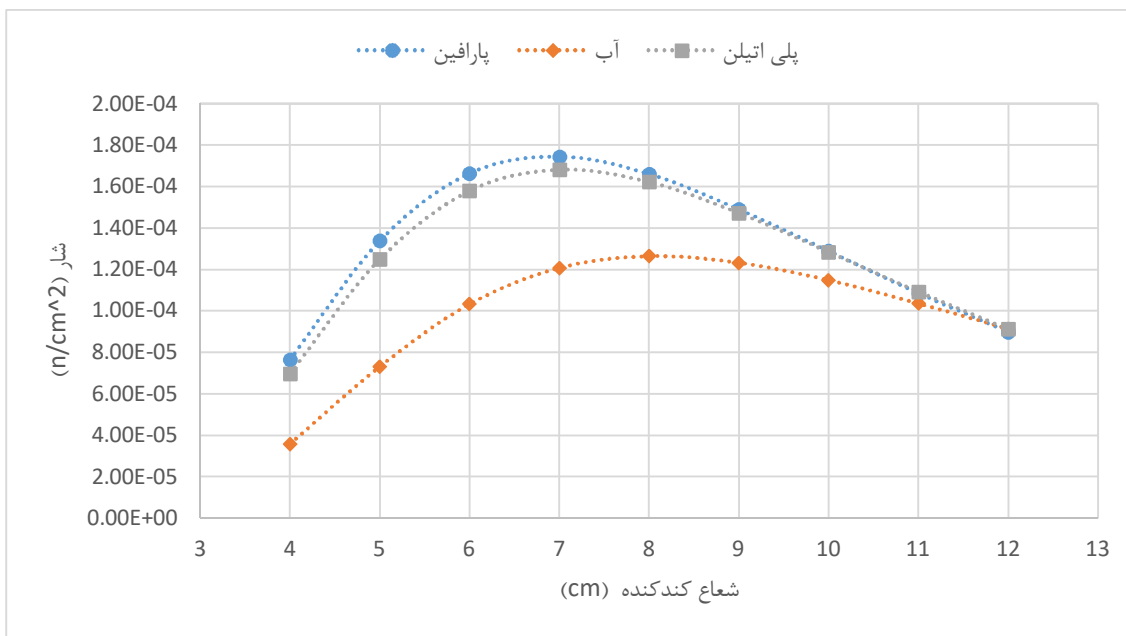
پرتودهی استفاده می شوند، سطح کوچکی است. در نتیجه باید سطحی که بیشترین شار نوترون حرارتی را دارد، پیدا شود. جدول ۴-۵ شار حرارتی محاسبه شده توسط کد و شکل ۴-۷ و ۴-۸ نمودار حاصل از این جدول را نشان می دهد.

جدول ۴-۴ شار نوترون های حرارتی محاسبه شده در سطح کره کندکننده های مختلف بر حسب شعاع

شعاع (cm)	شار نوترون های حرارتی در سطح کره ای از جنس مواد کندکننده مختلف ($1/cm^2$)					
	BeO	D ₂ O	H ₂ O	پارافین	پلی اتیلن	گرافیت
۴	۶.۹۹E-۱۱	۲.۰۲E-۰۹	۳.۵۸E-۰۵	۷.۶۵E-۰۵	۶.۹۷E-۰۵	۰
۵	۷.۱۹E-۱۰	۱.۲۴E-۰۸	۷.۳۱E-۰۵	۱.۳۴E-۰۴	۱.۲۵E-۰۴	۰
۶	۱.۲۳E-۰۸	۶.۵۵E-۰۸	۱.۰۳E-۰۴	۱.۶۶E-۰۴	۱.۵۸E-۰۴	۰
۷	۱.۰۸E-۰۷	۲.۳۲E-۰۷	۱.۲۱E-۰۴	۱.۷۴E-۰۴	۱.۶۸E-۰۴	۱.۳۵E-۱۱
۸	۴.۹۱E-۰۷	۶.۲۷E-۰۷	۱.۲۶E-۰۴	۱.۶۶E-۰۴	۱.۶۲E-۰۴	۳.۳۰E-۱۰
۹	۱.۴۹E-۰۶	۱.۳۶E-۰۶	۱.۲۳E-۰۴	۱.۴۹E-۰۴	۱.۴۷E-۰۴	۲.۳۶E-۱۰
۱۰	۳.۵۰E-۰۶	۲.۵۲E-۰۶	۱.۱۵E-۰۴	۱.۲۹E-۰۴	۱.۲۸E-۰۴	۱.۱۵E-۰۹
۱۱	۶.۷۱E-۰۶	۴.۱۶E-۰۶	۱.۰۴E-۰۴	۱.۰۹E-۰۴	۱.۰۹E-۰۴	۳.۷۲E-۰۹
۱۲	۱.۱۱E-۰۵	۶.۲۹E-۰۶	۹.۱۴E-۰۵	۸.۹۹E-۰۵	۹.۱۳E-۰۵	۱.۰۷E-۰۸



شکل ۴-۶ نمودار شار نوترون های حرارتی برای کندکننده های مختلف بر حسب شعاع



شکل ۴-۷ نمودار شار نوترون‌های حرارتی برای کندکننده‌های مختلف بر حسب شعاع

از مقایسه مقادیر بدست آمده نتیجه می‌شود، مقدار شار حرارتی برای کندکننده‌های آب، پارافین و پلی اتیلن در سطح بالاتری نسبت به سایر کندکننده‌ها قرار دارد و در سطح کره‌ای به شعاع ۷ سانتی‌متر از پارافین بیشترین شار نوترون‌های حرارتی را شاهد خواهیم بود. پس از آن پلی اتیلن با شعاع ۷ و آب با شعاع ۸ سانتی‌متر در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

برای محاسبات آتی پارافین با توجه به قیمت مناسب و سهولت در تولید و بکارگیری به عنوان کندکننده استفاده شده است. همچنین با توجه به روند کاهش شار حرارتی در شعاع‌های بالاتر از ۷ سانتی‌متر، شعاع ۷ سانتی‌متر به عنوان محلی که بیشترین شار نوترون حرارتی را نشان داده است، مورد توجه است.

ظهور قله در نمودارها به دلیل وقوع جذب بیشتر پس از ضخامتی که در آن قله رخ می‌دهد، می‌تواند باشد. همچنین می‌توان آن را به ضریب انباشت^{۱۰} نسبت داد که همواره بزرگتر از یک بوده و به صورت نسبت

^{۱۰} build up factor

شدت پرتوهای اولیه و پراکنده در هر نقطه از باریکه به شدت پرتوهای اولیه در همان نقطه تعریف می شود. این ضریب به شکل چشمه پرتوزا، اندازه محیط جذب کننده، انرژی پرتوهای فرودی، فاصله چشمه تا آشکارساز و جنس محیط بستگی دارد. در رابطه تضعیف در اثر عبور از ماده بصورت زیر ضریب انباشت لحاظ می گردد:

$$I = BI_0 e^{-\mu x} \quad ۱-۴$$

۳-۴ یافتن شعاع اثرگذاری پارافین بر شار نوترون

در نتایج قسمت قبل در کره پارافین به شعاع ۷ cm شاهد حداکثر شار نوترون های حرارتی بودیم. مقایسه شار حرارتی و غیرحرارتی نشان می دهد شار غیرحرارتی در این سطح بیشتر بوده و با افزودن ضخامت های بیشتری از کندکننده می توان نوترون های بیشتری را حرارتی کرد. بدین منظور از سه روش زیر به بررسی یافتن شعاع اثر گذاری پارافین پرداختیم:

۱-۳-۴ بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین به کمک مقایسه شار حرارتی و غیرحرارتی در سطح

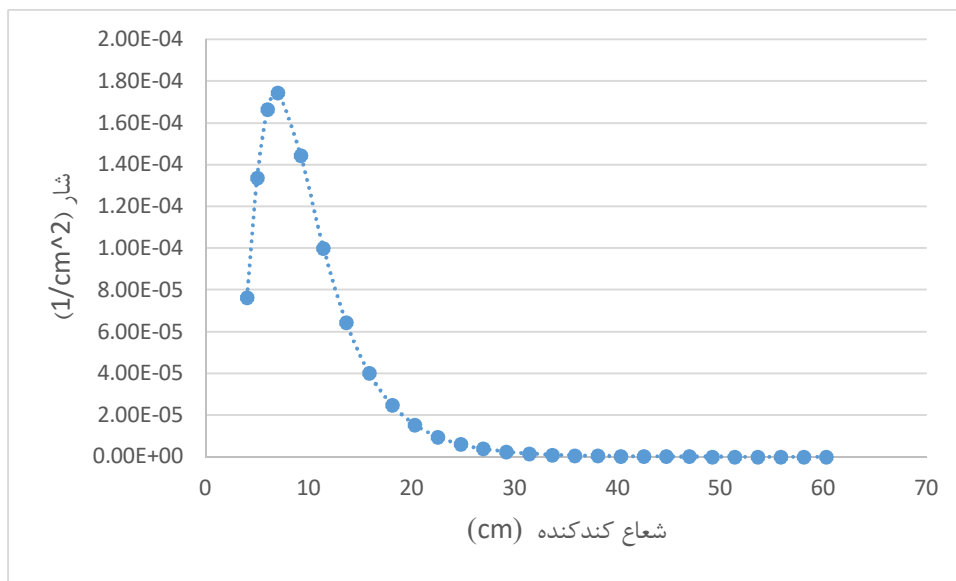
در ابتدا به منظور بررسی وضعیت نوترون های غیرحرارتی و مقایسه آنها با نوترون های حرارتی و همچنین بررسی روند تغییرات شار حرارتی در سطح کره پارافین شعاع آن به میزان ۲۸، ۰ (که λ پویش آزاد متوسط نوترون در پارافین بوده و دارای مقدار $\lambda = 11,11$ cm می باشد [۴۰]) افزایش داده شد و سپس به کمک تالی f^۲ به محاسبه شار نوترون ها پرداخته شد. که در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی ها در جدول ۴-۶ مشاهده می شود.

نتایج بیانگر این است که شار حرارتی در سطح کره کندکننده به شعاع های مختلف ابتدا تا شعاع ۷ سانتی متر افزایش داشته و سپس با زیاد شدن سطح کندکننده شار حرارتی در سطح کاهش می یابد. رسیدن به یک حداکثر را می توان به شرایط خاص هندسه در این حالت و تاثیری که بر ضریب انباشت دارد نسبت داد.

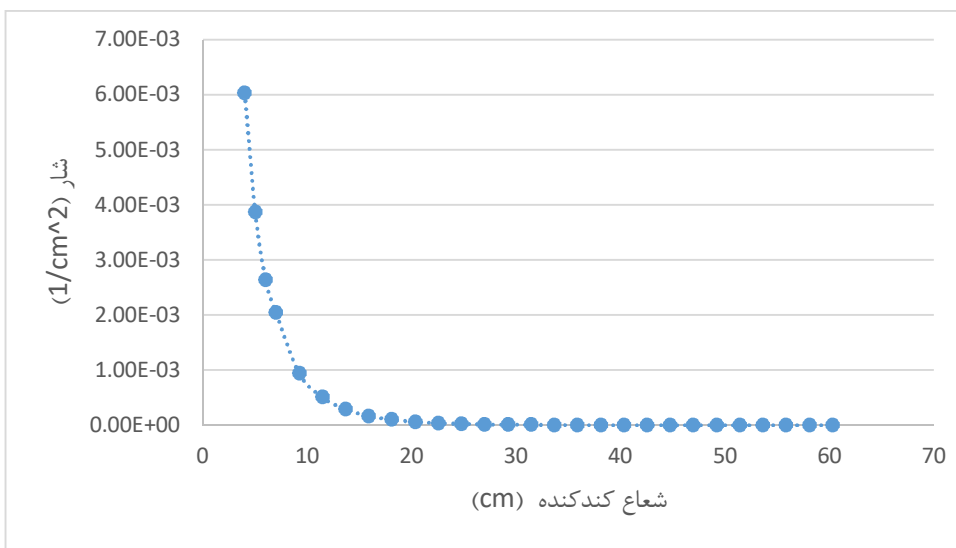
جدول ۴-۵ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در سطح کره کندکننده پارافین

نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی به درصد	نسبت شار حرارتی به شار کل به درصد	شار غیرحرارتی ($1/cm^2$)	شار حرارتی ($1/cm^2$)	شعاع (cm)
۹۸.۷۳	۱.۲۵	$۶.۰۳E-۰۳$	$۷.۶۵E-۰۵$	۴
۹۶.۵۵	۳.۳۴	$۳.۸۷E-۰۳$	$۱.۳۴E-۰۴$	۵
۹۳.۷۰	۵.۹۳	$۲.۶۴E-۰۳$	$۱.۶۶E-۰۴$	۶
۹۱.۴۵	۷.۸۸	$۲.۰۴E-۰۳$	$۱.۷۴E-۰۴$	۷
۸۴.۶۱	۱۳.۳۴	$۹.۳۸E-۰۴$	$۱.۴۴E-۰۴$	۹.۲۲
۸۰.۲۷	۱۶.۴۸	$۵.۰۷E-۰۴$	$۹.۹۹E-۰۵$	۱۱.۴۴
۷۷.۵۳	۱۸.۳۵	$۲.۸۶E-۰۴$	$۶.۴۳E-۰۵$	۱۳.۶۶
۷۶.۰۰	۱۹.۳۶	$۱.۶۷E-۰۴$	$۴.۰۰E-۰۵$	۱۵.۸۸
۷۵.۰۷	۱۹.۹۵	$۹.۹۶E-۰۵$	$۲.۴۸E-۰۵$	۱۸.۱
۷۴.۶۷	۲۰.۲۱	$۶.۰۶E-۰۵$	$۱.۵۴E-۰۵$	۲۰.۳۲
۷۴.۵۴	۲۰.۲۹	$۳.۷۶E-۰۵$	$۹.۵۶E-۰۶$	۲۲.۵۴
۷۴.۸۶	۲۰.۰۹	$۲.۳۷E-۰۵$	$۵.۹۵E-۰۶$	۲۴.۷۶
۷۵.۰۴	۱۹.۹۷	$۱.۵۱E-۰۵$	$۳.۷۸E-۰۶$	۲۶.۹۸
۷۵.۵۳	۱۹.۶۶	$۹.۸۲E-۰۶$	$۲.۴۰E-۰۶$	۲۹.۲
۷۵.۹۷	۱۹.۳۸	$۶.۴۲E-۰۶$	$۱.۵۴E-۰۶$	۳۱.۴۲
۷۶.۵۶	۱۸.۹۹	$۴.۲۵E-۰۶$	$۹.۹۷E-۰۷$	۳۳.۶۴
۷۷.۰۰	۱۸.۷۰	$۲.۸۴E-۰۶$	$۶.۵۳E-۰۷$	۳۵.۸۶
۷۸.۰۸	۱۷.۹۸	$۱.۹۲E-۰۶$	$۴.۲۱E-۰۷$	۳۸.۰۸
۷۷.۷۲	۱۸.۲۲	$۱.۳۰E-۰۶$	$۲.۸۹E-۰۷$	۴۰.۳
۷۸.۲۵	۱۷.۸۷	$۸.۹۰E-۰۷$	$۱.۹۴E-۰۷$	۴۲.۵۲
۷۹.۰۳	۱۷.۳۴	$۶.۱۹E-۰۷$	$۱.۳۰E-۰۷$	۴۴.۷۴
۷۹.۳۳	۱۷.۱۳	$۴.۲۶E-۰۷$	$۸.۸۰E-۰۸$	۴۶.۹۶
۷۹.۷۵	۱۶.۸۴	$۲.۹۸E-۰۷$	$۶.۰۳E-۰۸$	۴۹.۱۸
۷۹.۲۹	۱۷.۱۶	$۲.۰۹E-۰۷$	$۴.۳۳E-۰۸$	۵۱.۴
۸۰.۰۹	۱۶.۶۱	$۱.۴۷E-۰۷$	$۲.۹۲E-۰۸$	۵۳.۶۲
۸۱.۵۳	۱۵.۵۹	$۱.۰۵E-۰۷$	$۱.۹۵E-۰۸$	۵۵.۸۴
۸۰.۳۴	۱۶.۴۳	$۷.۴۸E-۰۸$	$۱.۴۷E-۰۸$	۵۸.۰۶
۸۱.۹۷	۱۵.۲۸	$۵.۳۷E-۰۸$	$۹.۶۸E-۰۹$	۶۰.۲۸

در ادامه نمودارهای مربوط به این نتایج آورده شده است.

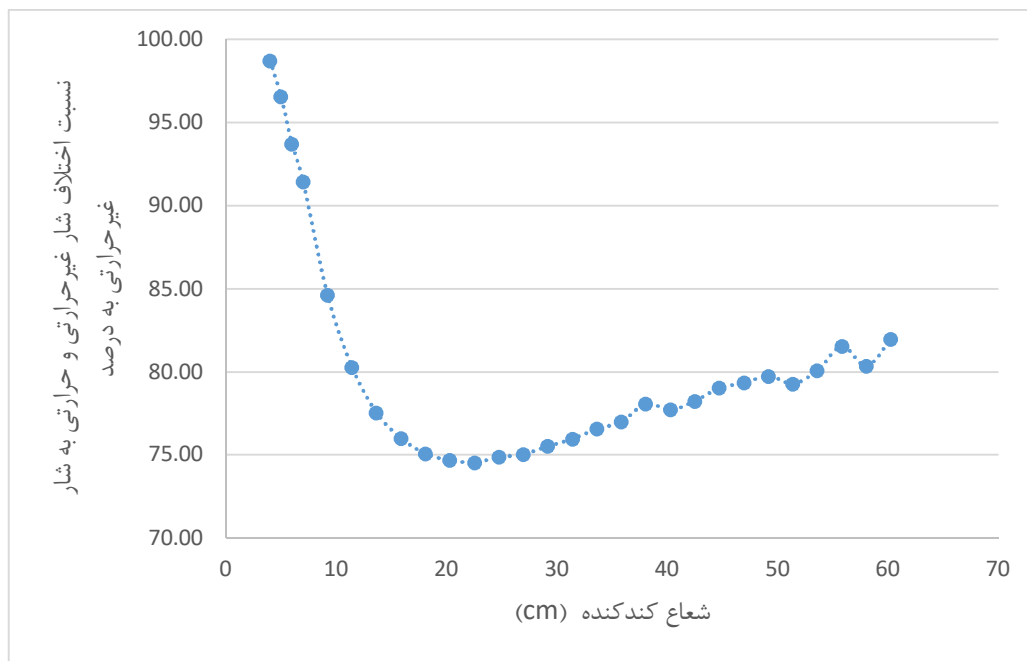


شکل ۴-۸ نمودار شار نوترون‌های حرارتی در سطح کندکننده پارفین برحسب شعاع



شکل ۴-۹ نمودار شار نوترون‌های غیرحرارتی در سطح کندکننده پارفین برحسب شعاع

در نمودار شاهد قله برای نوترون‌های حرارتی هستیم و روند آن پس از شعاع ۷ سانتی‌متر رو به کاهش است در صورتی که نمودار برای نوترون‌های غیرحرارتی روند کاهش ابتدا ادامه دارد. حال به بررسی نسبت اختلاف شار حرارتی و غیر حرارتی به شار غیرحرارتی می‌پردازیم:



شکل ۴-۱۰ نمودار نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی به درصد برحسب شعاع کندکننده

کمیت فوق بیان می کند افزودن شعاع کره پارافین تا چه سطحی می تواند بر افزایش شار نوترون موثر باشد. مقدار کمتر برای نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی بیانگر این است که درصد خوبی از نوترون های غیرحرارتی به حرارتی تبدیل شده اند در نتیجه نقاطی که در قسمت مینیمم شکل فوق قرار دارند، می توانند گزینه های مناسبی برای شعاع کندکننده پارافین باشند.

۴-۳-۲ بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین به کمک مقایسه شار حرارتی و غیرحرارتی در حجم

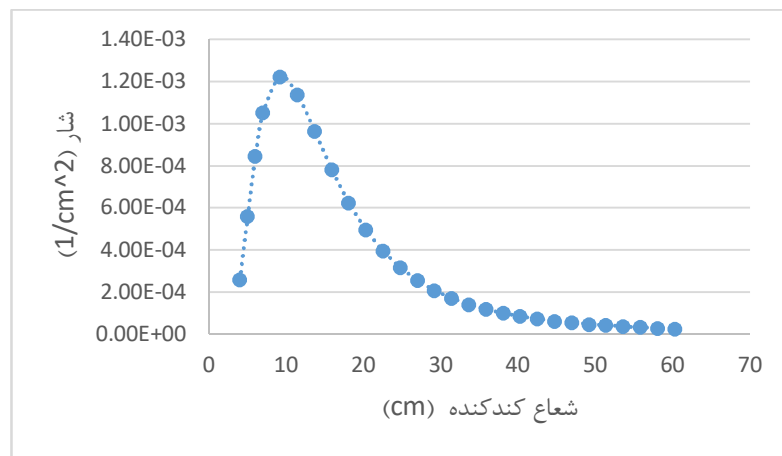
به منظور ارزیابی بیشتر اثر افزودن ضخامت های بیشتری از پارافین، شار نوترون در حجم کندکننده با کمک تالی f۴ محاسبه گردید. در شبیه سازی های قسمت قبل به بررسی شار فقط در سطح کره پرداخته شده بود اما از آنجا که افزودن ضخامت کندکننده می تواند در سطح های پایین تر در شار تغییراتی را ایجاد کند، مقایسه شار در کل حجم کندکننده می تواند مفید باشد. نتایج حاصل از کد از قرار زیر است:

جدول ۴-۶ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در حجم کره کندکننده پارافین

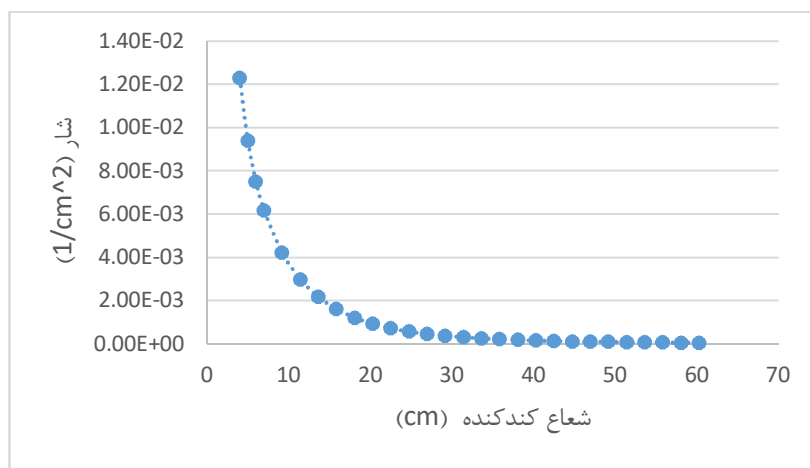
نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی به درصد	حجم (cm ³)	شار غیرحرارتی (۱/cm ^۲)	شار حرارتی (۱/cm ^۲)	شعاع (cm)
۰.۹۸	۲.۲۶E+۰۲	۱.۲۳E-۰۲	۲.۵۸E-۰۴	۴
۰.۹۴	۴.۸۱E+۰۲	۹.۳۸E-۰۳	۵.۶۰E-۰۴	۵
۰.۸۹	۸.۶۲E+۰۲	۷.۵۰E-۰۳	۸.۴۵E-۰۴	۶
۰.۸۳	۱.۳۹E+۰۳	۶.۱۶E-۰۳	۱.۰۵E-۰۳	۷
۰.۷۱	۳.۲۴E+۰۳	۴.۲۰E-۰۳	۱.۲۲E-۰۳	۹.۲۲
۰.۶۲	۶.۲۳E+۰۳	۲.۹۸E-۰۳	۱.۱۴E-۰۳	۱۱.۴۴
۰.۵۵	۱.۰۶E+۰۴	۲.۱۶E-۰۳	۹.۶۳E-۰۴	۱۳.۶۶
۰.۵۱	۱.۶۷E+۰۴	۱.۶۰E-۰۳	۷.۸۲E-۰۴	۱۵.۸۸
۰.۴۸	۲.۴۸E+۰۴	۱.۲۰E-۰۳	۶.۲۴E-۰۴	۱۸.۱
۰.۴۶	۳.۵۱E+۰۴	۹.۱۹E-۰۴	۴.۹۶E-۰۴	۲۰.۳۲
۰.۴۵	۴.۷۹E+۰۴	۷.۱۳E-۰۴	۳.۹۵E-۰۴	۲۲.۵۴
۰.۴۴	۶.۳۵E+۰۴	۵.۶۰E-۰۴	۳.۱۷E-۰۴	۲۴.۷۶
۰.۴۳	۸.۲۲E+۰۴	۴.۴۷E-۰۴	۲.۵۶E-۰۴	۲۶.۹۸
۰.۴۲	۱.۰۴E+۰۵	۳.۶۰E-۰۴	۲.۰۸E-۰۴	۲۹.۲
۰.۴۲	۱.۳۰E+۰۵	۲.۹۴E-۰۴	۱.۷۱E-۰۴	۳۱.۴۲
۰.۴۲	۱.۵۹E+۰۵	۲.۴۳E-۰۴	۱.۴۲E-۰۴	۳۳.۶۴
۰.۴۱	۱.۹۳E+۰۵	۲.۰۲E-۰۴	۱.۱۸E-۰۴	۳۵.۸۶
۰.۴۱	۲.۳۱E+۰۵	۱.۷۰E-۰۴	۹.۹۹E-۰۵	۳۸.۰۸
۰.۴۱	۲.۷۴E+۰۵	۱.۴۴E-۰۴	۸.۴۹E-۰۵	۴۰.۳
۰.۴۱	۳.۲۲E+۰۵	۱.۲۳E-۰۴	۷.۲۶E-۰۵	۴۲.۵۲
۰.۴۱	۳.۷۵E+۰۵	۱.۰۶E-۰۴	۶.۲۶E-۰۵	۴۴.۷۴
۰.۴۱	۴.۳۴E+۰۵	۹.۲۰E-۰۵	۵.۴۳E-۰۵	۴۶.۹۶
۰.۴۱	۴.۹۸E+۰۵	۸.۰۳E-۰۵	۴.۷۴E-۰۵	۴۹.۱۸
۰.۴۱	۵.۶۹E+۰۵	۷.۰۴E-۰۵	۴.۱۶E-۰۵	۵۱.۴
۰.۴۱	۶.۴۶E+۰۵	۶.۲۱E-۰۵	۳.۶۷E-۰۵	۵۳.۶۲
۰.۴۱	۷.۲۹E+۰۵	۵.۵۰E-۰۵	۳.۲۵E-۰۵	۵۵.۸۴
۰.۴۱	۸.۲۰E+۰۵	۴.۹۰E-۰۵	۲.۸۹E-۰۵	۵۸.۰۶
۰.۴۱	۹.۱۷E+۰۵	۴.۳۸E-۰۵	۲.۵۹E-۰۵	۶۰.۲۸

از نتایج واضح است که افزودن ضخامت‌های بیشتر کندکننده تا یک حدی می‌تواند موثر واقع شود و پس از آن دیگر نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی ثابت باقی می‌ماند و افزودن کندکننده بیشتر از آن، اثر افزایشی بر شار نوترون‌های حرارتی ندارد. نمودارهای زیر نتایج را به خوبی نشان

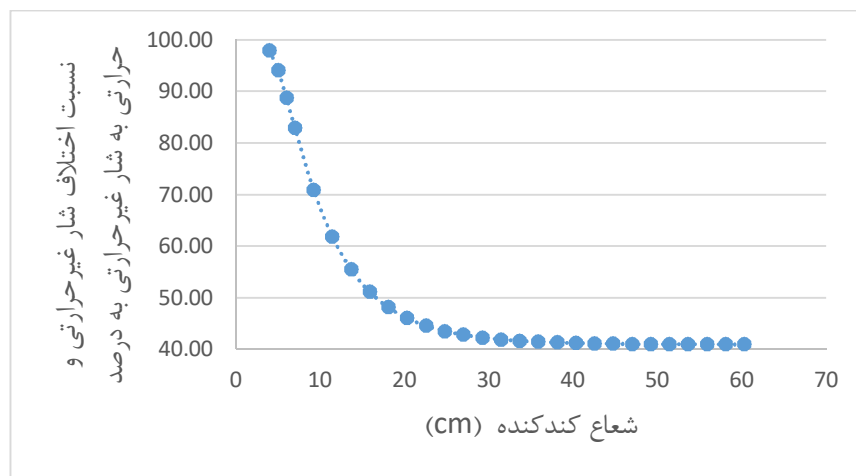
می‌دهند:



شکل ۴-۱۱ نمودار شار نوترون‌های حرارتی در حجم کندکننده پارافین برحسب شعاع شعاع کندکننده



شکل ۴-۱۲ نمودار شار نوترون‌های غیرحرارتی در حجم کندکننده پارافین برحسب شعاع شعاع کندکننده



شکل ۴-۱۳ نمودار نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی به درصد برحسب شعاع کندکننده

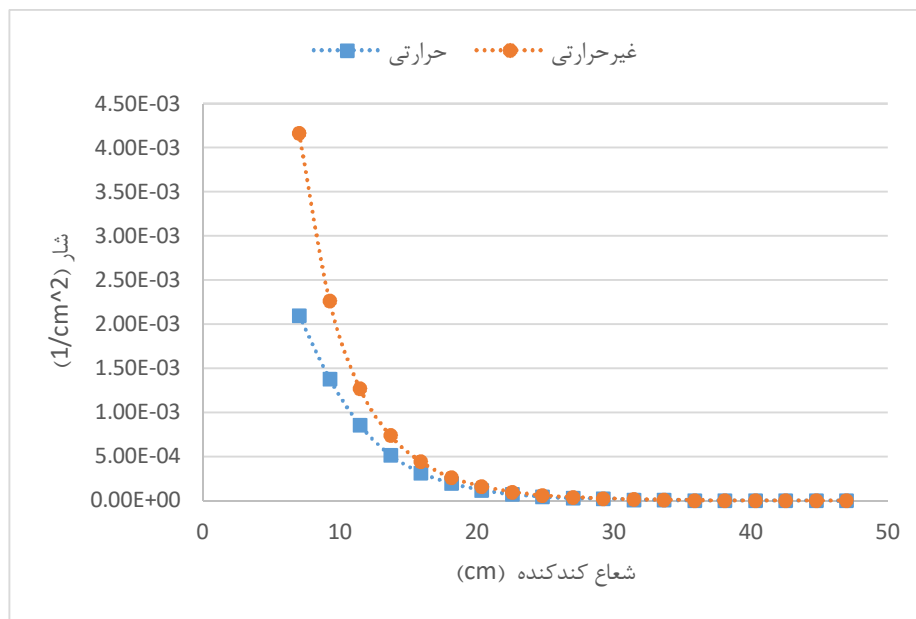
۳-۳-۴ بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین به کمک مقایسه شار حرارتی و

غیرحرارتی در آشکارساز نقطه‌ای

در ادامه کره‌ای از جنس پارافین به شعاع ۵۲ سانتی‌متر در اطراف چشمه قرار داده شد و سپس شار نوترون به وسیله آشکارسازهای نقطه‌ای به شعاع ۱ cm به کمک تالی f۵ محاسبه شد. مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در این نقاط می‌تواند در بررسی نحوه تغییر نسبت آن‌ها و کمک به یافتن شعاع پیشنهادی برای پارافین مفید واقع شود.

جدول ۴-۷ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در آشکارسازهایی به شعاع ۱ cm در پارافین

شعاع (cm)	شار حرارتی (۱/cm ^۲)	شار غیرحرارتی (۱/cm ^۲)	نسبت شار حرارتی به کل به درصد (۱/cm ^۲)	نسبت اختلاف شارها به شار غیرحرارتی به درصد (۱/cm ^۲)
۷	۲.۱۰E-۰۳	۴.۱۷E-۰۳	۳۳.۵۲	۴۹.۵۹
۹.۲۲	۱.۳۸E-۰۳	۲.۲۷E-۰۳	۳۷.۹۰	۳۸.۹۷
۱۱.۴۴	۸.۵۸E-۰۴	۱.۲۷E-۰۳	۴۰.۲۳	۳۲.۶۹
۱۳.۶۶	۵.۲۱E-۰۴	۷.۴۰E-۰۴	۴۱.۳۳	۲۹.۵۷
۱۵.۸۸	۳.۱۸E-۰۴	۴.۴۵E-۰۴	۴۱.۶۶	۲۸.۶۰
۱۸.۱	۱.۹۸E-۰۴	۲.۶۲E-۰۴	۴۳.۰۳	۲۴.۴۶
۲۰.۳۲	۱.۲۱E-۰۴	۱.۶۶E-۰۴	۴۲.۲۳	۲۶.۹۱
۲۲.۵۴	۷.۳۸E-۰۵	۱.۰۱E-۰۴	۴۲.۱۶	۲۷.۱۱
۲۴.۷۶	۴.۵۵E-۰۵	۶.۱۹E-۰۵	۴۲.۳۴	۲۶.۵۶
۲۶.۹۸	۲.۹۵E-۰۵	۴.۱۳E-۰۵	۴۱.۶۱	۲۸.۷۳
۳۱.۴۲	۱.۳۰E-۰۵	۱.۷۰E-۰۵	۴۳.۴۳	۲۳.۲۲
۳۳.۶۴	۸.۴۳E-۰۶	۱.۲۱E-۰۵	۴۱.۰۷	۳۰.۳۲۳
۳۵.۸۶	۵.۵۸E-۰۶	۶.۹۹E-۰۶	۴۴.۴۰	۲۰.۱۴
۳۸.۰۸	۳.۳۳E-۰۶	۴.۹۴E-۰۶	۴۰.۲۸	۳۲.۵۴
۴۰.۳	۲.۸۷E-۰۶	۳.۰۸E-۰۶	۴۸.۲۹	۶.۶۱
۴۲.۵۲	۱.۴۱E-۰۶	۲.۲۰E-۰۶	۳۹.۰۴	۳۵.۹۶
۴۴.۷۴	۱.۰۱E-۰۶	۱.۴۶E-۰۶	۴۰.۸۵	۳۰.۹۵
۴۶.۹۶	۵.۳۶E-۰۷	۸.۳۷E-۰۷	۳۹.۰۴	۳۵.۹۵



شکل ۴-۱۴ مقایسه نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در محیط پارافین به کمک آشکارساز نقطه‌ای

همانطور که در نمودار فوق پیداست ابتدا تفاوت شار نوترون‌های غیرحرارتی و حرارتی مقدار زیادی است چون محیط برای برخورد نوترون‌های سریع و تبدیل شدن آن‌ها به نوترون حرارتی فراهم نیست. با افزایش شعاع کندکننده این مقادیر به یکدیگر نزدیک می‌شوند و دیگر افزودن شعاع کندکننده بی‌اثر می‌شود.

با توجه به نتایج سه بخش قبل، شعاع ۳۱,۴۲ سانتی‌متر برای حد نهایی اثرگذاری افزودن پارافین بر شار نوترون‌ها پیشنهاد می‌شود. برای مقادیر بیشتر از این شعاع افزایش ضخامت کندکننده پارافین شار نوترون حرارتی تاثیر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. شعاع ۳۱,۴۲ سانتی‌متر برای نمودار شکل ۴-۱۱ که نسبت اختلاف شار غیرحرارتی و حرارتی به شار غیرحرارتی در سطح کره پارافین را نشان می‌دهد تقریباً در نقطه مینیمم واقع شده که بیانگر این است که در سطح آن شار حرارتی و غیر حرارتی تقریباً برابر است و پس از آن شاهد افزایش شار غیر حرارتی در سطح کره کندکننده هستیم. از نمودارهای ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نیز می‌توان مشاهده کرد پس از این ضخامت تغییری در نسبت‌های شار حرارتی و غیر حرارتی در حجم کندکننده و آشکارسازهای مورد اشاره رخ نمی‌دهد و نسبت شار حرارتی به کل در وضع مطلوبی قرار دارد.

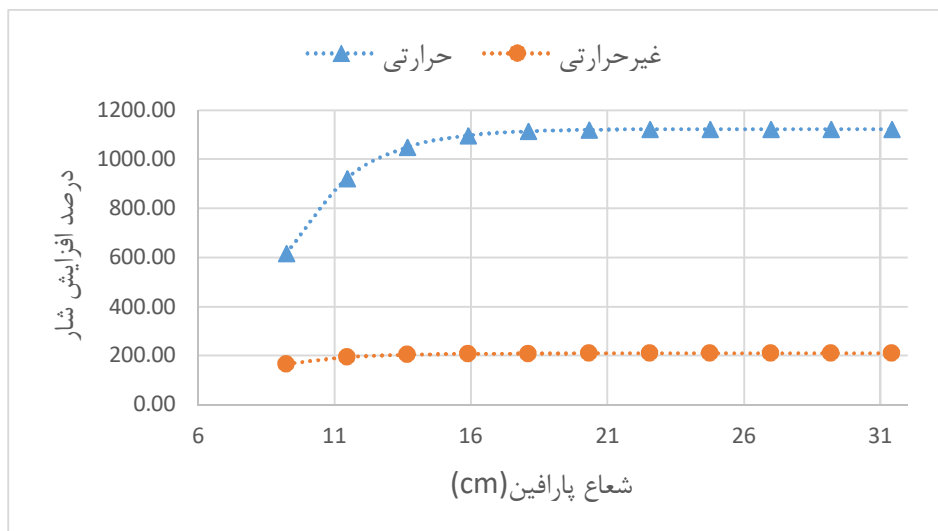
۴-۳-۴ بررسی اثر افزودن ضخامت کندکننده پارافین تا شعاع ۳۱,۴۲ سانتی‌متر بر شار سطح کره پارافین به شعاع ۷ سانتی‌متر

پس از تعیین ۳۱,۴۲ سانتی‌متر برای شعاع کره پارافین، به بررسی اثر افزودن ضخامت از شعاع ۷ سانتی‌متر که قبلاً حداکثر شار حرارتی مشاهده شده بود، تا این شعاع بر شار حرارتی و غیرحرارتی سطح کره پارافین در شعاع ۷ سانتی‌متر پرداخته شد. افزایش ضخامت‌ها به صورت ۰,۲۸ انجام شد و نتایج به صورت زیر می‌باشد:

جدول ۴-۸ مقایسه شار نوترون‌ها در سطح کره پارافین به شعاع ۷ cm در اثر افزودن ضخامت پارافین

شعاع پارافین (cm)	شار حرارتی ($1/cm^2$)	شار غیرحرارتی ($1/cm^2$)	درصد افزایش شار حرارتی	درصد افزایش شار غیرحرارتی
۹.۲۲	$1.25E-03$	$3.28E-03$	۶۱۶.۴۷	۱۶۶.۷۲
۱۱.۴۴	$1.78E-03$	$3.79E-03$	۹۲۲.۶۴	۱۹۳.۶۶
۱۳.۶۶	$2.00E-03$	$3.98E-03$	۱۰۴۹.۱۳	۲۰۳.۸۰
۱۵.۸۸	$2.09E-03$	$4.04E-03$	۱۰۹۶.۷۶	۲۰۷.۴۴
۱۸.۱	$2.12E-03$	$4.07E-03$	۱۱۱۳.۹۲	۲۰۸.۷۶
۲۰.۳۲	$2.13E-03$	$4.08E-03$	۱۱۱۹.۷۷	۲۰۹.۱۹
۲۲.۵۴	$2.13E-03$	$4.08E-03$	۱۱۲۱.۹۴	۲۰۹.۴۶
۲۴.۷۶	$2.13E-03$	$4.08E-03$	۱۱۲۲.۷۶	۲۰۹.۴۴
۲۶.۹۸	$2.13E-03$	$4.08E-03$	۱۱۲۲.۷۲	۲۰۹.۳۴
۲۹.۲	$2.13E-03$	$4.08E-03$	۱۱۲۳.۰۳	۲۰۹.۳۲
۳۱.۴۲	$2.13E-03$	$4.08E-03$	۱۱۲۲.۵۷	۲۰۹.۳۲

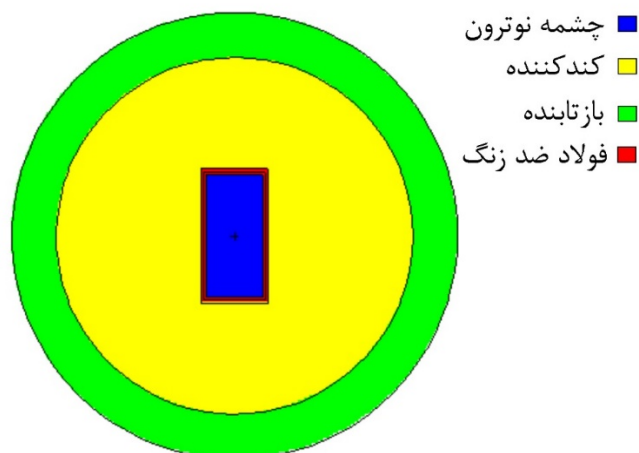
نتایج نشان می‌دهد افزودن ضخامت‌های بیشتر از پارافین می‌تواند تا شعاع تقریباً ۱۸ سانتی‌متری نوترون‌های حرارتی را در سطح کره پارافین به شعاع ۷ سانتی‌متر افزایش دهد. افزایش شار در این سطح برای نوترون‌های غیرحرارتی محدودتر بوده و تقریباً از شعاع ۱۴ سانتی‌متر به بعد افزایش شار برای آن‌ها مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴-۱۵ مقایسه درصد افزایش شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در سطح کره پارافین به شعاع ۷cm در اثر افزودن ضخامت‌های بیشتر پارافین

۴-۴ بررسی اثر افزودن بازتابنده به پیکربندی چشمه

در این بخش با صرف نظر کردن از برخی فاکتورها مانند میزان گاما‌های تولید شده، هزینه و خواص شیمیایی بازتابنده، فقط اثر افزودن یک لایه بازتابنده بر شار نوترون‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور چشمه در مرکز کره‌ای از جنس ماده کندکننده قرار داده شد و سپس ماده بازتابنده بصورت کره‌ای کندکننده را دربرگرفت. شکل ۴-۱۶ پیکربندی استفاده شده در این محاسبات را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶ پیکربندی چشمه نوترون در مرکز کندکننده و بازتابنده اطراف آن

۴-۴-۱ افزودن بازتابنده به کندکننده در شعاع ۷ سانتی متر

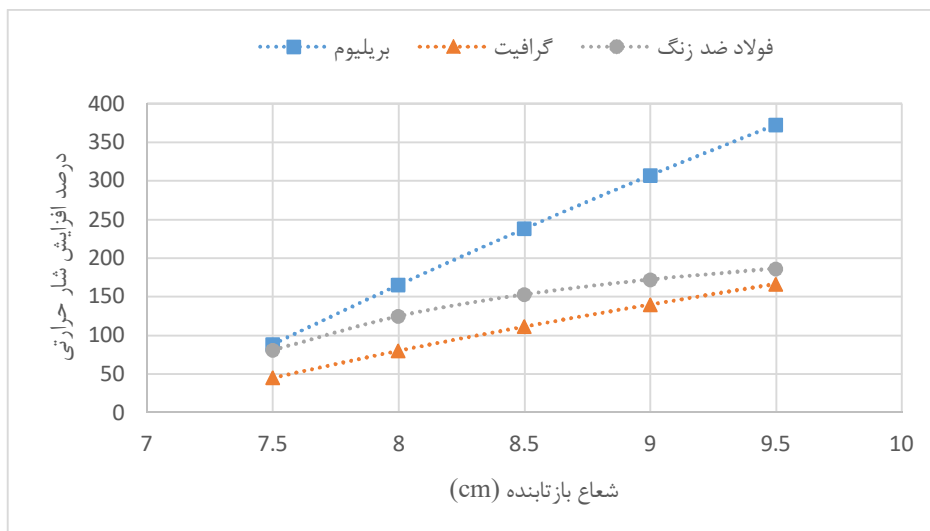
با توجه به نتایج بدست آمده در قسمت‌های قبل، که در آن بیشترین شار نوترون‌های حرارتی را برای سه کندکننده پارافین، پلی اتیلن و آب به ترتیب در شعاع‌های ۷، ۸ و ۷، ۸ سانتی متر کره کندکننده مشاهده شد، این مواد با شعاع‌های مذکور به عنوان کندکننده انتخاب گردید و سپس از ۵، ۵ تا ۲، ۵ سانتی متر با واحدهای ۵، ۵ سانتی متری کره بازتابنده به اطراف آن اضافه شد. شار نوترون در سطح خارجی کندکننده با استفاده از تالی F۲ محاسبه گردید. مانند قسمت‌های پیشین مقادیر شار بدست آمده از کد به ازای یک نوترون می‌باشد. ابتدا به بررسی افزودن سه بازتابنده بریلیوم، گرافیت و فولاد ضد زنگ به کندکننده پارافین پرداختیم و نتایج زیر از خروجی کد استخراج گردید:

جدول ۴-۹ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۷ سانتی متر پارافین در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه

بازتابنده

شعاع بازتابنده (cm)	درصد افزایش شار		
	بریلیوم	گرافیت	فولاد ضد زنگ
۷.۵	۸۸.۷۱	۴۵.۱۶	۸۰.۹۹
۸	۱۶۵.۵۱	۸۰.۲۳	۱۲۵.۱۰
۸.۵	۲۳۸.۲۷	۱۱۱.۴۶	۱۵۳.۱۵
۹	۳۰۷.۴۳	۱۴۰.۱۴	۱۷۲.۵۰
۹.۵	۳۷۲.۹۴	۱۶۶.۸۱	۱۸۶.۷۵

بررسی نتایج فوق نشان می‌دهد اولاً افزودن لایه بازتابنده می‌تواند منجر به افزایش شار نوترون‌های حرارتی شود و همچنین بریلیوم بیشترین اثر را بر شار نوترون‌های حرارتی خواهد داشت. شکل ۴-۱۸ به خوبی این مطلب را نشان می‌دهد.



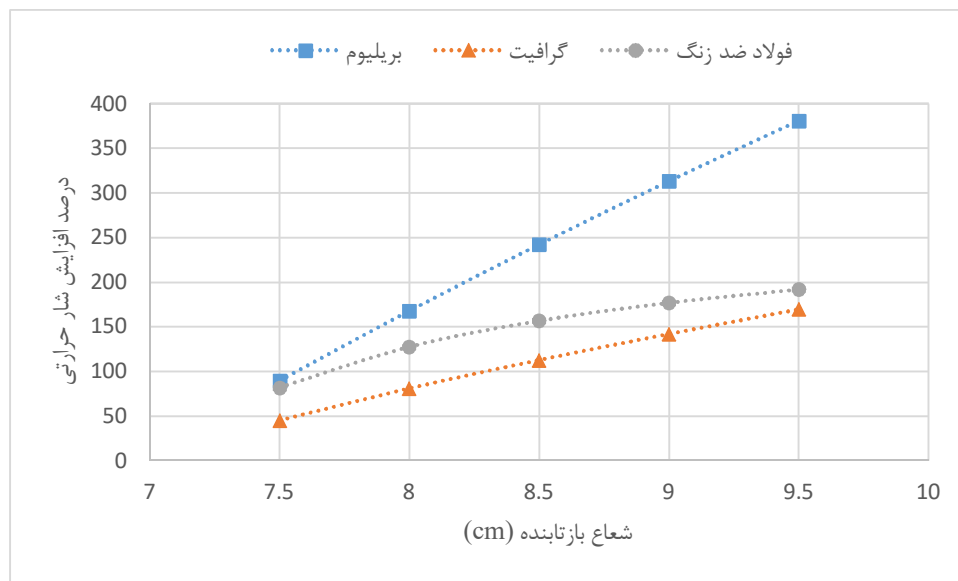
شکل ۴-۱۷ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۷ سانتی متر پرافین در اثر افزودن ضخامت های مختلف سه بازتابنده

حال اثر افزودن سه بازتابنده فوق را بر پلی اتیلن بررسی می کنیم. نتایج بصورت زیر می باشند:

جدول ۴-۱۰ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۷ سانتی متر پلی اتیلن در اثر افزودن ضخامت های مختلف سه بازتابنده

شعاع بازتابنده (cm)	درصد افزایش شار		
	بریلیوم	گرافیت	فولاد ضد زنگ
۷.۵	۸۹.۷۷	۴۵.۱۴	۸۲.۰۶
۸	۱۶۷.۸۵	۸۱.۰۹	۱۲۷.۵۸
۸.۵	۲۴۲.۲۲	۱۱۲.۸۲	۱۵۶.۷۸
۹	۳۱۳.۲۵	۱۴۲.۰۱	۱۷۶.۸۷
۹.۵	۳۸۰.۹۲	۱۶۹.۶۰	۱۹۱.۸۳

نتایج فوق نیز مشابه پرافین بوده و عملکرد سه بازتابنده به همان صورت می باشد. بریلیوم بیشترین اثر را داشته و فولاد ضد زنگ و گرافیت در رتبه های بعدی قرار دارند. در شکل ۴-۱۹ عملکرد این سه بازتابنده برای پلی اتیلن آورده شده است.

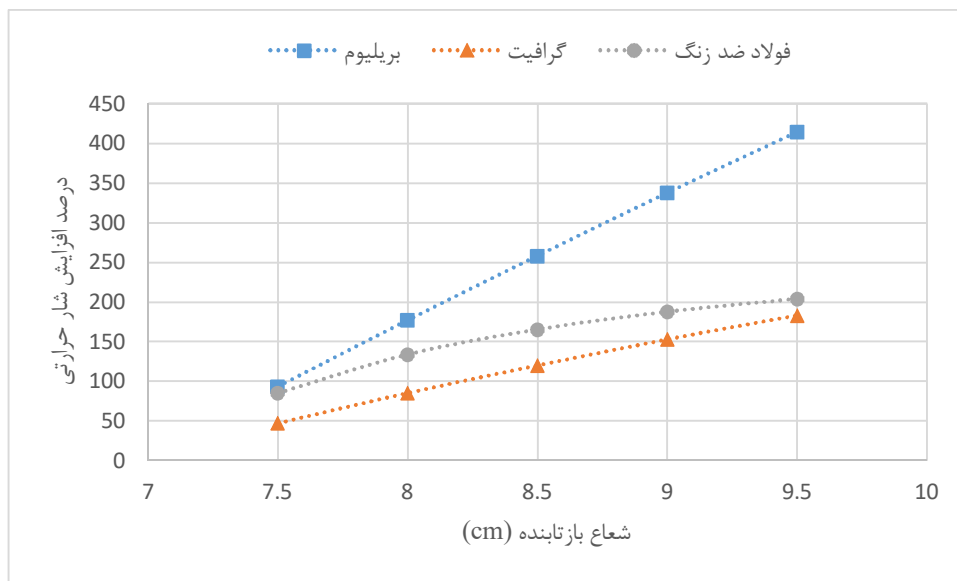


شکل ۴-۱۸ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۷ سانتی متر پلی اتیلن در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده

در نهایت برای کندکننده آب اثر بازتابنده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد. رفتاری مشابه دو کندکننده پارافین و پلی اتیلن برای آب نیز شاهد بودیم. جدول زیر به بیان عداد حاصل از شبیه‌سازی‌ها می‌پردازد:

جدول ۴-۱۱ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۸ سانتی متر آب در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده

شعاع بازتابنده (cm)	درصد افزایش شار		
	بریلیوم	گرافیت	فولاد ضد زنگ
۷.۵	۹۳.۴۵	۴۷.۱۷	۸۵.۲۴
۸	۱۷۷.۱۷	۸۵.۳۶	۱۳۴.۰۰
۸.۵	۲۵۸.۳۰	۱۲۰.۱۲	۱۶۵.۵۸
۹	۳۳۷.۷۲	۱۵۲.۹۸	۱۸۷.۷۹
۹.۵	۴۱۴.۳۴	۱۸۳.۲۳	۲۰۴.۱۱



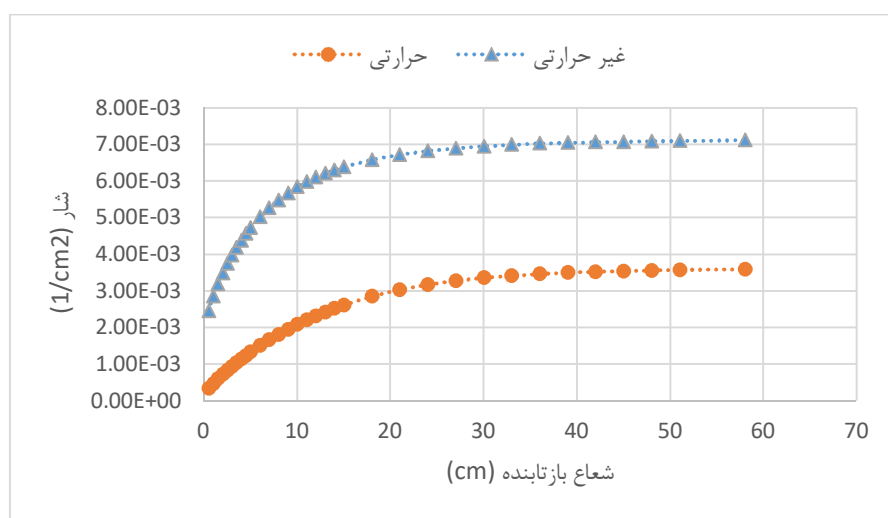
شکل ۴-۱۹ مقایسه درصد افزایش شار در سطح کره به شعاع ۸ سانتی متر آب در اثر افزودن ضخامت‌های مختلف سه بازتابنده

نتایج نشان می‌دهد که افزودن هر کدام از بازتابنده‌ها بر پیکربندی چشمه Am-Be می‌تواند منجر به افزایش شار نوترون‌ها شود و با افزودن ضخامت بازتابنده میزان اثر بازتابنده افزایش می‌یابد. از مقایسه نتایج بدست آمده برای شار نوترون‌های حرارتی نتیجه می‌شود عنصر بریلیوم توان بهتری در بازگشت دادن نوترون‌های در حال گریز از چشمه و افزایش شار نوترون‌های حرارتی در سطح کره کندکننده دارد. این افزایش شار را می‌توان با توجه به اینکه بریلیوم با توجه به سطح مقطع‌های پراکندگی و جذب این عنصر و همچنین اینکه می‌تواند در برهم‌کنش‌های تکثیر نوترون نیز شرکت کند، توجیه کرد.

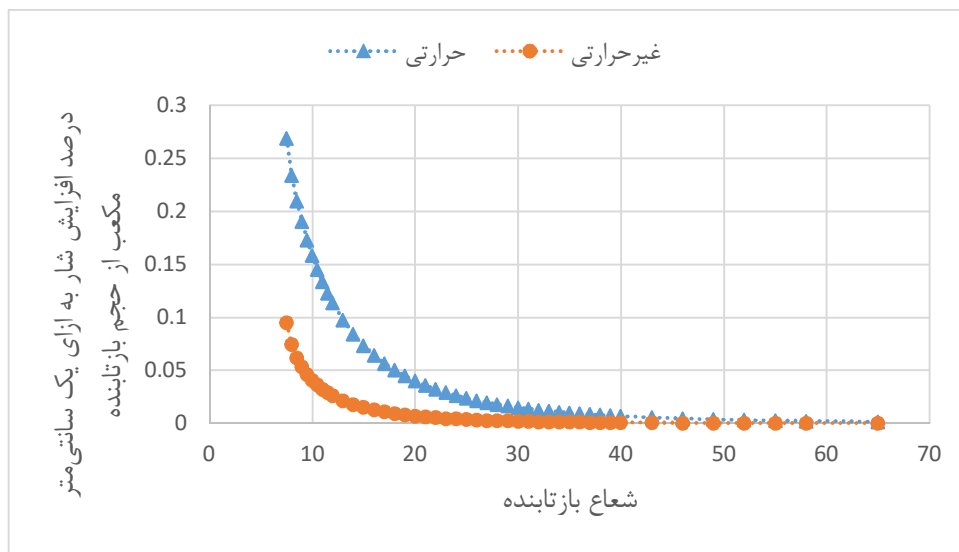
در نمودارها مشاهده می‌شود که شیب نمودار برای بریلیوم حالت صعودی خود را حفظ کرده و می‌توان با افزودن ضخامت‌های بیشتری از بریلیوم به افزایش شار نوترون‌های حرارتی کمک کرد. در ادامه به محاسبه ضخامتی که افزودن بریلیوم می‌تواند مفید باشد پرداخته شده است.

۴-۴-۲ محاسبه شعاع اثرگذاری بریلیوم بر کره پارافین به شعاع ۷ سانتی‌متر

در ادامه با توجه به انتخاب بریلیوم به عنوان بازتابنده به بررسی اثر افزودن ضخامت‌های بیشتر این عنصر به کندکننده پارافین، بر شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی پرداخته شده است. شار حرارتی شده محاسبه شده برای سطح کره پارافین (بدون حضور بازتابنده) به شعاع ۷ سانتی‌متر با توجه به نتایج بخش ۴-۲ مقدار $1.74E-4$ و برای نوترون‌های غیرحرارتی $3.87E-3$ می‌باشد. از نتایج مشاهده می‌شود که شار نوترون‌های غیرحرارتی بیشتر از حرارتی بوده و با کندکردن آن‌ها می‌توان بر شار حرارتی افزود. در ادامه به بررسی اثر افزودن بریلیوم به عنوان بازتابنده و نوعی کندکننده و همچنین تکثیر کننده به سیستم پرداخته شد. افزودن این لایه می‌تواند در کندسازی نوترون‌ها و جلوگیری از فرار نوترون‌ها و در نهایت افزایش شار نوترون‌های حرارتی نقش داشته و با توجه به اینکه در حفاظت در برابر نوترون‌ها مهمترین روش کندسازی نوترون و جلوگیری از خروج آن از چشمه است، نقش حفاظ اولیه برای نوترون را نیز برعهده داشته باشد. به منظور یافتن شعاع موثر بریلیوم، شعاع را افزایش داده و در هر مرحله شار را روی سطح کره به شعاع ۷ سانتی‌متر پارافین با استفاده از تالی f_2 اندازه‌گیری کردیم. شکل‌های ۴-۲۱ و ۴-۲۲ بیانگر نتایج حاصل و درصد افزایش شار ناشی از افزودن بازتابنده به پیکربندی چشمه می‌باشد.



شکل ۴-۲۰ مقایسه شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در اثر افزودن ضخامت‌های بازتابنده بریلیوم به کندکننده پارافین



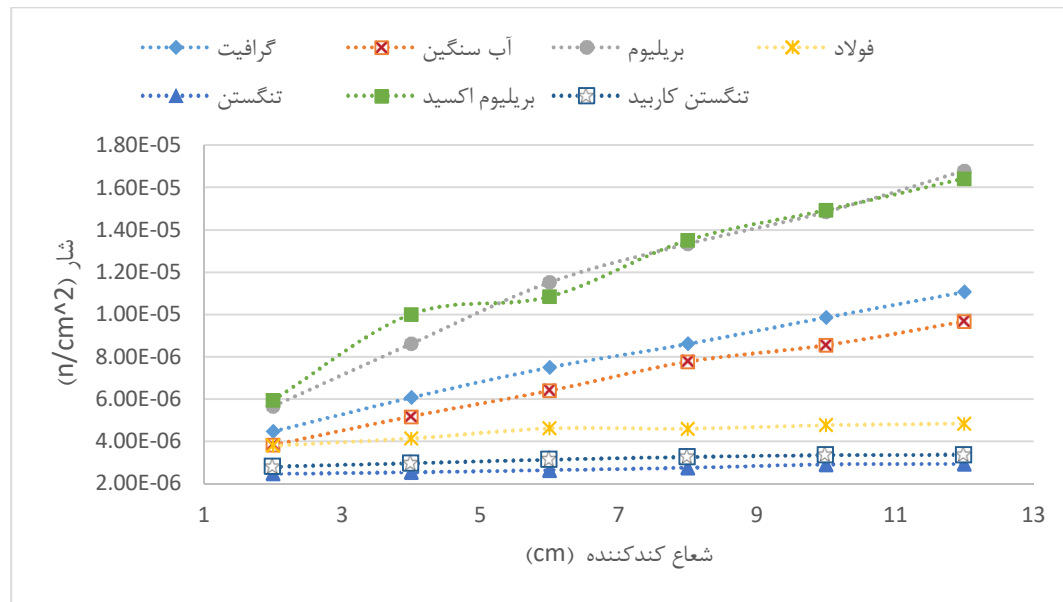
شکل ۴-۲۱ مقایسه درصد افزایش شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی در اثر افزودن ضخامت‌های بازتابنده بریلیوم به کندکننده پارافین

نتایج نشان می‌دهد افزودن بریلیوم در ابتدا منجر به افزایش شار نوترون‌های حرارتی و غیرحرارتی شده و از شعاع تقریباً ۳۰ سانتی‌متری به بعد افزودن آن تاثیر چندانی بر شار نوترون‌ها نداشته و افزایش شعاع بریلیوم بیش از این مقدار توجیهی ندارد. در نهایت ضخامت ۷ سانتی‌متر پارافین در مرکز کره‌ای به شعاع ۳۰ سانتی‌متر از بریلیوم به عنوان هندسه چشمه در این بخش پیشنهاد می‌شود.

۴-۳-۴ مقایسه اثر افزودن بازتابنده‌های مختلف به کندکننده در شعاع ۳۱,۴۲ سانتی‌متر

در ادامه محاسبات مربوط به بازتابنده، اثر افزودن مواد بازتابنده مختلف در شعاع ۳۱,۴۲ که به عنوان شعاع مورد نظر برای پارافین انتخاب شد، پرداخته شده است. در این مرحله از تالی F5 و دو آشکارساز کروی به شعاع یک سانتی‌متر در شعاع‌های ۷ و ۳۱,۴۲ سانتی‌متر استفاده شد. با توجه به اینکه برای آشکارساز واقع در ۷ سانتی‌متر به ازای افزودن شعاع‌های مختلف بازتابنده تغییری در شار مشاهده نشد جداول مربوط به این شعاع گزارش نشده است. میزان شار حرارتی برای تمام محاسبات در این آشکارساز 2.09×10^{-3} و شار

نوترون‌های غیرحرارتی $3-4.15E$ بدست آمده است. در ادامه محاسبات برای آشکارساز واقع در 31.42 به منظور مقایسه بین بازتابنده‌های مختلف آورده شده است.



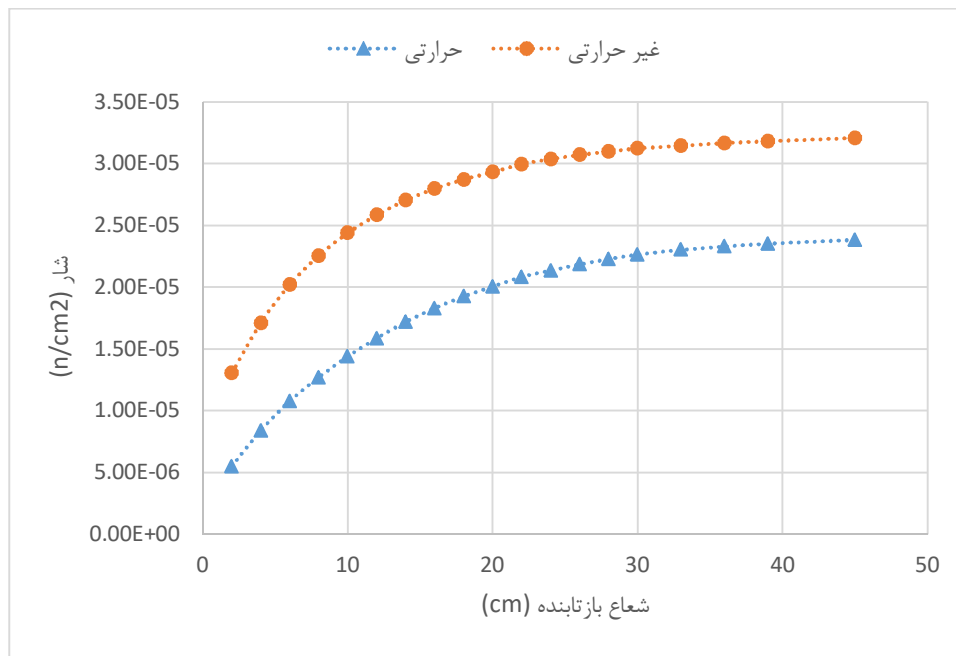
شکل ۴-۲۲ مقایسه اثر بازتابنده‌های مختلف بر شار نوترون‌های حرارتی سطح کره کندکننده پارافین به شعاع 31.42

از محاسبات فوق نتیجه می‌شود افزایش ضخامت بازتابنده افزوده شده به شعاع 31.42 سانتی‌متر کندکننده نمی‌تواند در آشکارساز واقع در شعاع 7 سانتی‌متر اثر مثبتی بر شار نوترون‌ها داشته باشد و فقط در شار لبه و شار کل اثر گذار است. همچنین بریلیوم و بریلیوم اکسید به عنوان بازتابنده‌های برتر انتخاب شده است.

۴-۴-۴ محاسبه شعاع اثرگذاری بریلیوم بر کره پارافین به شعاع 31.42

مشابه حالت قبل به منظور تعیین شعاع اثرگذاری بریلیوم و بررسی دقیق تر اثر افزودن این عنصر به هندسه چشمه، شعاع‌های مختلفی از بریلیوم را در اطراف کره پارافین به شعاع 31.42 سانتی‌متر قرار دادیم. ابتدا شار در سطح کره پارافین بدون بازتابنده اندازه گیری شد که این مقدار برای نوترون حرارتی $6-1.54E$ و برای نوترون غیرحرارتی $6-6.42E$ بدست آمد. سپس در هر محله ضخامت بریلیوم را افزایش داده و به

محاسبه شار در سطح کره پارفین پرداختیم که در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. شایان ذکر است محاسبات با استفاده از تالی f_2 انجام شد و اعداد به ازای یک نوترون گزارش شده هستند. همچنین خطای گزارش شده توسط کد کمتر از یک درصد می‌باشد. شکل ۴-۲۴ نتایج را بیان می‌کند:



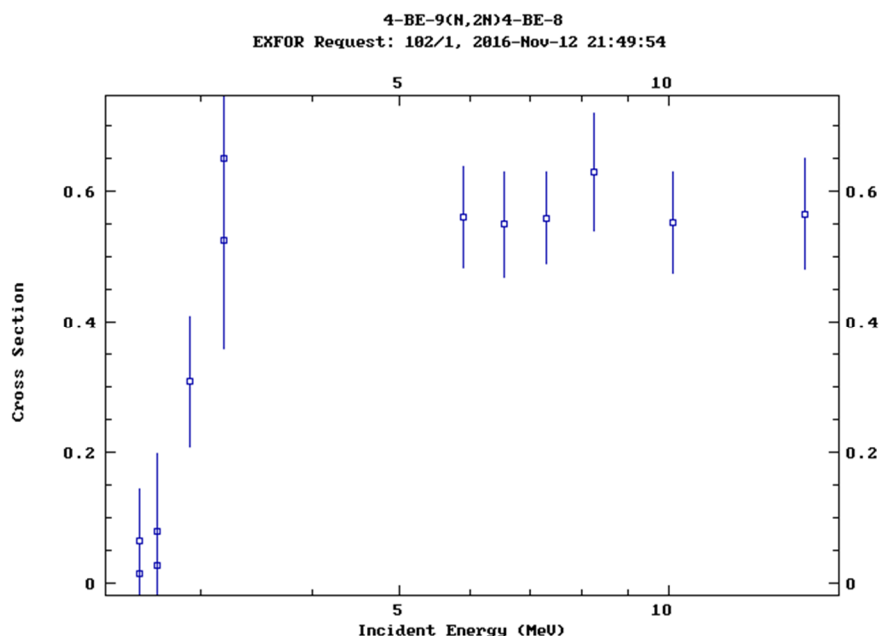
شکل ۴-۲۳ بررسی شار نوترون‌ها در اثر افزودن بازتابنده بریلیوم به اطراف کندکننده پارفین به شعاع ۳۱٫۴۲ cm

همانطور که از شکل فوق پیداست افزودن بریلوم تا شعاع حدود ۴۵ سانتی‌متری اثر صعودی قابل توجه بر شار نوترون‌های حرارتی دارد اما پس از این شعاع افزودن ضخامت‌های بیشتر اثر چندانی نداشته و توجیهی ندارد. با توجه به اینکه در شعاع‌های کمتر شار بیشتری را شاهد بودیم افزودن بریلیوم به این شعاع توصیه نمی‌شود.

۴-۵ بررسی امکان استفاده از تکثیر کننده نوترون در پیکربندی چشمه

در برهم‌کنش‌های تکثیر نوترون در اثر برخورد یک نوترون با هدف تعداد بیشتری نوترون تولید می‌شود.

این برهم‌کنش‌ها را می‌توان به سه گروه طبقه بندی کرد: واکنش‌های $(n, 2n)$ ، $(n, 3n)$ و $(n, A+2n)$



شکل ۴-۲۴ سطح مقطع برلیوم برای نوترون به منظور شرکت در واکنش $(n, 2n)$

۴-۶ پیکربندی های پیشنهادی از نتایج شبیه سازی ها

در نهایت با در نظر گرفتن تمام شبیه سازی ها و نتایج گذشته دو هندسه زیر می توانند گزینه های مناسبی جهت افزایش شار حرارتی در چشمه Am-Be باشند. در ادامه به بررسی این دو هندسه پرداخته شده است:

الف) چشمه در مرکز کره ای به شعاع ۳۱،۴۲ سانتی متر از پارافین

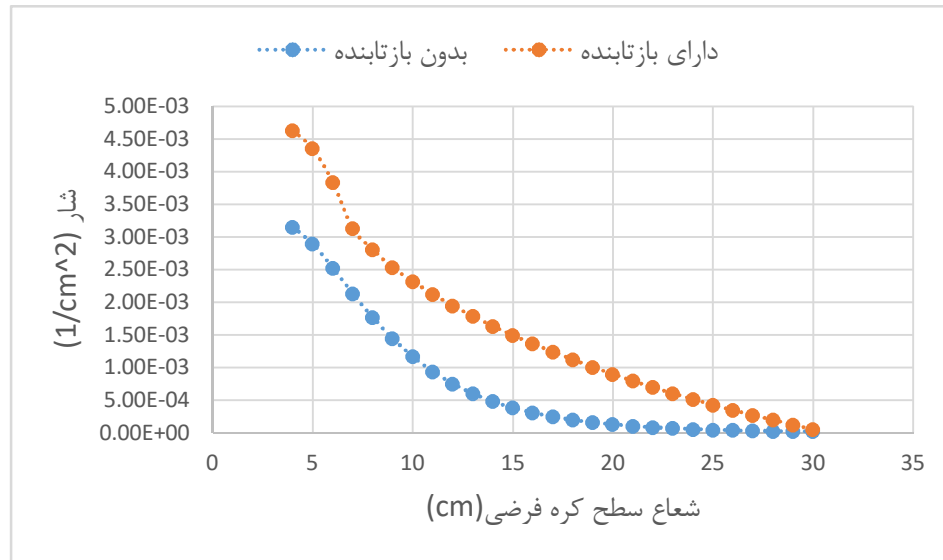
این هندسه از نتایج بخش ۴-۳ نتیجه گیری شده است و مزیت اصلی آن سهولت ساخت و قیمت بسیار پایین آن می باشد.

ب) چشمه در مرکز کره ای به شعاع ۷ سانتی متر از پارافین که آن را کره ای به شعاع ۳۰ سانتی متر برلیوم در برگرفته است:

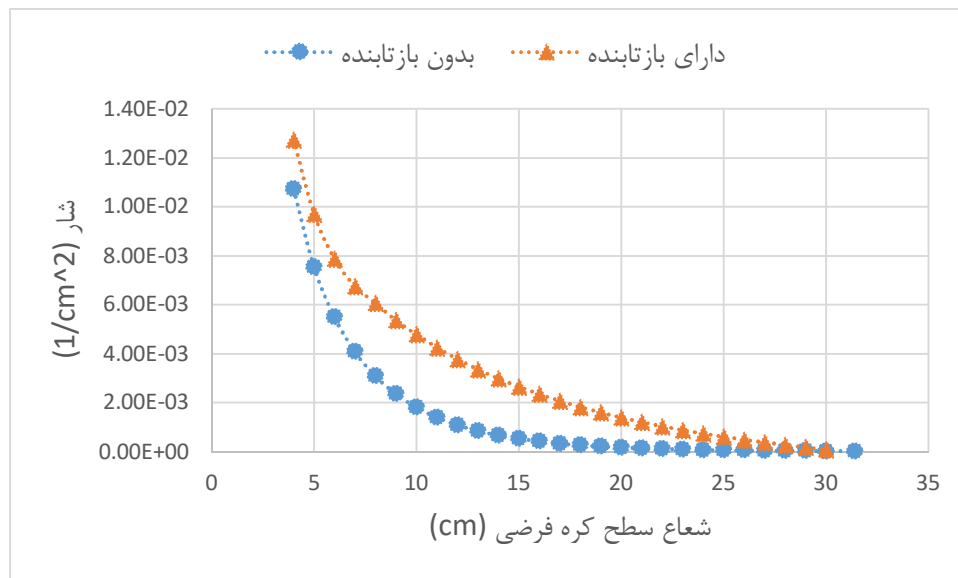
از نتایج بخش ۴-۲-۴ این شکل نتیجه گیری شده است. افزودن مقادیر بیشتری از ضخامت برای برلیوم اثر مثبت قابل توجهی بر شار نوترون های حرارتی سطح کره پارافین به شعاع ۷cm ندارد.

۴-۶-۱ مقایسه شار نوترون در سطوح مختلف برای هندسه‌های پیشنهادی

به منظور ارزیابی تغییرات شار در سطوح مختلف در داخل این هندسه، کره ای با شعاع های مختلف در داخل هندسه پیشنهادی فرض شد و تغییرات شار در سطح کره فرضی آن به کمک تالی f_2 محاسبه گردید که نتایج بصورت زیر است:



شکل ۴-۲۵ مقایسه تغییرات شار نوترون حرارتی در سطوح کره فرضی داخل هندسه‌های پیشنهادی

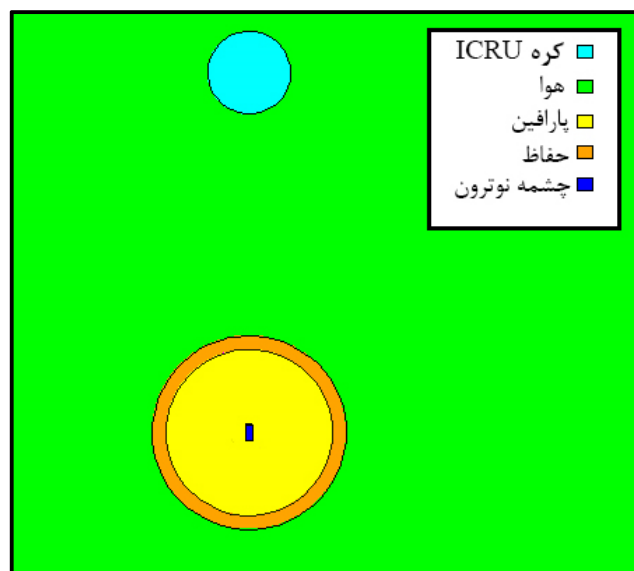


شکل ۴-۲۶ مقایسه تغییرات شار نوترون‌های غیرحرارتی در سطوح کره فرضی داخل هندسه‌های پیشنهادی

نتایج نشان می دهد در سطوح مختلف حالت پیشنهادی دوم یعنی شعاع ۷ سانتی متر پارافین در کره به شعاع ۳۰ سانتی متر برلیوم شار بیشتری را در سطوح مختلف دارا می باشد. اختلاف شار حرارتی با نزدیک شدن به انتهای پیکربندی چشمه کاهش می یابد. همچنین حالتی که قبلا شار حرارتی را در سطح خارجی کندکننده بررسی کردیم و قله در شعاع ۷ سانتی متری مشاهده شد به علت افزودن ضخامت های بیشتر از بین رفته است و شعاع ۴ الی ۷ سانتی متری به عنوان محل قرار دادن نمونه ای که می خواهیم با حداکثر شار نوترون حرارتی بمباران شود، پیشنهاد می شود.

۷-۴ مقایسه اثر حفاظ های مختلف برای دو هندسه پیشنهادی

۷-۴-۱ مقایسه اثر حفاظ های مختلف بر کره پارافین به شعاع ۳۱,۴۲ سانتی متر
به منظور مقایسه حفاظ های مختلف از کره مرجع ICRU [۴۱] استفاده شد. کره ICRU به شعاع ۱۵ سانتی متر در فاصله ۱۳۰ سانتی متری از چشمه قرار گرفت و داخل آن با ماده ای از جنس بافت بدن پر شد. شکل ۲۸-۴ نمایش پیکربندی مورد استفاده را نشان می دهد.



شکل ۴-۲۷ هندسه بدون بازتابنده استفاده شده در محاسبات حفاظ

برای بررسی اثر حفاظ‌ها و همچنین تغییرات آن با افزودن ضخامت حفاظ، انرژی نوترون و گاما برای شش ماده مختلف که به عنوان حفاظ مطرح هستند، در کره ICRU به کمک تالی‌های f_6^* برای نوترون و f_8^* برای گاما محاسبه گردید.

به منظور ارزیابی حفاظ‌های مطرح شده کمیت دز معادل در کره ICRU باید مورد محاسبه قرار گیرد که چون در این چشمه نوترون و گاما را همزمان خواهیم داشت، این کمیت باید برای نوترون و گاما به صورت مجزا محاسبه شود. دز معادل کل از جمع دز گاما و نوترون بدست می‌آید. در ادامه با توجه به اینکه نتایج شبیه‌سازی کد به ازای یک نوترون است، برای یک چشمه با اکتیویته یک کوری محاسبات دزیمتری به صورت زیر انجام شده است:

الف) محاسبه دز گاما

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و خروجی تالی f_8^* بر حسب MeV می‌باشد که از ضرب آن در ضریب تبدیل 1.6×10^{-13} به ژول تبدیل می‌شود. جرم کره ICRU نیز مقدار 1.41×10^3 کیلوگرم می‌باشد که از تقسیم انرژی بر حسب ژول بر جرم بر حسب کیلوگرم داریم: 1.9×10^{-17} از ضرب این مقدار در اکتیویته چشمه بر حسب بکرل دز بر حسب گری به ازای یک ثانیه بدست می‌آید. در نهایت با ضرب این مقدار در زمان و فاکتور کیفیت دز بر حسب میلی‌سیورت بر ساعت برای چشمه محاسبه می‌گردد.

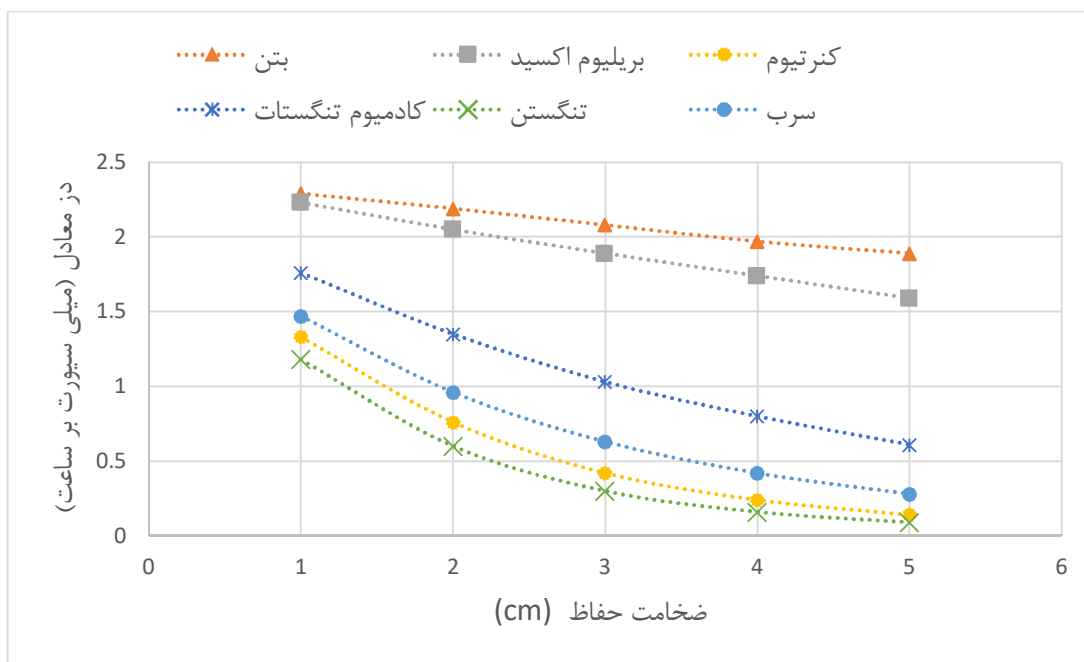
ب) محاسبه دز نوترون

تالی f_6^* خروجی بر حسب jerk/gr است که $1 \text{ joule} = 10^7 \text{ jerk}$ می‌باشد. از ضرب در فاکتور کیفیت برای نوترون‌های این بازه انرژی که 10^6 می‌باشد و همچنین استفاده از ضریب تبدیل مناسب و اکتیویته بر حسب بکرل، دز بر حسب میلی‌سیورت بر ساعت بدست می‌آید.

مقادیر دز نوترون و گاما برای این هندسه پیشنهادی بصورت زیر می‌باشد:

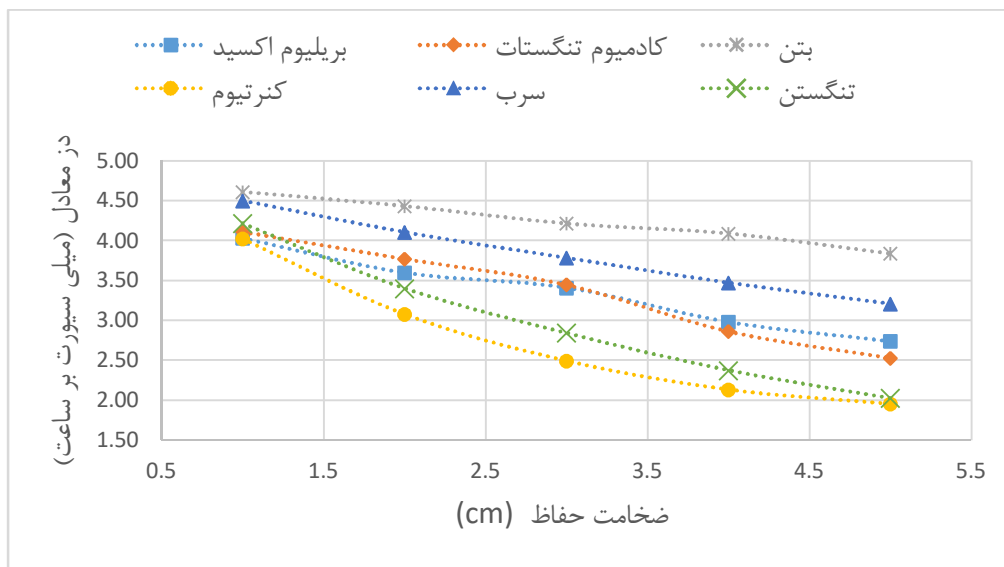
جدول ۴-۱۳ دز معادل برای گاما و نوترون بر حسب میلی سیورت بر ساعت برای حفاظ‌های مختلف چشمه Am-Be یک کوری در فاصله ۱,۳ متری از چشمه در کره ICRU

ضخامت حفاظ (cm)	سرب		برلیوم اکسید		بتن		تنگستن		کادمیوم تنگستات		Kennertium	
	گاما	نوترون	گاما	نوترون	گاما	نوترون	گاما	نوترون	گاما	نوترون	گاما	نوترون
۱	۱.۴۷	۴.۵۰	۲.۲۳	۴.۰۳	۲.۲۹	۴.۶۱	۱.۱۸	۴.۲۱	۱.۷۶	۴.۱۱	۱.۳۳	۴.۰۲۲
۲	۰.۹۶	۴.۱۱	۲.۰۵	۳.۶۰	۲.۱۹	۴.۴۳	۰.۶۰	۳.۴۰	۱.۳۵	۳.۷۷	۰.۷۶	۳.۰۷۷
۳	۰.۶۳	۳.۷۸	۱.۸۹	۳.۴۱	۲.۰۸	۴.۲۱	۰.۳۰	۲.۸۴	۱.۰۳	۳.۴۴	۰.۴۲	۲.۴۹۳
۴	۰.۴۲	۳.۴۷	۱.۷۴	۲.۹۸	۱.۹۷	۴.۰۹	۰.۱۶	۲.۳۸	۰.۸۰	۲.۸۶	۰.۲۴	۲.۱۳۲
۵	۰.۲۸	۳.۲۱	۱.۵۹	۲.۷۴	۱.۸۹	۳.۸۴	۰.۰۹	۲.۰۲	۰.۶۱	۲.۵۳	۰.۱۴	۱.۹۵۵



شکل ۴-۲۸ مقایسه تغییرات دز معادل برای گاما در اثر افزودن ضخامت حفاظ‌های مختلف در داخل حجم کره ICRU

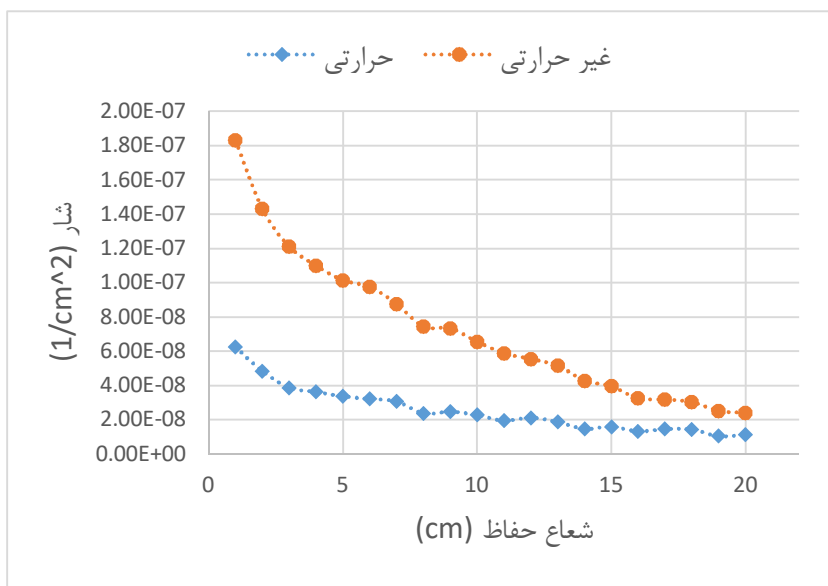
شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد آلیاژ Kennertium که از ۷۶٪ تنگستن، ۱۵٪ نیکل و ۹٪ مس ساخته شده و دارای چگالی 16.8 gr/cm^3 می‌باشد، می‌تواند گزینه مناسبی جهت حفاظت همزمان در برابر نوترون‌ها و گاما باشد.



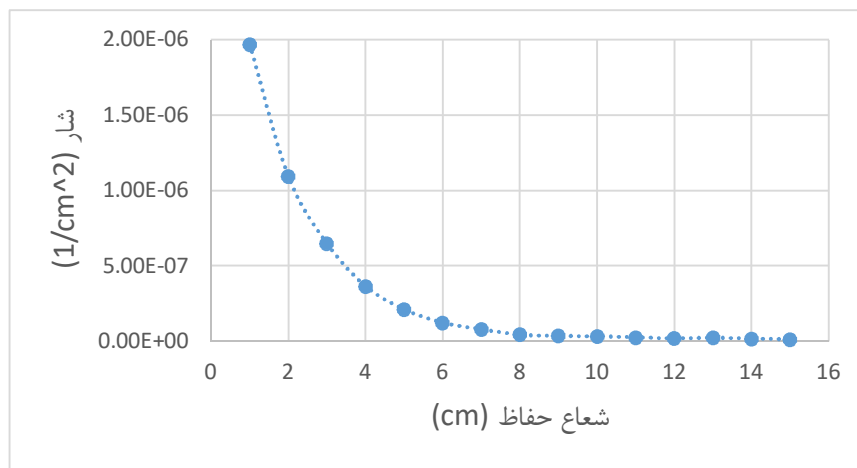
شکل ۴-۲۹ مقایسه تغییرات دز معادل برای نوترون در اثر افزودن ضخامت حفاظ‌های مختلف در داخل حجم کره ICRU

۴-۷-۱-۱ بررسی اثر افزودن ضخامت‌های مختلف حفاظ کنتیوم

با توجه به اینکه اکتیویته خاصی برای چشمه در نظر گرفته نشده است به دنبال حالتی هستیم که هندسه پیشنهادی برای هر اکتیویته‌ای دارای حفاظ مناسب باشد. بدین اثر افزودن ضخامت‌های مختلف حفاظ بر شار نوترون و گاما در کره ICRU مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بصورت زیر است:



شکل ۴-۳۰ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار نوترون در حجم کره ICRU



شکل ۴-۳۱ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار گاما در حجم کره ICRU

نتایج نشان می‌دهد که مطابق انتظار نوترون‌های حرارتی به علت سطح مقطع بیشتری که نسبت به نوترون‌های سریع دارند، در محیط پیرامون چشمه بیشتر جذب شده‌اند و به میزان کمتری از نوترون‌های غیرحرارتی به کره ICRU رسیده‌اند. افزودن ضخامت حفاظ منجر به کاهش شار این نوترون‌ها می‌شود و تا شعاع ۱۵ سانتی‌متر این افزایش می‌تواند اثر قابل قبولی را داشته باشد. در مورد حفاظت در برابر گاما نیز تقریباً پس از ضخامت ۶ cm شار گاما به مقدار بسیار ناچیزی رسیده است. در این حالت با توجه به چگالی و حجم آلیاژ کنتریوم جرم آن ۳۵۷۷,۷۸ کیلوگرم خواهد بود.

۴-۷-۲ مقایسه اثر حفاظ‌های مختلف بر کره پارافین به شعاع ۷ سانتی‌متر و بازتابنده به شعاع ۳۰ سانتی‌متر

کلیه محاسبات مشابه حالت قبل برای این هندسه پیشنهادی نیز انجام شد و نتایج بر حسب دز معادل در جدول ۴-۳۴ آورده شده است. در این هندسه نیز آلیاژ کنتریوم دارای بهترین اثر بوده و تنگستن و کادمیوم تنگستات در رده‌های بعدی قرار دارند. با توجه به مقدار زیاد دز نوترون نسبت به حالت قبلاً اولاً نتایج

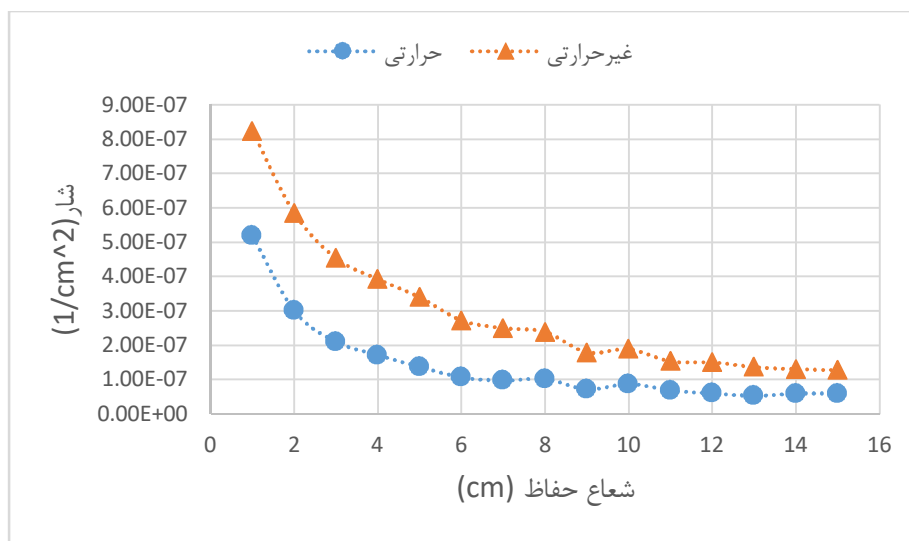
قسمت قبل که شار کلی نوترون در این هندسه بالاتر است تایید می شود و ثانیا حفاظ سازی بیشتر در برابر نوترون لازم است.

جدول ۴-۱۴ دز معادل برای گاما و نوترون بر حسب میلی سیورت بر ساعت برای حفاظهای مختلف چشمه Am-Be یک کوری در فاصله ۱,۳ متری از چشمه در کره ICRU

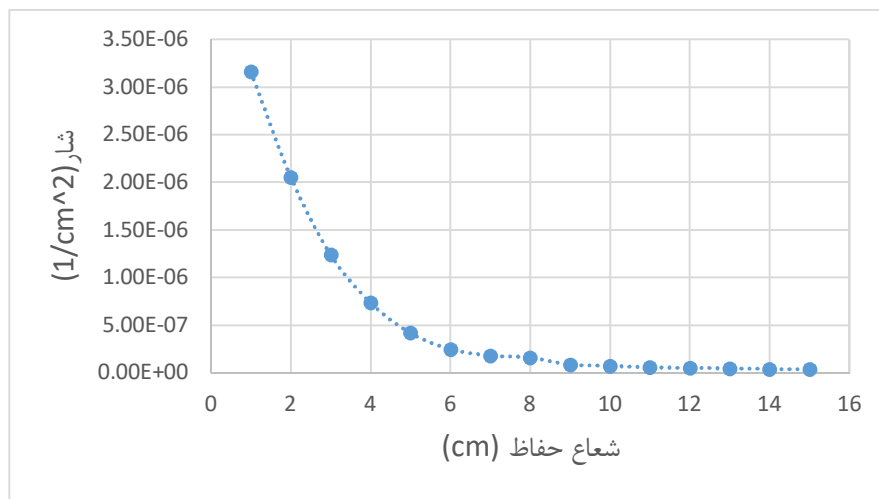
ضخامت حفاظ (cm)	سرب		بتن		تنگستن		کادمیوم تنگستات		Kennertium	
	گاما	نوترون	گاما	نوترون	گاما	نوترون	گاما	نوترون	گاما	نوترون
۱	۱.۳۳	۷.۶۵	۱.۷۸	۷.۸۵	۲.۱۰	۶.۹۶	۱.۲۰	۷.۵۹	۲.۴۲	۷.۱۱
۲	۱.۰۸	۷.۲۰	۱.۶۱	۷.۳۵	۱.۱۳	۶.۰۰	۰.۹۶	۶.۷۰	۱.۴۹	۵.۸۵
۳	۰.۸۵	۷.۰۵	۱.۵۱	۶.۹۵	۰.۶۸	۵.۰۸	۰.۸۰	۶.۰۷	۰.۹۱	۴.۷۱
۴	۰.۷۲	۶.۶۶	۱.۴۴	۶.۷۲	۰.۴۱	۴.۳۵	۰.۶۱	۵.۳۴	۰.۵۴	۴.۰۲
۵	۰.۶۲	۶.۰۹	۱.۳۸	۶.۳۴	۰.۲۴	۳.۵۰	۰.۴۹	۴.۹۶	۰.۳۱	۳.۵۲

۴-۷-۲-۱ بررسی اثر افزودن ضخامت‌های مختلف حفاظ کنتیوم

مشابه قسمت قبل اگر چشمه دارای اکتیویته معینی نباشد، باید حداکثر ضخامت اثر گذاری را یافت که برای هر چشمه‌ای قابل قبول باشد، بدین منظور ضخامت حفاظ کنتیوم افزایش داده شد و شار نوترون و گاما در کره ICRU مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در نمودارهای زیر آورده شده است:



شکل ۴-۳۲ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار نوترون در حجم کره ICRU

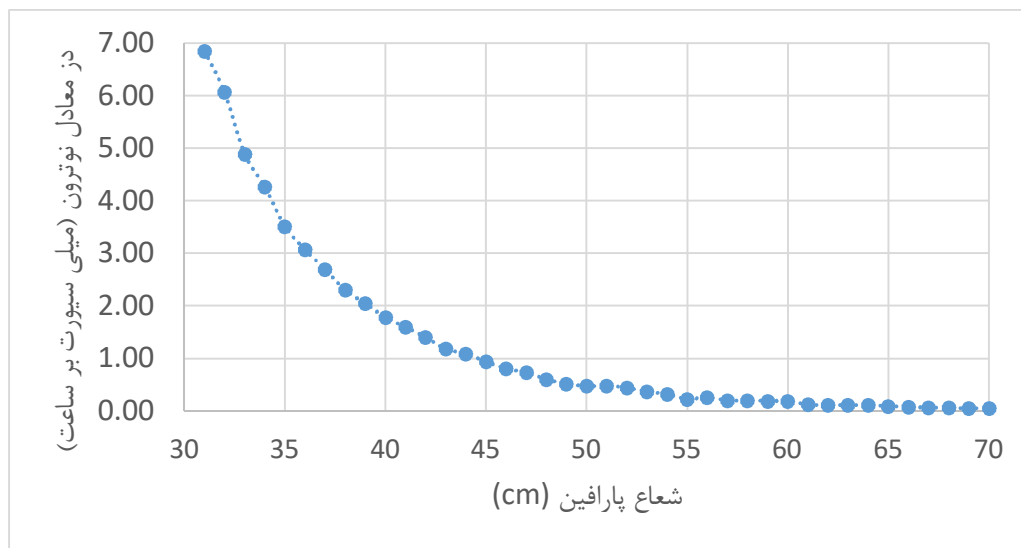


شکل ۴-۳۳ مقایسه اثر افزودن شعاع حفاظ بر شار گاما در حجم کره ICRU

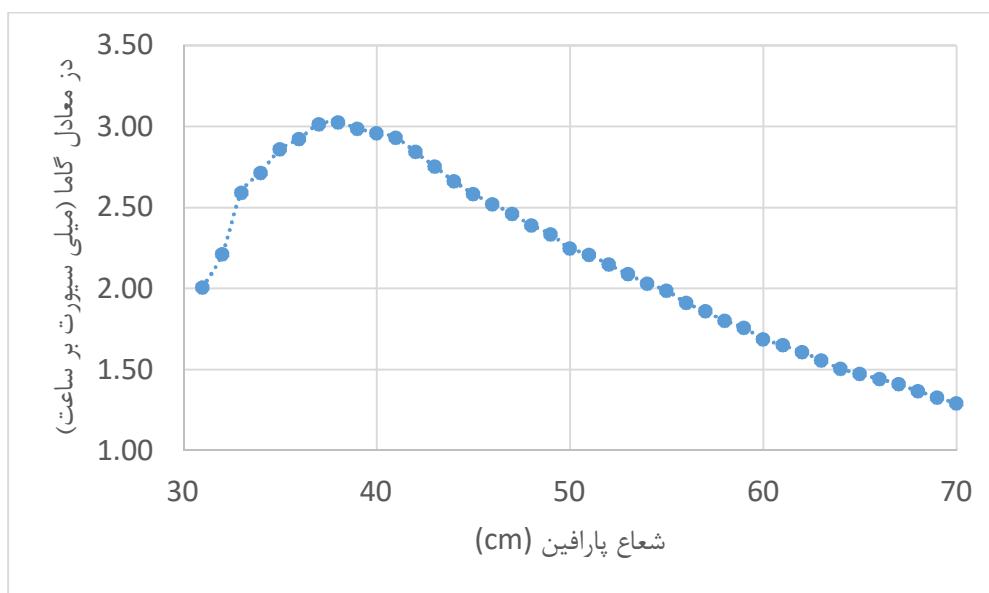
نتایج نشان می‌دهد افزودن ضخامت‌های بالاتر از حفاظ می‌تواند به راحتی دز گاما را به حداقل و میزان قابل قبولی برساند در حالی که برای نوترون باید ضخامت ۱۳ سانتی‌متر از کنتریوم مورد استفاده قرار بگیرد که وزن بسیار بالایی خواهد داشت. با توجه به دز بالای نوترون محاسبه شده در سه بخش اخیر پیشنهاد استفاده مجدد از پارافین در پیکربندی چشمه به منظور حفاظت در برابر نوترون مطرح شده و به ارزیابی این حالت در ادامه پرداخته می‌شود.

۴-۷-۲ بررسی افزودن پارافین جهت حفاظت در برابر نوترون

جهت کاهش شار و دز نوترون به بررسی اثر افزودن پارافین پس از بازتابنده و تکثیرکننده بریلیوم به عنوان حفاظ پرداخته شد. دلیل استفاده از پارافین به جای یک ماده جاذب نوترون این است که ضمن کاهش دز نوترون در کره ICRU می‌تواند به افزایش شار نوترون های حرارتی در داخل پیکربندی نیز منجر شود. نتایج محاسبات دز برای نوترون و گاما بر حسب میلی سیورت بر ساعت برای چشمه یک کوری در نمودارهای ۴-۳۹ و ۴-۴۰ آورده شده است:



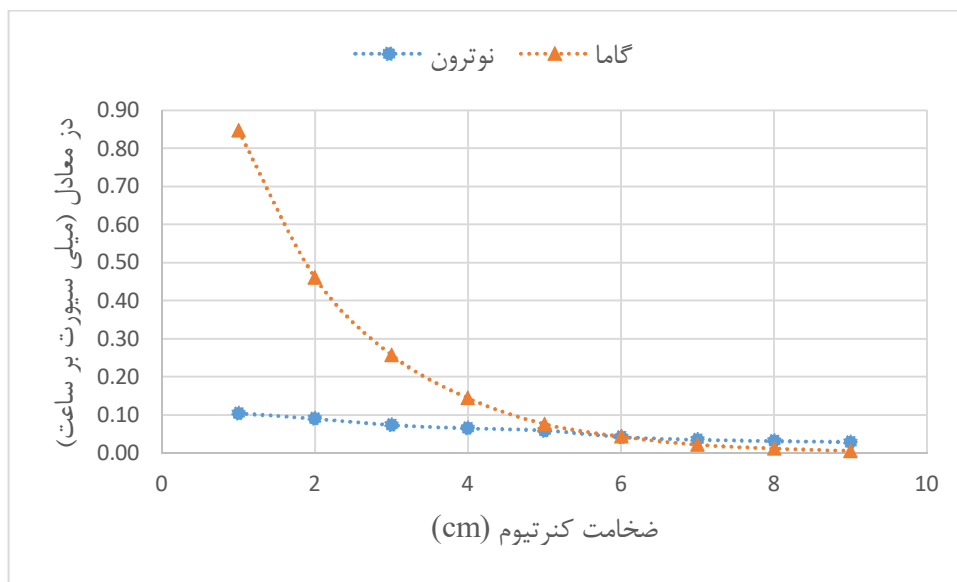
شکل ۳۴-۴ تغییرات دز معادل برای نوترون در اثر افزودن ضخامت پارافین، در داخل حجم کره ICRU برای چشمه یک کوری Am-Be



شکل ۳۵-۴ تغییرات دز معادل برای گاما در اثر افزودن ضخامت پارافین، در داخل حجم کره ICRU برای چشمه یک کوری Am-Be

مشاهده می شود که افزودن پارافین اثر کاهشی روی دز نوترون دارد اما در اثر جذب نوترون در پارافین گاما تولید می شود که منجر به زیاد شدن دز گاما در ابتدا می شود که اگر ضخامت بیشتر شود این گاماها تولید شده در ضخامت های پایین تر در شعاع های بالا جذب پارافین می گردند و کاهش دز گاما را نیز شاهد خواهیم بود. از نمودار های فوق افزودن ضخامت ۳۱ سانتی متر (شعاع ۶۱ سانتی متر) پارافین می تواند برای

حفاظت در برابر نوترون مناسب باشد. مقادیر دز نوترون ۰,۱۲ و دز گاما ۱,۶۵ میلی سیورت بر ساعت می‌باشد که با توجه به بالاتر بودن دز گاما از نوترون ملزم به استفاده از حفاظی دارای چگالی زیاد (جاذب بهتر برای گاما)، جهت کاهش دز گاما می‌باشیم. در نتایج قبلی ماده کنتیوم به عنوان حفاظ بهتر انتخاب شد، در نتیجه به بررسی اثر افزودن لایه کنتیوم به این پیکربندی پرداخته شد. نمودار زیر اثر افزودن آلیاژ کنتیوم بر دز معادل گاما و نوترون بر حسب میلی سیورت را برای یک چشمه یک کوری Am-Be در کره ICRU به فاصله ۱۳۰ سانتی‌متری از چشمه را نشان می‌دهد.

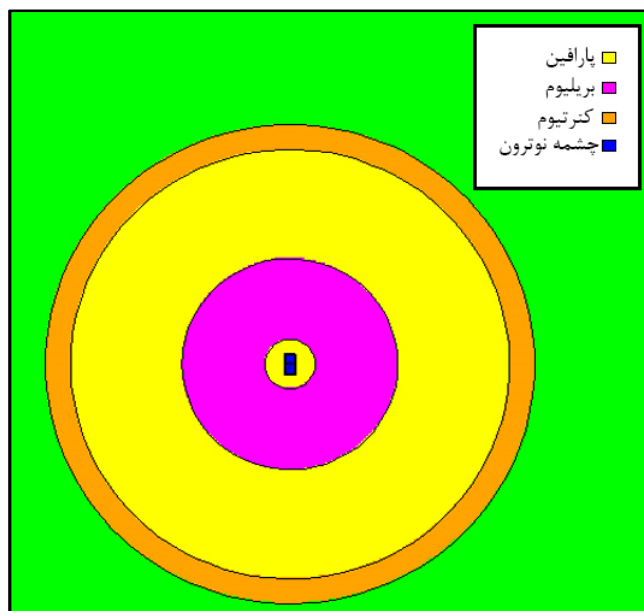


شکل ۴-۳۶ تغییرات دز معادل برای گاما و نوترون در اثر افزودن ضخامت کنتیوم، در داخل حجم کره ICRU برای چشمه یک کوری Am-Be

افزودن ضخامت ۷ سانتی‌متر کنتیوم منجر به رسیدن دز نوترون به ۰,۰۳ میلی سیورت بر ساعت و دز گاما به ۰,۰۲ میلی سیورت بر ساعت می‌شود. مجموع دز دریافتی ۰,۰۵ میلی سیورت بر ساعت می‌باشد که با توجه به حداکثر میزان دز دریافتی برای افراد کار که مقدار ۵۰ میلی سیورت برای یک سال می‌باشد، مقدار قابل قبولی می‌باشد و اجازه کار با چشمه را تا ۱۰۰۰ ساعت در سال به یک پرتوکار می‌دهد.

۴-۸ هندسه نهایی پیشنهادی

در جمع بندی نهایی کره پارافین تا شعاع ۷ سانتی متر، بازتابنده و تکثیرکننده برلیوم به ضخامت ۲۳ سانتی متر، مجددا پارافین به ضخامت ۳۱ سانتی متر و در نهایت آلیاژ کنرتیوم به ضخامت ۷ سانتی متر به عنوان پیکربندی نهایی برای هدف این تحقیق که افزایش شار نوترون حرارتی است، پیشنهاد می شود. همچنین در نتایج مشاهده شد شار حرارتی در فاصله ۴ الی ۷ سانتی متر از چشمه بیشترین مقدار را دارد که به عنوان انتهای سایت پرتودهی و محل قرار دادن نمونه ای که قرار است با حداکثر شار نوترون حرارتی بمباران شود، پیشنهاد می شود.



شکل ۴-۳۷ تصویر هندسه نهایی پیشنهادی در کد MCNP (ضخامت ها در توضیحات فوق آورده شده است)

پیشنهادهای برای پژوهش های آتی:

- (۱) انجام شبیه سازی های فوق با چشمه های نوترون دیگر و مقایسه شار نوترون و گاما و سایر ویژگی ها
- (۲) بررسی امکان استفاده از تعداد بیشتری چشمه به منظور ایجاد مرکز پرتودهی با شار بالای نوترون
- (۳) ساخت ترکیبات جدید از پارافین و پلی اتیلن جهت کندکننده نوترون
- (۴) بررسی و امکان سنجی کاربرد چشمه برای کاربردهای ذکر شده در فصل اول این پژوهش

- [١] K.-H. Beckurts and K. Wirtz ,Neutron Physics. Springer Science & Business Media ، ٢٠١٣.
- [2] H. P. gen Schieck ,Nuclear Reactions: An Introduction. Springer٢٠١٤ ،.
- [3] P. Reuss ,Neutron Physics. EDP Sciences٢٠٠٨ ،.
- [4] W. E. Meyerhof ,Elements of Nuclear Physics. McGraw Hill Book Company١٩٨٩ ،.
- [5] K. K. S ,Introductory Nuclear Physics. Wiley India٢٠٠٨ ،.
- [6] A. Kamal ,Nuclear Physics. Springer٢٠١٤ ،.
- [7] Z. B. Alfassi ,Chemical Analysis by Nuclear Methods. Wiley١٩٩٤ ،.
- [8] R.J. Holmes ، ،Gamma-Ray and Neutron Sources ،Chap. ٣. International Atomic Energy Agency.
- [٩] J. Zhang and X. Tuo ،“PGNAA neutron source moderation setup optimization” ، ArXiv١٣٠٩١٣٠٨ Phys. ،Sep. ٢٠١٣.
- [١٠] Y. Zongyuan ،L. Jingwen ،Y. Gang and S. Detang ،“High energy γ -radioactive source—A new application of Am-Be neutron source” ،Chin. Phys. Lett. ،vol. ٣ ،no. ٧ ،p. ٣٠١١٩٨٦ ،
- [١١] Eckert and Ziegler ،Sealed Radiation Sources Product Information. Nuclitec GmbH ، ٢٠٠٩.
- [١٢] N. R. Council ،D. on E. and L. Studies ،N. and R. S. Board and C. on R. S. U. and Replacement ،Radiation Source Use and Replacement: Abbreviated Version. National Academies Press٢٠٠٨ ،.
- [١٣] Neutron Generators for Analytical Purposes. Vienna: International Atomic Energy Agency٢٠١٢ ،.
- [١٤] P. B.B.Srivastava ،Nuclear Physics. Rastogi Publications٢٠١١ ،.
- [١٥] D. P. Riley ،E. H. Kisi ،T. C. Hansen and A. W. Hewat ،“Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Ti_3SiC_2 : I, Ultra-High-Speed Neutron Diffraction Study of the Reaction Mechanism” ،J. Am. Ceram. Soc. ،vol. ٨٥ ،no. ١٠ ،pp. ٢٤١٧–٢٤٢٤ ،Oct. 2002.
- [١٦] F. Shu ،V. Ramakrishnan and B. P. Schoenborn ،“Enhanced visibility of hydrogen atoms by neutron crystallography on fully deuterated myoglobin” ،Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. ،vol. ٩٧ ،no. ٨ ،pp. ٣٨٧٢–٣٨٧٧ ،Apr. ٢٠٠٠.
- [١٧] A. E.-G. E. Abd and J. J. Milczarek ،“Neutron radiography study of water absorption in porous building materials: anomalous diffusion analysis” ،J. Phys. Appl. Phys. ،vol. ٣٧ ،no. ١٦ ،p. ٢٣٠٥٢٠٠٤ ،.
- [١٨] IAEA F١-RC-٩٢٥-٢ ،Summary report on Development of improved sources and imaging systems for neutron radiography.
- [١٩] W. V. Nunes ،A. X. da Silva ،V. R. Crispim and R. Schirru ،“Explosives detection using prompt-gamma neutron activation and neural networks” ،Appl. Radiat. Isot. ،vol. ٥٦ ،no. ٦ ،pp. ٩٣٧–٩٤٣ ،Jun. ٢٠٠٢.
- [٢٠] G. F. Knoll ،Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons٢٠١٠ ،.
- [٢١] S. B. Dowd and E. R. Tilson ،Practical Radiation Protection and Applied Radiobiology. W.B. Saunders١٩٩٩ ،.

- [۲۲] M. H. Kharita ,S. Yousef and M. AlNassar ,“Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete” ,Prog. Nucl. Energy ,vol. ۵۳ ,no. ۲ ,pp. ۲۰۷-۲۱۱ ,Mar. ۲۰۱۱
- [۲۳] A. B. Chilton ,J. K. Shultis and R. E. Faw ,Principles of radiation shielding. Prentice Hall PTR ۱۹۸۴ ،
- [۲۴] E. J. Hall and A. J. Giaccia ,Radiobiology for the Radiologist. Lippincott Williams & Wilkins ۲۰۰۶ ،
- [۲۵] K. D. Kok ,Nuclear Engineering Handbook. CRC Press ۲۰۰۹ ،
- [۲۶] J. E. Turner ,Atoms, Radiation, and Radiation Protection. John Wiley & Sons ۲۰۰۸ ،
- [۲۷] J. R. Lamarsh and A. J. Baratta ,Introduction to Nuclear Engineering. Pearson Education, Limited ۲۰۱۷ ،
- [۲۸] W. M. Stacey ,Nuclear Reactor Physics. John Wiley & Sons ۲۰۰۷ ،
- [۲۹] J. M. Beeston ,“Beryllium metal as a neutron moderator and reflector material” ,Nucl. Eng. Des. ,vol. ۱۴ ,no. ۳ ,pp. ۴۴۵-۴۷۴ ,Feb. ۱۹۷۱
- [۳۰] D. J. Bennet and J. R. Thomson ,The elements of nuclear power. Longman
- [۳۱] A. A. Naqvi ,M. S. Abdelmonem ,G. Al-Misned and H. Al-Ghamdi ,“New source-moderator geometry to improve performance of 252Cf and 241Am-Be source-based PGNAAs setups” ,Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip. ,vol. ۵۶۲ ,no. ۱ ,pp. ۳۵۸-۳۶۴ ,Jun. ۲۰۰۶.
- [۳۲] س. پ. شیرمردی، ع. طاهری و ج. امیری، کاربرد کد شبیه سازی MCNP در محاسبات هسته ای. کرج: سنوبرک، ۱۳۸۹.
- [۳۳] R. Bedogni ,C. Domingo ,N. Roberts ,D. J. Thomas ,M. Chiti ,A. Esposito ,M. J. Garcia ,A. Gentile ,Z. Z. Liu and M. de-San-Pedro ,“Investigation of the neutron spectrum of americium-beryllium sources by Bonner sphere spectrometry” ,Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip. ,vol. ۷۶۳ ,pp. ۵۴۷-۵۵۲ ,Nov. ۲۰۱۴.
- [۳۴] ISO ۸۵۲۹:۱۹۸۹ ,Neutron reference radiations for calibrating neutron-measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy. International Organization for Standardization ۱۹۸۹ ،
- [۳۵] R. J. McConn Jr ,C. J. Gesh ,R. T. Pagh ,R. A. Rucker and R. G. Williams III ,“Compendium of material composition data for radiation transport modeling” ,PNNL-۱۵۸۷۰ Rev ,vol. ۱ ,no. ۴۲۰۱۱ ،
- [۳۶] م. وفاخش و ی. ریاضی، راهنمای استفاده از کد شبیه سازی MCNP۴C تهران: اندیشه سرا، ۱۳۸۹.
- [۳۷] A. L. Schwarz and R. A. Schwarz ,MCNP/MCNPX Visual Editor Computer Code Manual. 2008.
- [۳۸] C. R. Russell ,Reactor Safeguards. Elsevier ۲۰۱۳ ،
- [۳۹] V. S. jr and W. M. Murphey ,“Calculation of Thermal Neutron Absorption in Cylindrical and Spherical Neutron Sources” ,Metrologia ,vol. ۷ ,no. ۱ ,p. ۳۴۱۹۷۱ ،
- [۴۰] B. Aygün and G. Budak ,“A new neutron absorber material: Oil loaded paraffin wax” ,Nucl. Sci. Technol. ,pp. ۳۳-۳۹۲۰۱۲ ،
- [۴۱] D. Harder and K.-P. Hermann ,“Tissue-Equivalent Materials and the ICRU Sphere” ,Radiat. Prot. Dosimetry ,vol. ۱۲ ,no. ۲ ,pp. ۱۲۵-۱۲۸ ,Aug. ۱۹۸۵.

Abstract

The neutron is an unstable particle with a short half-life of about eleven minutes and should be artificially produced for use in industry, medicine, and research. Nuclear reactors are known as the most important neutron source, but their huge dimensions and the high technology involved, the safety and security concerns, and the costly maintenance and repair, have made it impossible to use in many ways. (α ,n) sources are an appropriate alternative to fission nuclear reactors. In this study, the most commonly used neutron source, Am-Be, has been used. The neutrons produced from this source have different energies in the 0-11 MeV range. In order to slow down non-thermal neutrons and increase the flux of thermal neutrons, a moderator is used around the source.

In this study, Am-Be neutron source in different moderators was simulated by use of MCNP Monte Carlo code and the best moderator and its optimized thickness for using thermal neutrons has been proposed. Then the effect of adding a reflector and neutron multiplier material to the source has been investigated. finally, appropriate shielding for the final configuration was studied in order to minimize biological damage when working with the neutron source.

The performed simulations indicated that using a spherical moderator instead of common cylindrical moderators can lead to an increase in thermal neutron flux. Among the different moderators, paraffin produced the highest flux of thermal neutrons. Moreover, beryllium was established as the best neutron reflector and multiplier to increase the thermal flux of an Am- Be neutrons source. After all, the most suitable shield to have the minimum equivalent dose in an ICRU sphere was proposed.

The final proposed configuration includes a paraffin sphere of radius 7 cm, beryllium with the thickness of 23 cm and again paraffin with a thickness of 31 cm and Kennetium alloy with a thickness of 7 cm. The thermal neutron flux in a distance between 4 to 7 cm is maximum.

Key Words: Thermal neutron, Neutron source, Moderator, Shielding, Am-Be



Shahrood University of Technology

Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in Nuclear Physics

**Design of an appropriate shielding and moderator for an Am-Be
neutron source in order to increase thermal neutron flux using
Monte Carlo method**

By: Hamid Basiri

**Supervisor:
Dr Hossein Tavakoli-Anbaran**

September 2017