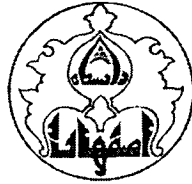


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۳۱۳ هـ - ۱۲۹۷



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش هسته‌ای
شبه‌سازی موازی ساز نوترونی برای رادیوگرافی با استفاده از چشمه و
تولیدکننده‌ی نوترونی

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا عبدی

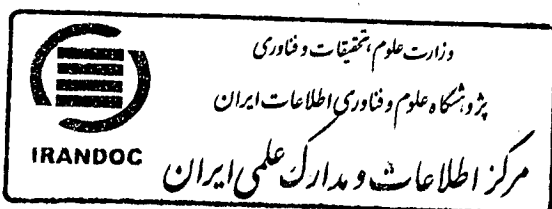
استاد مشاور:

مهندس نوید ابوبیان

پژوهشگر:

بیمان شایان

اسفند ماه ۱۳۸۹



۱۵۸۵۲۱

۱۳۹۰/۳/۱۶

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

شيوه نگارش پايان نامه
رعایت شده است.
تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش هسته‌ای آقای
پیمان شایان تحت عنوان

شبیه‌سازی موازی ساز نوترونی برای رادیوگرافی با استفاده از چشمه و
تولیدکننده‌ی نوترونی

در تاریخ ۸۹/۱۲/۰۷ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

امضا

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمدرضا عبدی با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضا
ابوبکر

۲- استاد مشاور پایان نامه مهندس نوید ایوبیان با مرتبه‌ی علمی مربی

امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر سید مجتبی مستجاب الدعواتی با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر بهزاد تیموری با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضای مدیر گروه

باساس از زحمات پدر و مادر عزیزم

و با تشکر از زحمات و راهنمایی‌های اساتید ارجمندم آقای دکتر عبدی و آقای مهندس ایوبیان

چکیده:

تنها چند سال پس از کشف نوترون، آزمایش‌های موفق در رابطه با رادیوگرافی نوترونی در سال ۱۹۳۵ توسط دو محقق به نام‌های کالمن و کوهن، با استفاده از یک مولد نوترونی کوچک انجام شدند. این رشته طی ۷۰ سال تغییر و تکامل یافته به طوری که تصویربرداری نوترونی در محدوده‌ی وسیعی از کاربردها هم‌اکنون به صورت متداول استفاده می‌شود. تصویربرداری نوترونی برای تولید مستقیم تصاویر به وسیله‌ی عبور یک پرتونوترونی از میان یک شیء به درون یک آشکارساز استفاده می‌شود. دقیقاً همان‌گونه که اشعه‌ی ایکس تصاویر استخوان‌های شکسته را می‌گیرد. واضح است که، تکنیک تصویربرداری نوترونی نسبت به تصویربرداری اشعه‌ی ایکس، کم‌تر شناخته شده است. بیشتر مردم کاربردهای پزشکی ساده از رادیوگرافی اشعه‌ی ایکس و توموگرافی را می‌شناسند، که این به علت این حقیقت است که تولید چشمه‌های با شدت بالای اشعه‌ی ایکس نسبت به نوترون‌ها، ساده‌تر و ارزان‌قیمت‌تر است. با استفاده از این روش می‌توان ساختار اصلی اشیاء که ممکن است حتی ناپیدا باشند، زیر خاک باشند یا در یک محفظه‌ی غیر قابل نفوذ قرار گرفته باشند را معین کرد. یک سیستم رادیوگرافی نوترونی اساساً شامل یک پرتو نوترونی موازی و یک سیستم آشکارسازی می‌شود. نمونه‌ی مورد تحقیق در جلوی پرتو قرار داده می‌شود و آشکارساز، نوترون‌های عبوری را اندازه‌گیری می‌کند. هدف این تحقیق به‌دست آوردن پارامترهای بهینه برای طراحی سیستم موازی‌ساز نوترونی است. با استفاده از محاسبات مونت‌کارلو برای بهینه‌سازی پارامترها از آزمایش‌های پرهزینه و پردازش‌های اشتباه در طراحی موازی‌ساز اجتناب می‌کنیم و اطلاعات مفیدی در این زمینه به‌دست می‌آوریم. با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بررسی هر جزئی از یک بخش از کل سیستم ممکن می‌شود.

کلید واژه‌ها: رادیوگرافی نوترونی، موازی‌ساز، نوترون‌های گرمایی، کد MCNP، کندسازی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
فصل اول فیزیک نوترون	
۱	۱-۱ مقدمه
۱	۲-۱ چشمه‌های نوترونی
۲	۱-۲-۱ رادیوایزوتوپ‌ها
۳	۲-۲-۱ راکتورهای هسته‌ای
۴	۳-۲-۱ شتاب‌دهنده‌ها
۵	۳-۱ کالیفرنیوم
۶	۱-۳-۱ تولید کالیفرنیوم
۶	۲-۳-۱ کاربرد کالیفرنیوم
۷	۳-۳-۱ وجود کالیفرنیوم در محیط زیست
۷	۴-۳-۱ واکنش کالیفرنیوم در بدن
۷	۵-۳-۱ اثر کالیفرنیوم بر روی سلامتی
۸	۶-۳-۱ خطرات کالیفرنیوم
۹	۴-۱ برهم‌کنش نوترون‌ها
۱۰	۵-۱ انرژی، سرعت و طول موج نوترون‌ها
۱۱	۶-۱ سطح مقطع
فصل دوم بررسی رادیوگرافی نوترونی	
۱۶	۱-۲ تاریخچه‌ی رادیوگرافی نوترونی
۱۷	۲-۲ رادیوگرافی نوترونی
۱۹	۳-۲ فعالسازی توسط نوترون‌ها
۱۹	۴-۲ فرآیندهای لازم برای رادیوگرافی نوترونی
۱۹	۱-۴-۲ کندسازی

۱۹	..... ۲-۴-۲ موازی سازی
۲۰	..... ۵-۲ آشکارسازهای رادیوگرافی نوترونی
۲۲	..... ۶-۲ نوترون مورد استفاده در رادیوگرافی
۲۲	..... ۱-۶-۲ رادیوگرافی با نوترون های سرد
۲۲	..... ۲-۶-۲ رادیوگرافی با نوترون های گرمایی
۲۳	..... ۷-۲ طول موج انتخابی برای رادیوگرافی نوترونی
۲۳	..... ۸-۲ مقایسه ی رادیوگرافی با نوترون و اشعه ی ایکس
۲۵	..... ۹-۲ سطح اشعه ی گاما
۲۶	..... ۱۰-۲ کاربردهای رادیوگرافی نوترونی
۲۸	..... ۱۱-۲ سیستم تصویربرداری در رادیوگرافی نوترونی
۲۸	..... ۱-۱۱-۲ دوربین
۲۹	..... ۱۲-۲ بازده آشکارسازی
۳۱	..... ۱۳-۲ قدرت تفکیک فضایی
۳۴	..... ۱۴-۲ قدرت تفکیک زمانی
۳۷	..... ۱۵-۲ توصیف اجزا
۳۷	..... ۱-۱۵-۲ پرده ی سوسوزنی
۳۷	..... ۲-۱۵-۲ آینه
۳۷	..... ۳-۱۵-۲ شاتر
۳۸	..... ۴-۱۵-۲ لنز
۳۸	..... ۱۶-۲ اندازه گیری انتقال نور از پودر ZnS
۳۹	..... ۱۷-۲ کندساز
۴۰	..... ۱۸-۲ دقت و صحت نتایج

فصل سوم مبانی کد MCNP

۴۳	..... ۱-۳ چکیده
۴۴	..... ۲-۳ کد MCNP و روش مونت کارلو
۴۴	..... ۱-۲-۳ روش مونت کارلو در مقابل روش غیر احتمالی
۴۵	..... ۲-۲-۳ روش مونت کارلو
۴۷	..... ۳-۳ مقدمه‌ای بر خصوصیات کد MCNP
۴۷	..... ۱-۳-۳ اطلاعات هسته‌ای و برهم‌کنش‌ها
۴۸	..... ۲-۳-۳ مشخصات چشمه
۴۸	..... ۳-۳-۳ تالی‌ها و خروجی

فصل چهارم بحث و نتیجه‌گیری

۵۰	..... ۱-۴ سیستم موازی‌ساز نوترونی
۵۲	..... ۲-۴ شار نوترونی
۵۲	..... ۳-۴ هندسه‌ی موازی‌ساز
۵۳	..... ۴-۴ نسبت موازی‌سازی $\frac{L}{D}$
۵۴	..... ۵-۴ طراحی موازی‌ساز
۵۵	..... ۱-۵-۴ اجزای اصلی موازی‌ساز نوترونی
۵۶	..... ۱-۱-۵-۴ دیواره‌ها
۵۶	..... ۲-۱-۵-۴ دیافراگم‌ها
۵۷	..... ۳-۱-۵-۴ فیلترهای گاما و نوترون
۵۷	..... ۴-۱-۵-۴ حفاظ گاما
۵۷	..... ۵-۱-۵-۴ قسمت کندسازی
۵۸	..... ۶-۱-۵-۴ پرکننده
۵۸	..... ۷-۱-۵-۴ فیلتر گاما

۶۲	..... ۴-۵-۲ مواد به کار رفته در موازی‌ساز
۶۳	..... ۴-۵-۲-۱ آلومینیوم
۶۳	..... ۴-۵-۲-۲ بورال
۶۳	..... ۴-۵-۲-۳ سرب و بیسموت
۶۳	..... ۴-۵-۲-۴ بورپلی اتیلن و نیتريدبور
۶۳	..... ۴-۵-۲-۵ RX-277
۶۴	..... ۴-۶-۱ اجزای موازی‌ساز اولیه
۶۴	..... ۴-۶-۱-۱ دیافراگم اولیه
۷۲	..... ۴-۶-۲ قطعه‌ی کندسازی
۸۱	..... ۴-۶-۳ دیافراگم ورودی
۸۲	..... ۴-۷-۱ طراحی نهایی موازی‌ساز نوترونی
۸۲	..... ۴-۸-۱ اجزای موازی‌ساز اولیه
۸۳	..... ۴-۸-۱-۱ ابعاد و مکان قطعه‌های قرارگرفته در موازی‌ساز اولیه عبارتند از
۸۳	..... ۴-۸-۱-۱-۱ ورودی نصب
۸۳	..... ۴-۸-۱-۲ دیافراگم ورودی
۸۳	..... ۴-۸-۱-۳ قطعه‌ی کندساز
۸۴	..... ۴-۸-۱-۴ فیلتر گاما
۸۴	..... ۴-۸-۱-۵ دیافراگم اولیه
۸۴	..... ۴-۸-۱-۶ حفاظ گاما
۸۴	..... ۴-۸-۱-۷ تثبیت کننده
۸۵	..... ۴-۸-۲ تغییر در اندازه‌ی روزنه‌ی دیافراگم اولیه
86	..... ۴-۸-۳ محاسبه‌ی شار نوترون‌ها بر روی بدنه‌ی خارجی موازی‌ساز اولیه
۸۷	..... ۴-۸-۴ محاسبه‌ی شار فوتون‌ها بر روی بدنه‌ی خارجی موازی‌ساز اولیه
۹۰	..... ۴-۸-۵ محاسبه‌ی شارالکترون‌ها بر روی بدنه‌ی خارجی موازی‌ساز اولیه

۹-۴	موازی‌ساز ثانویه	۹۲
۱-۹-۴	تثبیت کننده‌ها	۹۲
۲-۹-۴	حفاظ گاما	۹۳
۳-۹-۴	دیافراگم ثانویه	۹۳
۴-۹-۴	اتصالات سریع	۹۳
۵-۹-۴	پنجره‌ی درزگیری	۹۳
۱۰-۴	موازی‌ساز میانی و حلقه‌های بور پلی اتیلنی	۹۳
۱۱-۴	محاسبه‌ی شار نوترون‌ها بر روی بدنه‌ی موازی‌ساز ثانویه	۹۴
۱۲-۴	محاسبه‌ی شار نوترون‌ها بر روی حلقه‌ی بور پلی اتیلنی	۹۶
۱۳-۴	محاسبه‌ی شار فوتون‌ها بر روی بدنه‌ی خارجی موازی‌ساز ثانویه	۹۸
۱۴-۴	محاسبه‌ی شار فوتون‌ها بر روی حلقه‌ی بور پلی اتیلنی	۱۰۰
۱۵-۴	بررسی درصد CV	۱۰۲
۱۶-۴	بررسی یکنواختی شار در صفحه‌ی تصویر	۱۰۳
۱۷-۴	شکل نهایی موازی‌ساز	۱۰۴
۱۸-۴	ابعاد هندسه و مواد مورد استفاده در موازی‌ساز	۱۰۵
۱۹-۴	نتایج کلی	۱۰۶
۱۰۷	منابع و مآخذ	۱۰۷

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۰	شکل ۱-۱: انواع برهم کنش‌های نوترونی
۱۲	شکل ۲-۱: نمایش سطح مقطع $\sigma(cm^2)$
۱۳	شکل ۳-۱: سطح مقطع نوترونی کل برخی عناصر فلزی
۱۵	شکل ۴-۱: ضریب تضعیف جرمی اشعه‌ی ایکس برای سرب
۱۸	شکل ۱-۲: رادیوگراف نوترونی از یک گل رز در یک محفظه‌ی سربی
۱۸	شکل ۲-۲: ساختار اصلی رادیوگرافی نوترونی
۲۴	شکل ۳-۲: ضرایب تضعیف اشعه‌ی ایکس در عناصر
۲۴	شکل ۴-۲: ضرایب تضعیف نوترون‌های گرمایی در عناصر
۲۵	شکل ۵-۲: (A) رادیوگراف نوترونی، (B) رادیوگراف اشعه‌ی ایکس
۲۷	شکل ۶-۲: سیستم رادیوگرافی نوترونی قابل مانور مورد استفاده توسط نیروی هوایی
۲۷	شکل ۷-۲: تصاویر رادیوگرافی نوترونی و اشعه‌ی ایکس از خنجر ۲۰۰۰ ساله در موزه ویندونیساسوئیس
۲۹	شکل ۸-۲: سیستم دوربین رادیوگرافی LENS
۳۰	شکل ۹-۲: سطح مقطع 6Li بر حسب طول موج نوترونی
۳۲	شکل ۱۰-۲: تصویری از سه میله USAF 1951 با دوربین CCD
۳۲	شکل ۱۱-۲: نمودارهای عنصر ۳ (خط آبی) و عنصر ۴ (خط قرمز) در گروه ۱
۳۳	شکل ۱۲-۲: تصویر با سطح نویز بالا. جسم به سختی تشخیص داده می‌شود
۳۴	شکل ۱۳-۲: سیستم دوربین رادیوگرافی LENS از زاویه‌ی دیگر
۳۵	شکل ۱۴-۲: زمان رسیدن نوترون بر حسب طول موج نوترون
۳۶	شکل ۱۵-۲: رسیدن نور بین زمان‌های t_2 و t_3 توسط دو چاپر
۳۸	شکل ۱۶-۲: انتقال نور از پودر ZnS
۳۹	شکل ۱۷-۲: رادیوگراف از کندساز متان سرد ($T=4K$). تصویر با نوترون‌های با طول موج $\lambda < 2.8A^\circ$ ساخته می‌شود
۳۹	شکل ۱۸-۲: رادیوگراف از کندساز متان سرد ($T=4K$). تصویر با نوترون‌های با طول موج $\lambda > 2.8A^\circ$ ساخته می‌شود

شکل ۲-۱۹: طرح کندساز روی پرده‌ی سوسوزنی	۴۰
شکل ۲-۲۰: نمایش نتایج دارای دقت و صحت	۴۱
شکل ۲-۲۱: نمایش نتایج فقط دارای دقت	۴۱
شکل ۲-۲۲: نمایش نتایج بدون دقت و صحت	۴۱
شکل ۲-۲۳: نمایشی از تغییرات انحراف معیار در پراکندگی یک روش	۴۲
شکل ۳-۱: تاریخچه‌ی تصادفی یک نوترون ورودی روی یک صفحه از ماده‌ی شکافت پذیر	۴۶
شکل ۴-۱: نمایه‌ای از بخشی از طراحی ساخت موازی‌ساز	۵۱
شکل ۴-۲: نمایه‌ای از بدنه‌ی یک موازی‌ساز ساخته شده	۵۱
شکل ۴-۳: غیرتیزی هندسی	۵۳
شکل ۴-۴: اجزای تشکیل‌دهنده‌ی موازی‌ساز اولیه و میانی	۵۵
شکل ۴-۵: اجزای سازنده‌ی موازی‌ساز ثانویه	۵۶
شکل ۴-۶: تغییرات شار نوترون‌های گرمایی در صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده از فیلتر گاما با ماده‌ی سرب یا بیسموت	۵۹
شکل ۴-۷: تغییرات شار نوترون‌های تند در صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده از فیلتر گاما با ماده‌ی سرب یا بیسموت	۶۰
شکل ۴-۸: تغییرات شار فوتون‌ها در صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده از فیلتر گاما با ماده‌ی سرب یا بیسموت	۶۲
شکل ۴-۹: تغییرات شار نوترون‌های گرمایی در صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده دیافراگم اولیه با ماده‌ی کادمیوم یا بورال	۶۵
شکل ۴-۱۰: هندسه‌ی صفحه‌ی تصویر- دیافراگم اولیه- پرتوی پراکنده که بیشینه‌ی شدت نوترونی را در صفحه‌ی تصویر فراهم خواهد ساخت	۶۵
شکل ۴-۱۱: قرارگیری مکان هندسه‌ی چشمه- موازی‌ساز- صفحه‌ی تصویر در محاسبه کد MCNP برای محل دیافراگم اولیه	۶۶
شکل ۴-۱۲: تغییرات شار میانگین نوترون گرمایی در صفحه‌ی تصویر بر حسب تابعی از مکان دیافراگم اولیه	۶۷

شکل ۴-۱۳: تغییرات شار میانگین نوترون تند در صفحه‌ی تصویر برحسب تابعی از مکان دیافراگم اولیه	۶۸
شکل ۴-۱۴: نسبت شار میانگین نوترون گرمایی به تند در صفحه‌ی تصویر برحسب تابعی از مکان دیافراگم اولیه	۶۹
شکل ۴-۱۵: تغییرات شار نوترونی شعاع‌های مختلف دیافراگم اولیه در صفحه‌ی تصویر	۷۱
شکل ۴-۱۶: تغییرات شار برحسب تغییر ضخامت بورال مورد استفاده در دیافراگم اولیه	۷۳
شکل ۴-۱۷: شار نوترون گرمایی به‌دست آمده در صفحه‌ی تصویر برای مواد مختلف	۷۴
شکل ۴-۱۸: شار نوترون تند به‌دست آمده در صفحه‌ی تصویر برای مواد مختلف	۷۵
شکل ۴-۱۹: نسبت شار نوترون گرمایی به نوترون تند برای مواد مختلف مورد استفاده به عنوان قطعه‌ی کندساز	۷۶
شکل ۴-۲۰: تغییرات شار نوترون‌های گرمایی به‌دست آمده در صفحه‌ی تصویر در حضور قطعه‌ی کندساز	۷۸
شکل ۴-۲۱: تغییرات شار نوترون‌های تند به‌دست آمده در صفحه‌ی تصویر در حضور قطعه‌ی کندساز	۷۹
شکل ۴-۲۲: مقایسه تغییرات شار نوترونی در صفحه‌ی تصویر در حضور قطعه‌ی کندساز و بدون حضور قطعه‌ی کندساز	۸۱
شکل ۴-۲۳: هندسه‌ی موازی‌ساز نوترونی به‌دست آمده توسط کد <i>MCNP</i> شامل موازی‌ساز اولیه- موازی‌ساز میانی - موازی‌ساز ثانویه	۸۲
شکل ۴-۲۴: هندسه‌ی موازی‌ساز اولیه به‌دست آمده توسط کد <i>MCNP</i>	۸۵
شکل ۴-۲۵: تغییرات شار نوترونی بر حسب انرژی بر روی جداره‌ی خارجی موازی‌ساز اولیه	۸۷
شکل ۴-۲۶: تغییرات شار فوتونی بر حسب انرژی بر روی جداره‌ی خارجی موازی‌ساز اولیه	۹۰
شکل ۴-۲۷: تغییرات شار الکترونی بر حسب انرژی بر روی جداره‌ی خارجی موازی‌ساز اولیه	۹۲
شکل ۴-۲۸: هندسه‌ی موازی‌ساز ثانویه به‌دست آمده توسط کد <i>MCNP</i>	۹۴
شکل ۴-۲۹: تغییرات شار نوترونی بر حسب انرژی بر روی جداره‌ی خارجی موازی‌ساز ثانویه	۹۶
شکل ۴-۳۰: تغییرات شار نوترونی بر حسب انرژی بر روی حلقه‌ی بور پلی اتیلنی	۹۸
شکل ۴-۳۱: تغییرات شار فوتونی بر حسب انرژی بر روی بدنه‌ی موازی‌ساز ثانویه	۱۰۰

- شکل ۴-۳۲: تغییرات شار فوتونی بر حسب انرژی بر روی حلقه‌ی بور پلی اتیلنی ۱۰۲
- شکل ۴-۳۳: نمایی ساده از تقسیم صفحه‌ی تصویر به مساحت‌های S_1 و S_2 ، S_3 ۱۰۴
- شکل ۴-۳۳: هندسه‌ی کل سیستم رادیوگرافی نوترونی به‌دست آمده توسط کد *MCNP* شامل چشمه - موازی‌ساز - صفحه‌ی تصویر ۱۰۵

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳	جدول ۱-۱: خواص چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترونی تجارتي مرسوم
۴	جدول ۱-۲: برخی راکتورهای با شار بالا و خواص آنها
۵	جدول ۱-۳: واکنش‌های تولید نوترون
۸	جدول ۱-۴: خواص ایزوتوپ‌های کالیفرنیوم
۱۳	جدول ۱-۵: سطح مقطع برهم‌کنش نوترون گرمایی و سطح مقطع‌های کل برای اشعه‌ی ایکس در طول‌موج تقریباً مشابه
۲۱	جدول ۲-۱: خواص مواد برای پرده‌های مبدل نوترونی
۲۱	جدول ۲-۲: مشخصه‌های پرده‌های مبدل
۲۲	جدول ۲-۳: ضرایب تضعیف خطی نوترون گرمایی برای اجزای یافت شده در خوردگی آلومینیوم
۵۸	جدول ۴-۱: داده‌های تغییرات شار نوترون گرمایی در صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده از فیلتر گاما با ماده‌ی سرب یا بیسموت
۶۰	جدول ۴-۲: داده‌های تغییرات شار نوترون‌های تند در صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده از فیلتر گاما با ماده‌ی سرب یا بیسموت
۶۱	جدول ۴-۳: داده‌های تغییرات شار فوتون‌های هادر صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده از فیلتر گاما با ماده‌ی سرب یا بیسموت
۶۴	جدول ۴-۴: داده‌های تغییرات شار نوترون‌های گرمایی در صفحه‌ی تصویر در نتیجه‌ی استفاده دیافراگم اولیه با ماده‌ی کادمیوم یا بورال
۶۷	جدول ۴-۵: داده‌های تغییرات شار میانگین نوترون گرمایی در صفحه‌ی تصویر برحسب تابعی از مکان دیافراگم اولیه
۶۸	جدول ۴-۶: داده‌های تغییرات شار میانگین نوترون تند در صفحه‌ی تصویر برحسب تابعی از مکان دیافراگم اولیه
۶۹	جدول ۴-۷: داده‌های نسبت شار میانگین نوترون گرمایی به تند در صفحه‌ی تصویر برحسب تابعی از مکان دیافراگم اولیه

- جدول ۴-۸: داده‌های تغییرات شار نوترونی شعاع‌های مختلف دیافراگم اولیه در صفحه‌ی تصویر ۷۰
- جدول ۴-۹: داده‌های تغییرات شار بر حسب تغییر ضخامت بورال مورد استفاده در دیافراگم اولیه ۷۲
- جدول ۴-۱۰: داده‌های شار نوترون گرمایی به دست آمده در صفحه‌ی تصویر برای مواد مختلف ۷۴
- جدول ۴-۱۱: داده‌های شار نوترون تند به دست آمده در صفحه‌ی تصویر برای مواد مختلف ۷۵
- جدول ۴-۱۲: داده‌های نسبت شار نوترون گرمایی به نوترون تند برای مواد مختلف مورد استفاده به عنوان
قطعه‌ی کندساز ۷۶
- جدول ۴-۱۳: داده‌های تغییرات شار نوترون‌های گرمایی به دست آمده در صفحه‌ی تصویر در حضور قطعه‌ی
کندساز ۷۷
- جدول ۴-۱۴: داده‌های تغییرات شار نوترون‌های تند به دست آمده در صفحه‌ی تصویر در حضور قطعه‌ی
کندساز ۷۸
- جدول ۴-۱۵: داده‌های تغییرات شار نوترونی در صفحه‌ی تصویر در حضور قطعه‌ی کندساز و بدون حضور
قطعه‌ی کندساز ۸۰
- جدول ۴-۱۶: داده‌های تغییرات شار نوترونی بر حسب انرژی بر روی جداری خارجی موازی‌ساز اولیه ۸۶
- جدول ۴-۱۷: داده‌های تغییرات شار فوتونی بر حسب انرژی بر روی جداری خارجی موازی‌ساز اولیه ۸۷
- جدول ۴-۱۸: داده‌های تغییرات شار الکترونی بر حسب انرژی بر روی جداری خارجی موازی‌ساز اولیه ۹۰
- جدول ۴-۱۹: داده‌های تغییرات شار فوتونی بر حسب انرژی بر روی جداری خارجی موازی‌ساز ثانویه ۹۴
- جدول ۴-۲۰: داده‌های تغییرات شار نوترونی بر حسب انرژی بر روی حلقه‌ی بور پلی اتیلنی ۹۶
- جدول ۴-۲۱: داده‌های تغییرات شار فوتونی بر حسب انرژی بر روی بدنه‌ی موازی‌ساز ثانویه ۹۸
- جدول ۴-۲۲: داده‌های تغییرات شار فوتونی بر حسب انرژی بر روی حلقه‌ی بور پلی اتیلنی ۱۰۰
- جدول ۴-۲۳: داده‌های مربوط به بررسی دقت شار خروجی ۱۰۳
- جدول ۴-۲۴: مقایسه‌ی شار در حالتی که $S_1 = S_2$ در نظر گرفته شود ۱۰۳
- جدول ۴-۲۵: مقایسه‌ی شار در حالتی دیگر با $S_1 = S_2$ ۱۰۴
- جدول ۴-۲۶: اندازه‌ی قطعه‌های به کار رفته در موازی‌ساز ۱۰۵

فصل اول

فیزیک نوترون

۱-۱ مقدمه :

نوترون یک ذره ی بنیادی، با جرم $938.565 \text{ MeV}/c^2$ (کمی بیشتر از جرم یک پروتون) و بدون بار الکتریکی خالص است. نوترون های آزاد با نیمه عمر $15.7 \pm 0.8 \text{ s}$ ناپایدار هستند. نوترون ها با انتشار یک الکترون، یک آنتی نوترینو و یک پروتون واپاشی می کنند [۱]. به دلیل نداشتن بار الکتریکی، آشکارسازی نوترون ها بر مبنای یونیزاسیون غیر مستقیم استوار است.

۱-۲ چشمه های نوترونی:

چشمه های نوترونی به سه نوع اصلی تقسیم می شوند: رادیوایزوتوپ ها، راکتورهای هسته ای و شتاب دهنده ها. تعدادی از هسته های سنگین با عدد اتمی بزرگ تر از اورانیوم مانند ^{252}Cf احتمال شکافت خود به خودی محسوسی دارند. نوترون های تند و اشعه های گاما در هر شکافت به سرعت منتشر می شوند. نیمه عمر ^{252}Cf در واپاشی آلفا، ۲/۶۵ سال و در واپاشی نوترون ۸۵/۵ سال است که برای استفاده به اندازه ی کافی طولانی است. یک

میکروگرم ^{252}Cf ، تعداد $2/3 \times 10^6 \text{ neutrons } S^{-1}$ با محدوده‌ی انرژی 0.5 MeV تا 1 MeV گسیل می‌کند [۲].

۱-۲-۱ رادیوایزوتوپ‌ها:

نوع دیگر از چشمه‌های نوترونی از واکنش (α, n) ، نوترون تولید می‌کنند. این نوع چشمه شامل مخلوطی از ایزوتوپ آلفا گسیل و یک ماده‌ی هدف مناسب است [۳]. معمولاً، بریلیوم به عنوان یک مبدل نوترونی برای به دست آوردن بیشینه شار نوترون استفاده می‌شود بدین صورت که در یک چشمه (α, n) همانند ^{241}Am ، $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ دستخوش واپاشی آلفا می‌شود. ذره آلفا می‌تواند توسط یک عنصر سبک مثل بریلیوم جذب شود که سپس با گسیل نوترون واپاشی می‌کند. این واکنش‌ها به صورت زیر می‌باشند:



واکنش (γ, n) هم چنین برای تولید نوترون‌ها که چشمه‌های فوتون نوترونی نامیده می‌شوند استفاده می‌شود. واکنش‌های (γ, n) نیز از قرار زیر هستند:



این نوع چشمه‌ها معمولاً دارای تعداد محصول‌های نوترونی پایین و پس زمینه‌ی اشعه‌ی گامای بالا هستند و نمی‌توان تابش آن‌ها را متوقف کرد. چون آن‌ها یک چشمه‌ی مداوم و پیوسته هستند حفاظت در برابر اشعه هم یک عامل نگران کننده است و باید دائماً بر مقدار دز وارد بر مهندسیین و تکنسین‌ها نظارت شود. بزرگ‌ترین مزیت این چشمه‌ها کارکرد ساده، کوچکی، قابل حمل بودن و نگهداری آسان آن‌ها است. برخی از خصوصیات چشمه‌های نوترونی رادیوایزوتوپی قابل دسترس در جدول ۱-۱ نشان داده شده‌اند. چون شار تابعی از نیمه عمر است، چشمه‌های با شدت بیشتر اغلب نیمه عمرهای کم‌تری دارند.

جدول ۱-۱: خواص چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترونی تجارتمی مرسوم [۴].

ایزوتوپ	نیمه عمر (yr)	فعالیت ویژه (Ci/g)	واکنش	محصول نوترونی ($n/s \cdot Cm^2$)	انرژی میانگین تقریبی (MeV)
^{242}Cm	۱۶۳	۹/۳	$^9Be(\alpha, n)^{12}C$	$2/5 \times 10^6$	۴
^{228}Th	۱/۹۱	۸۳۳	$^9Be(\alpha, n)^{12}C$	$2/0 \times 10^7$	۴
^{252}Cf	۲/۶۵	۵۵۰	شکافت خودبخود	$4/3 \times 10^9$	۲
^{244}Cm	۱۸/۱	۸۳	$^9Be(\alpha, n)^{12}C$	$2/5 \times 10^6$	۴
^{227}Ac	۲۱/۸	۷۴	$^9Be(\alpha, n)^{12}C$	$1/5 \times 10^7$	۴
^{238}Pu	۸۶/۴	۱۷/۹	$^9Be(\alpha, n)^{12}C$	$2/3 \times 10^6$	۴
^{241}Am	۴۵۸	۳/۳	$^9Be(\alpha, n)^{12}C$	$2/2 \times 10^6$	۴
^{226}Ra	۱۶۲۰	۱	$^9Be(\alpha, n)^{12}C$	$1/3 \times 10^7$	۴
^{114}Sb	۶۰	۴۹/۴	$^9Be(\gamma, n)^4He$	$1/3 \times 10^6$	۰/۰۲۴

۱-۲-۲ راکتورهای هسته‌ای:

راکتورهای هسته‌ای نقش مهمی به عنوان چشمه‌های نوترونی برای دهه‌ها بازی کرده‌اند. فایده آن‌ها، شار نوترونی بالایی است که تولید می‌کنند. برای مثال، راکتور تحقیقاتی $57 MeV$ از انستیتولانگوان شار $10^{15} \text{ neutrons cm}^{-2} \text{ S}^{-1}$ تولید می‌کند [۵]. که این میزان بالای نوترون این امکان را به وجود می‌آورد که نوترون‌ها به وسیله‌ی کندسازی آهسته شوند [۶]. در راکتورهای هسته‌ای، نوترون‌ها با فرآیند شکافت زیر تولید می‌شوند:



راکتورها نوعاً هزینه‌ی کم‌تری نسبت به شتاب دهنده‌ها برای تولید هر نوترون دارند. اشکال اصلی آن‌ها هزینه‌های بالای در ارتباط با ساختار آن‌ها، جواز و تجهیزات تنظیمی، پیچیدگی عملکرد و فقدان حمل و نقل است. شار چند راکتور در جدول زیر نشان داده شده است.