

به نام خداوند بخشنده مهربان

(الف)

۱۰۲۳۴۵



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه تحصیلی جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد فیزیک (گرایش هسته‌ای)

تعیین طول پخش و طول برون‌یابی نوترون در گرافیت
به روش تجربی پیل سیگما و شبیه سازی با کد MCNP

استاد راهنما:

دکتر عباس حسینی رنجبر

مؤسسه اطلاعات آرکایو ملی ایران
کتابخانه مرکزی

مؤلف:

مهدی حسینی نوه

۱۳۸۷ / ۳ / ۲۵

شهریور ۱۳۸۶

۱۵۳۳۴۰

بار



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

بخش فیزیک

دانشکده علوم

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: مهدی حسینی نوه اکبرآبادی

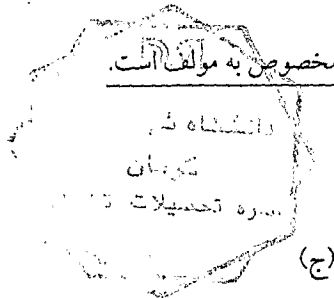
استاد راهنما: دکتر عباس حسینی رنجبر

داور ۱: دکتر فریدون عباسی

داور ۲: دکتر محمد مهدی یزدانی

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر محمد حسین زندی

حقی چاپ محفوظ و مخصوص به مولف است.



(ج)

تقدیر و تشکر

خداوند سبحان را سپاسگزارم که توفیق تحصیل علم دانش را به من عطا فرمود. چه بسا اگر یاری او از طریق عزیزانی که وسیله قرارشان داد تا بتوانم این پایان‌نامه را به اتمام برسانم، نبود، هرگز این امر بر من میسر نمی‌شد. بر خود می‌دانم از تمام کسانی که مرا در این مرحله یاری و همراهی کرده‌اند قدردانی کنم.

استوارترین سپاس را از استاد گرانقدرم آقای دکتر حسینی دارم که هفت سال علم‌آموزی از محضر ایشان برای من افتخار بزرگی است، و اندرزهای عالمانه و دلسوزی پدرانۀ ایشان است که من را شیفته خود کرده و راه زندگی را برایم روشنتر.

گرچه زبانم قاصر است، تشکری بی‌مانند از پدر و مادر عزیزم دارم که برشکرگزاری وجودشان ناتوانم.

نهایتاً ولی اولاتر، از همسر مهربانم تقدیر می‌کنم که انجام این پروژه را مرهون آرامش حضور ایشان و گذشته‌های فراوانش هستم.

همچنین از دیگر عزیزانی که مرا در انجام امور مربوط به پایان‌نامه یاری کرده‌اند، تشکر می‌کنم. خصوصاً از دوستانم و همچنین آقایان کوهستانی، باقری و صادقی که تحمل سختی‌های فراوان آنها، موجب شرمندگی اینجانب است.

تقديم به:

پدر و مادر عزیزم

چکیده:

در بعضی از راکتورهای قدرت هسته‌ای، از گرافیت برای کندکنندگی نوترونهای تند حاصل از شکافت استفاده می‌شود. از سوی دیگر در محاسبات مربوط به راکتورها، شار نوترون در محیط راکتور نقشی کلیدی را بازی می‌کند. معادله پخش یکی از راههای محاسبه شار نوترون در مسائل با هندسه نه چندان پیچیده است. از جمله پارامترهای مهم در معادله پخش، طول پخش و طول برونابی نوترون، در محیط مورد مطالعه هستند. پس اندازه‌گیری این دو کمیت در گرافیت، که در راکتورها وجود دارد مهم جلوه می‌کند.

در این پایان‌نامه طول پخش و طول برونابی نوترونهای حرارتی در گرافیت به شیوه آزمایش پیل سیگما اندازه‌گیری شد. در انجام این کار، بلوک گرافیت مورد استفاده دارای ابعاد $97\text{cm} \times 107\text{cm} \times 160\text{cm}$ بود که حفره‌هایی در ردیف‌های افقی و عمودی متفاوت در آن ایجاد شده بود. در شرایطی که یک چشمه نوترون $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ با اکتیویته $5/2\text{Ci}$ در مرکز قاعده پایین بلوک گرافیت قرار داشت، برای آشکارسازی نوترون‌های کند در این حفره‌ها از آشکارساز BF_3 استفاده شد.

از این آزمایش مقادیر $4246 \pm 0/56$ و $127 \pm 0/497$ به ترتیب برای طول پخش و طول برونابی نوترونهای کند در گرافیت بدست آمد. این مقادیر در توافق بسیار خوبی با داده‌های گزارش شده قبلی توسط دیگران هستند.

ما همچنین مسئله را با کد MCNP شبیه‌سازی کردیم. مقادیر $69/571\text{cm}$ و $1/292\text{cm}$ به ترتیب برای طول پخش و طول برونابی از شبیه‌سازی حاصل شد. این نتایج تقریباً در توافق با داده‌های تجربی هستند، و روش آزمایش را تأیید می‌کنند.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱: مقدمه	۱
فصل ۲: معادله ترابرد و پخش نوترون	۶
۱-۲- مفاهیم و تعریف‌ها	۷
۱-۱-۲- نوترون به عنوان ذره نقطه‌ای	۷
۲-۱-۲- تعریف چگالی و شار نوترون و چگالی جریان	۸
۳-۱-۲- سطح مقطع نوترون	۹
۲-۲- معادله ترابرد	۱۱
۱-۲-۲- تقریب چند گروهی	۱۵
۲-۲-۲- روش مونت کارلو و معرفی کد MCNP	۱۵
۳-۲- معادله دیفیوژن یا پخش	۱۸
۱-۳-۲- قانون فیک	۲۰
۲-۳-۲- شرایط مرزی روی سطح و تعریف طول برونایی	۲۱
۳-۳-۲- طول پخش نوترون	۲۴
فصل ۳: کندشوندگی نوترون	۲۷
۱-۳- برخورد الاستیک و کند شدن	۲۸
۲-۳- لتارژی	۳۴
۳-۳- چگالی برخورد و چگالی کند شدن	۳۴
۴-۳- کندشوندگی تابع مکان - نظریه سن فرمی	۳۸
۱-۴-۳- شرایط مرزی معادله سن	۴۱
۲-۴-۳- مفهوم و اهمیت فیزیکی سن فرمی	۴۴
۵-۳- زمان لازم برای کند شدن نوترون با فرض کندشدن الاستیک	۴۷
فصل ۴: چشمه‌های نوترون و آشکارسازی نوترون‌های کند	۴۹
۱-۴- چشمه‌های نوترون	۴۹
۱-۱-۴- شکافت خودبخودی	۴۹

۵۱.....	۲-۱-۴- چشمه‌های رادیوایزوتوپ (α, n)
۵۴.....	۳-۱-۴- چشمه‌های فوتونوترون
۵۶.....	۴-۱-۴- واکنش‌های ذرات بار دار شتاب داده شده
۵۷.....	۲-۴- برهم کنش‌های نوترون
۵۷.....	۱-۲-۴- خواص کلی
۵۷.....	۲-۲-۴- برهم کنش‌های نوترون‌های کند
۵۸.....	۳-۲-۴- برهم کنش‌های نوترون‌های تند
۵۹.....	۳-۴- روش‌های آشکارسازی نوترون‌های کند
۵۹.....	۱-۳-۴- واکنش‌های هسته‌ای جالب توجه در آشکارسازی نوترون‌های کند
۶۰.....	۲-۳-۴- واکنش ${}^1_0B(n, \alpha)$
۶۳.....	۳-۳-۴- واکنش ${}^6_3Li(n, \alpha)$
۶۳.....	۴-۳-۴- واکنش ${}^3_2He(n, p)$
۶۴.....	۵-۳-۴- واکنش شکافت القایی نوترون
۶۱.....	۴-۴- آشکارسازی پایه‌ریزی شده بر اساس واکنش بور
۶۵.....	۱-۴-۴- طیف ارتفاع پالس تیوب BF_3 - اثر دیواره
۶۸.....	۲-۴-۴- ساختمان تیوب
۷۰.....	فصل ۵: اندازه‌گیری طول پخش و طول برونمایی نوترون در گرافیت
۷۱.....	۱-۵- آزمایش پیل سیگما
۷۵.....	۲-۵- نحوه انجام آزمایش اندازه‌گیری طول پخش نوترون در گرافیت به شیوه پیل سیگما
۸۲.....	۱-۲-۵- نحوه تفکیک نوترون‌های کند حاصل از چشمه از نوترون‌های تند و نوترون‌های زمینه
۹۰.....	۳-۵- محاسبه طول برونمایی در بلوک گرافیت، با اندازه‌گیری شار روی محور افقی
۹۵.....	فصل ۶: بحث در مورد نتایج و ارزیابی آنها با استفاده از کد MCNP
۹۵.....	۱-۶- نتایج تجربی
۹۷.....	۲-۶- شبیه‌سازی مسئله با کد MCNP و ارزیابی نتایج
۱۰۴.....	پیوست ۱
۱۰۵.....	پیوست ۲
۱۰۶.....	مراجع

فصل ۱

مقدمه

کشف و گسترش انرژی هسته‌ای که در واقع انرژی است که در اثر شکافت اورانیوم و احتمالاً عناصر سنگین دیگر آزاد می‌شود، به سال ۱۹۳۲، که چادویک در آزمایشگاه کاوندیش، واقع در کمبریج نوترون را شناسایی کرد برمی‌گردد.

چند سال بعد، فرمی و همکارانش در رم عناصر طبیعی زیادی را با نوترون بمباران کردند و فرآورده‌های واکنش‌های حاصل را مورد مطالعه قرار دادند. در بسیاری از موارد فرمی دریافت که ایزوتوپ‌های پرتوزای عنصر اصلی تولید می‌شدند، وقتی این ایزوتوپ‌ها و امی پاشیدند عناصر دیگری، کمی سنگین‌تر از عنصر اصلی تولید می‌شدند، با این روش اورانیوم سنگین‌ترین عنصر طبیعی، در اثر بمباران با نوترون به عناصر سنگین‌تر بالاتر از اورانیوم که به صورت طبیعی روی زمین یافت نمی‌شوند، تبدیل شد. در این رخداد فرمی دو کشف بزرگ دیگر صورت داد، یکی اینکه نوترون‌های کم انرژی بطور کلی برای تولید واکنش‌های هسته‌ای موثرتر از نوترون‌های پرانرژی هستند، و دیگر موثرترین راه کند شدن نوترون‌های پرانرژی پراکندگی متوالی آنها از عناصر سبک مثل هیدروژن در ترکیباتی مثل آب و پارافین است.

دو شیمیدان آلمانی به نام‌های هان و استراسمن آزمایش‌های فرمی را تکرار کردند. این دو نفر در سال ۱۹۳۸ کشف کردند که هسته سنگین اورانیوم، در اثر بمباران با نوترون، به دو هسته با جرم متوسط تقسیم می‌شود. دو فیزیکی‌دان، به نام‌های مایتنر و فریش، با شنیدن خبر این کشف، بر مبنای مدل قطره - مایعی هسته اتم، توضیحی برای این فرآیند پیدا و محاسبه کردند که انرژی بسیار زیادی از این فرآیند که شکافت نام گرفت آزاد می‌شود.

جلوه‌های مهم دیگری از شکافت در ماه‌های بعد کشف شد. ژولیو و همکاران او در فرانسه نشان دادند که در فرآیند شکافت چند نوترون نیز گسیل می‌شود، که انرژی خیلی بالایی دارند.

به این ترتیب این امکان وجود داشت که فرآیند شکافت که با یک نوترون آغاز می‌شد و دو یا سه نوترون تولید می‌کرد، در صورت بروز شکافت دیگری توسط این نوترون‌های جدید، ادامه پیدا کند. زنجیره واکنش خود نگهداری که به این ترتیب ایجاد می‌شد قادر بود مقدار انرژی فوق العاده زیادی ایجاد کند.

دو نوع واکنش زنجیره‌ای شکافت متمایز در پیش‌رو بود، یکی آنکه فرایند شکافت با آهنگ پایا و کنترل شده‌ای انجام می‌شد و به صورت پایا انرژی آزاد می‌کرد و دیگر آنکه شکافت به حدی سریع و کنترل نشده می‌بود که، واقعاً یک انفجار هسته‌ای با توان تخریب زیاد تولید می‌کرد. مجهولات و مشکلات زیادی باید حل می‌شد. یکی از این مشکلات این بود که برای دستیابی به یک واکنش زنجیره‌ای در انواع مشخصی از سیستم‌هایی که برای تولید پایا و پیوسته انرژی طراحی می‌شدند لازم بود انرژی نوترون‌هایی که توسط شکافت تولید می‌شدند به انرژی خیلی پایین‌تری کاهش می‌یافتند تا، همانطور که فرمی نشان داده بود، شکافت‌های بیشتر را باعث می‌شدند، ماده‌ای که برای حصول این فرآیند کندشدگی لازم بود کندکننده^۱ نام گرفت. یکی از کندکننده‌های اولیه که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت آب سنگین بود. در دسامبر ۱۹۴۲ اولین سیستم کنترل شده واکنش زنجیره‌ای در شیکاگو زیر نظر فرمی، به وضعیت بحرانی رسید. این راکتور که اولین راکتور هسته‌ای دنیا بود CP-1 (پیل ۱ شیکاگو) نام گرفت. در این راکتور از گرافیت به عنوان کندکننده استفاده شد. سوخت این راکتور اورانیوم غنی شده بود و برای کنترل آن از میله‌های کادمیم استفاده شده بود. طی دو سال پس از آن، راکتورهای (نامی که به سیستم‌های کنترل شده شکافت داده شد) بزرگتر و قوی‌تر ساخته شد، که نقطه اوج آن راکتور عظیم تولیدکننده پلوتونیم هانفورد^۲ در واشنگتن بود که در آن نیز از گرافیت به عنوان کندکننده استفاده شد [۱].

تا تابستان ۱۹۴۵ در اک دیچ به اندازه کافی اورانیوم ۲۳۵ و در هانفورد به اندازه کافی پلوتونیم تولید شده بود که بتوان اولین بمب‌های اتمی را ساخت. یکی از این بمب‌ها

۱-moderator

۲-han ford

در آلاموگورد^۱ واقع در نیومکزیکو آمریکا آزمایش شد و دو تا روی ژاپن انداخته شد و جنگ جهانی دوم را ناگهان به پایان رساند. قدرت ویرانگری این بمبها ادعاها و نگرانیهایی را که دانشمندان قبل از آن بیان کرده بودند تأیید، و اوت ۱۹۴۵ را به صورت لکه سیاهی در تاریخ بشریت ثبت کرد.

در سالهای بعد نیز آزمایشات هسته ای با مقاصد نظامی ادامه یافت. در نهایت همین امور نظامی، مبنای پیشرفت‌های اولیه انرژی هسته‌ای برای تولید برق شد. در ایالات متحده پیش بینی شد که کشتی‌های نظامی با نیروی محرکه هسته‌ای ساخته شوند زیرا این کشتی‌ها می‌توانستند دارای برد تقریباً نامحدودی باشند. برای انجام این کار لازم بود تا راکتورهای هسته‌ای تا جایی که ممکن است کوچک شوند. و این منجر به ساخت اولین راکتور آب تحت فشار شد که در آن آب تحت فشار نقش کندکننده و خنک کننده را دارد. و سوخت آن اورانیوم ۲۳۵ با غنای ۲ تا ۳ درصد است. این نوع راکتور خیلی جمع و جورتر از راکتورهای عظیم با کندکننده گرافیت هانفورد بود. اولین کشتی هسته‌ای در سال ۱۹۵۵ در ناتیلوس آمریکا به آب انداخته شد. دو سال پس از آن در طرحی مشابه در شیبینگ پورت پنسیلوانیا، اولین نیروگاه هسته‌ای تجارتي آمریکا برای تولید برق به کار افتاد، و از آن به بعد تاکنون این نوع راکتور، که از نظر اندازه و توان بسیار بزرگتر شده است، مبنای تولید برق هسته‌ای در آمریکا و کشورهای دیگر بوده است.

اما قبل از ساخت این راکتور در آمریکا، در بریتانیا در سال ۱۹۵۶، اولین راکتورهای بزرگ جهان که به شبکه سراسری برق می‌رساندند در کالدرهال^۲ ساخته شدند. این راکتورها که برای تولید توآمان برق و پلوتونیم به کار انداخته شدند به راکتورهای نمونه برای گسترش بعدی راکتورهای با خنک کننده گاز و کندکننده گرافیت بریتانیا برای تولید برق تبدیل شدند، کاری که تا زمان حاضر ادامه یافته است [۱].

این تاریخچه کوتاهی از پیشرفت‌های اولیه انرژی هسته‌ای در جهان غرب بود. پیشرفت‌های مشابه‌ای که اهمیت آنها کمتر نبوده است نیز بطور همزمان در روسیه صورت

۲-Alamogordo

۱-calder hall

گرفته است، و اکنون بسیاری از کشورهای توسعه یافته صنعتی برنامه‌های ساخت و استفاده از نیروی هسته‌ای خود را دارند.

علاوه بر آنچه در مورد کاربرد گرافیت در راکتورهای نسل قدیم ذکر شد، در نوعی از راکتورهای نسل جدید نیز گرافیت به عنوان کندکننده استفاده می‌شود. راکتور pebble bed با نام اختصاری PBMR^۱، راکتور نسل جدیدی است که دارای کندکننده گرافیت و خنک کننده گازی می‌باشد [۲]. در این نوع راکتور سوخت موجود در قلب راکتور چند صد هزار قطعه کروی با قطر ۶۰mm است. پوشش خارجی این قطعه‌ها یک لایه گرافیت با ضخامت ۵mm است [۳]. درون این پوشش ناحیه سوخت است که شامل حدود ۱۵۰۰۰ ذره ریز اورانیوم روکش شده است. این روکش به نحوی است که هیچ ماده رادیواکتیو گازی یا فلزی نتواند فرار کند [۴] و [۵].

در هر لحظه قلب راکتور شامل بیش از ۴۴۰۰۰۰ قطعه کروی است که ۷۵٪ آنها کره‌های سوخت ذکر شده در بالا و ۲۵٪ بقیه قطعه‌های کروی کاملاً گرافیتی هستند [۶].

آنچه از بحث گذشته برمی‌آید گرافیت به عنوان کندکننده در ساخت اولین راکتور جهان به کار گرفته شده است، و امروزه نیز در ساخت راکتورهای نسل جدید در جهان از گرافیت استفاده می‌شود. گرافیت ویژگی‌های لازم برای کندکننده در راکتورهای حرارتی، یعنی جرم پایین، سطح مقطع جذب نوترون خیلی پایین، و سطح مقطع پراکندگی بالا را داراست و در کنار آب و آب سنگین به عنوان تنها کندکننده‌های عملی برای راکتورهای حرارتی مطرح هستند. ویژگی‌های هسته‌ای این ماده، مثل قدرت کندکنندگی و سطح مقطع جذب، به خوبی ویژگی‌های آب سنگین نیستند. اما نوع خالص آن را به آسانی می‌توان با قیمت مناسبی تهیه کرد و به خوبی قابل ماشین‌کاری است. خواص ساختاری گرمایی آن خوب است اما در دماهای بالا با آب و هوا ترکیب می‌شود. گرافیت دارای رسانندگی گرمایی بالایی است و در دمای ۳۶۵۰°C بدون ذوب شدن تصعید می‌شود. بنابراین برای تمام منظورهای عملی، هیچ حدی بر دمای بیشینه آن وجود ندارد.

۱. pebble bed modular reactor

حال که گرافیت به عنوان کندکننده در راکتورها استفاده می‌شود پس پارامترهایی ازگرافیت که در محاسبات شار نوترون^۱ در راکتور به کار می‌آیند حائز اهمیت هستند. یکی از این پارامترها، طول پخش نوترون در گرافیت است که در محاسبات معادله پخش به آن نیازاست. در این پایان نامه برآنیم که این پارامتر را در نوعی ازگرافیت به روش تجربی اندازه گیری کنیم، و نتایج را با نتایجی که از کد راکتور^۲ MCNP بدست می‌آید مقایسه کنیم. علاوه بر این، در گستره این آزمایش طول برون‌یابی نوترون که در شرایط مرزی معادله پخش نوترون در راکتور اهمیت دارد بدست آورده می‌شود.

در این راستا ابتدا در فصل دوم معادله ترابرد و پخش مورد بحث قرار می‌گیرد و کمیت‌های طول پخش و طول برون‌یابی تعریف می‌شوند. موضوع فصل سوم کندشوندگی نوترون است که در آن راجع به مکانیسم کندشدن نوترون، خواص لازم برای یک محیط کندکننده و نظریه سن فرمی به طور مختصر بحث می‌شود. از آنجا که در انجام آزمایش، آشکارسازی نوترون انجام می‌شود و از چشمه نوترون استفاده شده است، فصل چهارم به چشمه های نوترون و آشکارسازی نوترون‌های کند اختصاص یافته است. در این فصل انواع مختلف چشمه های نوترون بیان شده است و روش‌های متفاوت آشکارسازی نوترون‌های کند آورده شده است. فصل پنجم به شیوه انجام آزمایش اختصاص یافته دارد. ابتدای این فصل مروری است بر آزمایش پیل سیگما و در ادامه ابزار به کار گرفته شده در انجام آزمایش توضیح داده می‌شود و سپس نحوه انجام آزمایش و منحنی‌های حاصل آورده شده است. فصل ششم در برگیرنده نتایج آزمایش و شبیه سازی آزمایش با کد MCNP و پیشنهاد برای کارهای آتی است.

^۱.neutron flux

^۲.reactor code

معادله ترابرد و پخش نوترون

توزیع فضایی و زمانی و توزیع انرژی نوترون‌ها، ناظر و تعیین کننده عملکرد راکتورهای هسته‌ای است. و یکی از محوریت‌ترین بخش‌ها در تئوری راکتورها، پیش‌بینی این توزیع در راکتور می‌باشد. این پیش‌بینی را می‌توان با حل معادله ترابرد نوترون انجام داد. معادله‌ای که به دلیل شباهتش با توصیف به کار برده شده توسط بولتزمن در برخورد با مسئله انرژی جنبشی گازها، به معادله بولتزمن معروف است.

مسئله توزیع نوترون‌ها را می‌توان با درج مجموعه کاملی از سطح مقطع‌های مناسب در معادله ترابرد حل کرد. سطح مقطع‌ها در واقع بیانگر احتمال اندرک‌های متفاوت نوترون با هسته‌های مواد موجود در محیط راکتور هستند. حل تحلیلی این معادله غیر ممکن است و تنها به روش‌های عددی مناسب همانند روش مونت کارلو قادر به حل آن هستیم. مشکل بودن حل معادله ترابرد نوترون از دو واقعیت ناشی می‌شود، نخست رفتار تابع انرژی و بسیار پیچیده سطح مقطع‌ها است که کاملاً هم شناخته شده نیست، و دوم چیدمان هندسی پیچیده مواد داخل راکتور است که حتی حل مسئله توسط کامپیوتر در یک زمان معقول را نیز غیر ممکن می‌سازد. بنابراین در مواجهه با معادله ترابرد، یا باید مسئله دارای هندسه ساده‌ای باشد و یا از شکل‌های تقریبی معادله ترابرد استفاده شود.

در کنار نظریه ترابرد، نظریه پخش قرار دارد که به طور قابل ملاحظه‌ای ساده‌تر است. معادله پخش در واقع همان معادله ترابرد تحت شرایط خاص است. اگر چه شرایط لازم برای اعتبار معادله پخش به ندرت در راکتورها فراهم می‌شود در عین حال، حل آن معمولاً تقریب خوبی از حل واقعی معادله ترابرد در دسترس قرار می‌دهد و به علت سادگی در بسیاری از

مسائل مربوط به طراحی راکتور به کار می‌رود. در این فصل ابتدا شکل کلی معادله ترابرد به دست آورده می‌شود و در مورد خواص کلی آن بحث می‌گردد و بعضی از تقریب‌های عمومی که در حل آن به کار گرفته می‌شود بیان می‌گردد. سپس معادله پخش با تفصیل بیشتری بیان می‌شود.

۱-۲- مفاهیم و تعریف‌ها

قبل از شروع بحث لازم است برخی مفاهیم و کمیت‌ها که برای توصیف معادله ترابرد نیاز است، تعریف شوند.

۱-۱-۲- نوترون به عنوان یک ذره نقطه‌ای

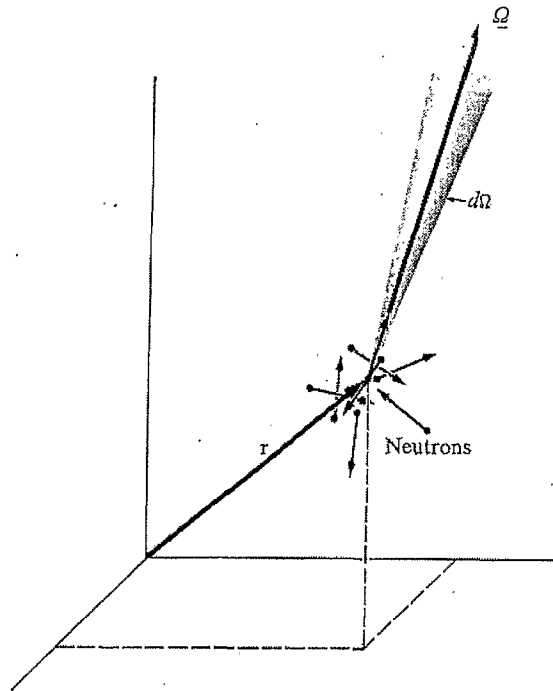
در معادله ترابرد و پخش، نوترون به صورت یک ذره نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که تحت این شرایط تنها با سرعت و مکانش کاملاً شناخته شده است. توصیف نقطه‌ای، زمانی قابل قبول است که طول موج کاهش یافته نوترون، در مقایسه با ابعاد ماکروسکوپی و مسافت آزاد میانگین نوترون کوچک باشد.

طبق معادله دوبروی، برای یک نوترون λ برابر است با:

$$\lambda = \frac{4/55 \times 10^{-10}}{\sqrt{E}} \text{ (cm)} \quad (1-2)$$

که در آن E انرژی نوترون بر حسب الکترون ولت است. حتی برای یک نوترون با انرژی 0.01 eV مقدار $\lambda = 4/55 \times 10^{-9}$ ، که تقریباً کوچکتر از فاصله بین اتم‌ها در جامدات، و چندین مرتبه بزرگی، کوچکتر از ابعاد ماکروسکوپی محیط و مسافت آزاد میانگین^۱ نوترون است. پس ذره‌ای گرفتن نوترون خلی در حل مسئله ایجاد نمی‌کند. از طرف دیگر نوترون دارای ممان مغناطیسی و اسپین است که می‌توان ثابت کرد که اثرات آنها نیز بسیار کم است و می‌توان از آنها صرف نظر کرد [۷].

۱. mean free path



شکل ۱-۲: نمایش حرکت نوترون‌ها در المان زاویه فضایی $d\Omega$ در نزدیکی نقطه \vec{r}

۲-۱-۲- تعریف چگالی و شار نوترون و چگالی جریان^۱

ابتدا کمیت چگالی زاویه‌ای نوترون^۲ به صورت $N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t)$ تعریف می‌شود که برابر است با تعداد نوترون‌های موجود در واحد حجم در واحد زاویه فضایی در واحد انرژی در مکان \vec{r} راکتور با انرژی E در لحظه t که در راستای $\underline{\Omega}$ در حال حرکت هستند. بنابراین $N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) dV d\Omega dE$ تعداد نوترون‌های در المان حجم dV در نقطه \vec{r} است که درون المان زاویه فضایی $d\Omega$ حول $\underline{\Omega}$ در حرکتند و انرژی آنها در بازه dE اطراف E در لحظه t است. شکل (۱-۲) منظور از راستای $\underline{\Omega}$ را نشان می‌دهد انتگرال چگالی زاویه‌ای نوترون روی تمام زاویه فضایی، چگالی نوترون وابسته به انرژی را خواهد داد:

$$n(\vec{r}, E, t) = \int_{4\pi} N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) d\Omega \quad (2-2)$$

کمیت دیگری که تعریف می‌شود حاصل ضرب اندازه سرعت نوترون، در چگالی زاویه‌ای نوترون است که با ϕ نشان داده می‌شود:

۱. current density

۲. neutron angular density

$$\varphi(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) = vN(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) \quad (3-2)$$

و به عنوان شار زاویه‌ای نوترون تعریف می‌گردد. شار زاویه‌ای نوترون برابر است با تعداد نوترون‌هایی که در لحظه t ، با انرژی E در جهت $\underline{\Omega}$ ، بر واحد زمان، واحد انرژی، واحد زاویه فضایی بر واحد سطح از نقطه \vec{r} را کتور می‌گذرند. برای محاسبه شار کل تابع انرژی باید از شار زاویه‌ای روی تمام زاویه فضایی انتگرال گرفت

$$\varphi(\vec{r}, E, t) = \int_{4\pi} \varphi(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) d\Omega \quad (4-2)$$

و اما چگالی جریان نوترون، که در واقع تعداد خالص نوترون‌هایی است که از واحد سطح در واحد زمان بر واحد انرژی از نقطه \vec{r} می‌گذرند، به این صورت تعریف می‌شود:

$$\vec{j}(\vec{r}, E, t) = \int_{4\pi} \vec{v} N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) d\Omega = v \int_{4\pi} \underline{\Omega} N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) d\Omega \quad (5-2)$$

۲-۱-۳- سطح مقطع نوترون^۱

اثر متقابل نوترون با ماده بر حسب کمیتی به نام سطح مقطع بیان می‌گردد. هنگامی که نوترون در یک محیط مادی حرکت می‌کند می‌تواند با هسته‌های موجود در محیط برخورد کند. برخورد می‌تواند الاستیک یا غیر الاستیک باشد و یا طی برخورد، نوترون فرودی توسط هسته جذب شود. اگر نوترون توسط هسته جذب شود خود می‌تواند باعث رخدادهای بعدی همانند شکافت و یا واپاشی پرتوزای هسته شود. هر مواجه نوترون با هسته منجر به اندرکنش آنها نمی‌شود، بلکه هر اندرکنش دارای احتمال است. در واقع سطح مقطع بیانگر این احتمالات است. سطح مقطع که با σ نشان داده می‌شود، در واقع مقیاسی از احتمال اندرکش هر نوترون به ازای هر هسته هدف است. اما نوترون‌ها به شیوه‌های متفاوت با هسته اندرکنش می‌کنند و می‌توان برای هر شیوه، سطح مقطع ویژه آن را تعریف کرد. بر همین اساس برای پراکندگی الاستیک σ_s و پراکندگی غیرالاستیک σ_i و برای واکنش (n, γ) σ_γ ، و برای شکافت σ_f و غیره را تعریف کرد. جمع همه سطح مقطع‌ها با σ_t نشان داده می‌شود:

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_i + \sigma_\gamma + \sigma_f + \dots \quad (6-2)$$

^۱ neutron cross section

سطح مقطع همه واکنش های جذبی را سطح مقطع جذب می نامند و نماد آن σ_a است:

$$\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha + \dots \quad (7-2)$$

آنچه در بالا برای سطح مقطع تعریف شد را عموماً سطح مقطع میکروسکوپی می نامند و در کنار آن کمیتی به اسم سطح مقطع ماکروسکوپی تعریف می شود. سطح مقطع ماکروسکوپی که با Σ نشان داده می شود، حاصل ضرب چگالی اتمی ماده (تعداد اتمها در واحد حجم) در سطح مقطع میکروسکوپی آن است. می توان اثبات کرد که Σ برابر است با احتمال اندرکنش نوترون با هسته در واحد فاصله در مسیر حرکت نوترون، که بعد عکس طول دارد. برای واکنش های متفاوت نوترون با هسته همانند σ ، می شود انواع مختلف Σ تعریف کرد. در این فصل و فصل های بعد بارها در محاسبات از این سطح مقطع ها استفاده می کنیم. اما در محاسبات راکتور عموماً سطح مقطع های ماکروسکوپی کاربرد بیشتری دارند. سطح مقطع ها به شدت تابع انرژی هستند و این، کار را در محاسبات راکتور فوق العاده مشکل می کند. آنچه در معادله ترابرد ظاهر می شود، سطح مقطع های ماکروسکوپی هستند.

در نظریه ترابرد نوترون، نیاز است تا بیان شود که نوترون های خروجی از یک برخورد راستاها و انرژیهای مختلفی دارند. برای انواع برخوردها سطح مقطع های ماکروسکوپی جزئی مختلفی همانند پراکندگی، شکافت و واکنش های $(n, 2n)$ تعریف می شود. اگر نوترونی با انرژی اولیه E' و راستای اولیه Ω' با یک هسته برخورد کند، می توان برای احتمال اینکه نوترون یا نوترون هایی از برخورد خارج شوند و انرژی آنها در بازه dE حول E باشد و در راستای $d\Omega$ حول Ω قرار داشته باشند، کمیتی تعریف کرد. این کمیت به طور کلی برای واکنش (n, x) به این صورت بیان می شود:

$$\Sigma_x(\vec{r}, E') f_x(\vec{r}, \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) = \text{سطح مقطع دیفرانسیلی} \quad (8-2)$$

که Σ_x سطح مقطع واکنش از نوع x برای نوترون های با انرژی E' است، و تابع $f_x(\Omega', E' \rightarrow \Omega, E) d\Omega dE$ احتمال آن است که نوترونی با انرژی اولیه E' و راستای Ω' برخوردی انجام دهد، و یک نوترون با انرژی در بازه dE حول E و راستایی در بازه $d\Omega$

حول Ω از برخورد خارج شود. برای پراکندگی الاستیک و غیرالاستیک f به یک نرمالیزه است یعنی:

$$\iint f_n(\Omega', E' \rightarrow \Omega, E) d\Omega dE = 1 \quad (9-2)$$

ولی برای شکافت f مقادیر گوناگونی دارد و برای واکنش‌های (n, α) و (n, γ) مقدار f برابر صفر است. اما احتمال کل انتقال نوترون از E' و Ω' به E و Ω برابر با:

$$\begin{aligned} \text{احتمال کل انتقال نوترون از } E' \text{ و } \Omega' \text{ به } E \text{ و } \Omega = \Sigma(\vec{r}, E') f(\Omega', E' \rightarrow \Omega, E) = \\ \sum_x \Sigma_x(\vec{r}, E') f_x(\vec{r}, \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) \end{aligned} \quad (10-2)$$

که روی تمام واکنش‌های ممکن که ذره خروجی در آنها نوترون‌ها هستند جمع زده می‌شود [7].

۲-۲- معادله ترابرد^۱

مطابق آنچه قبلاً تعریف شد، $N(\vec{r}, \Omega, E, t) dV d\Omega dE$ ، تعداد میانگین نوترون‌ها در لحظه t در یک المان حجم dV با انرژی در بازه dE حول E و راستایی در بازه $d\Omega$ حول Ω است. حال آنچه برای این بسته نوترون بعد از زمان Δt رخ می‌دهد را بررسی می‌کنیم و فرض بر این است که سطح مقطع‌ها تابع پیوسته از مکان در مجاورت \vec{r} هستند. نوترون‌های با انرژی E ، اگر دستخوش یک برخورد شوند، ممکن است از این بسته خارج شوند و بقیه باقی بمانند. فاصله طی شده توسط نوترون در Δt برابر $v \Delta t$ است، از این رو، احتمال آنکه یک نوترون برخوردی در این زمان داشته باشد $\Sigma(\vec{r}, E) v \Delta t$ است و احتمال آنکه یک نوترون در زمان Δt برخوردی انجام ندهد و باقی بماند $(1 - \Sigma(\vec{r}, E) v \Delta t)$ است. بنابراین

$$\begin{aligned} \text{تعداد نوترون‌های باقی مانده در} \\ \text{بسته نوترون بعد از گذشت زمان } \Delta t \end{aligned} = N(\vec{r}, \Omega, E, t) [(1 - \Sigma(\vec{r}, E) v \Delta t)] dV d\Omega dE \quad (11-2)$$

^۱ transport equation

اینها نوترون‌هایی هستند که به مکان $\vec{r} + \underline{\Omega}v \Delta t$ در لحظه $t + \Delta t$ خواهند رسید.

علاوه بر اینکه نوترون‌ها از این بسته در اثر برخورد خارج می‌شوند، برخی از نوترون‌های خارج از بسته ممکن است وارد آن شوند. این نوترون‌ها در واقع یا از چشمه‌های مستقل تولید می‌شوند یا نوترون‌هایی هستند که در خارج از بسته در اثر برخورد وارد آن می‌شوند. این دو کمیت عبارتند از:

$$\text{تعداد نوترون‌ها وارد شده به بسته} = \left[\iint \Sigma(\vec{r}, E') f(\vec{r}, \underline{\Omega}', E' \rightarrow \underline{\Omega}, E) \times \right. \\ \left. v N(\vec{r}, \underline{\Omega}', E', t) d\Omega' dE' \right] dE d\Omega dV \Delta t$$

در اثر برخوردها در بازه زمانی Δt .

(۱۲-۲)

$$\text{تعداد نوترون‌های تولیدی چشمه‌ها} = Q(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) dV dE d\Omega \Delta t$$

(۱۳-۲)

با جمع این سه جمله بالا، چگالی زاویه‌ای نوترون‌ها در مکان $\vec{r} + \underline{\Omega}v \Delta t$ در زمان $t + \Delta t$ بدست می‌آید:

$$N(\vec{r} + \underline{\Omega}v \Delta t, \underline{\Omega}, E, t + \Delta t) = \\ N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t)(1 - \Sigma(\vec{r}, E))v \Delta t + \left[\iint \Sigma' f v' N(\vec{r}, \underline{\Omega}', E', t) d\Omega' dE' \right] \Delta t + Q \Delta t$$

(۱۴-۲)

که در آن برای ساده نویسی نمایش زیر را جایگزین کرده ایم:

$$\Sigma \equiv \Sigma(\vec{r}, E)$$

$$\Sigma' f \equiv \Sigma(\vec{r}, E') f(\vec{r}, \underline{\Omega}', E' \rightarrow \underline{\Omega}, E)$$

$$Q \equiv Q(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t)$$

با تقسیم طرفین رابطه بر Δt و با فرض اینکه $\Delta t \rightarrow 0$ نتیجه می‌شود:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{N(\vec{r} + \underline{\Omega}v \Delta t, \underline{\Omega}, E, t + \Delta t) - N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t)}{\Delta t} \right] + \Sigma v N(\vec{r}, \underline{\Omega}, E, t) \\ = \left[\iint \Sigma' f v' N(\vec{r}, \underline{\Omega}', E', t) d\Omega' dE' \right] + Q$$

(۱۵-۲)

نخستین جمله در طرف چپ، مشتق زمانی کل چگالی زاویه‌ای نوترون است.