بسم الله الرحمن الرحيم

١١٠٨٥٤

۸۷/۱۲/۵۹۹۱٤
۸۷/۱۲/۲۱

دانشگاه ارومیه

محاسبه حالات بحرانی یک راکتور حرارتی با استفاده از روش المان‌های محدود

اختای جهانبخش

دانشکده علوم

گروه فیزیک

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
۱۳۸۷ /۱۲/۱۲

پایان‌نامه جهت اخذ کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

اساتید راهنما :

دکتر رسول خدابخش

دکتر سهراب بهنیا

شهریور ۱۳۸٦

۱۱۰۸۵۴

پایان نامه به تاریخ ۸۱/۷/۲۶ شماره مورد پذیرش هیات محترم داوران با رتبه عالی

و نمره ۱۹/۵ قرار گرفت.

نمونه دستخط

۱- استاد راهنما و رئیس هیئت داوران: رسول خدایی و سعید بینیاز

۲- استاد مشاور: ــــ

۳- داور خارجی:

٤- داور داخلی: طاهره

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی:

« حق چاپ و نشر برای دانشگاه ارومیه محفوظ است»

تقدیم به

پدر عزیز

و

مادر مهربانم

تقدیر و تشکر

از تلاش های بی دریغ اساتید گرامیم جناب آقای دکتر رسول خدابخش و جناب آقای دکتر سهراب بهنیا که در مراحل مختلف انجام این پایاننامه به انحای مختلف به اینجانب کمک کرده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. از خانوادهٔ عزیزم که با تشویقها وحمایتهایشان من را در پیمودن این راه یاری رساندند نیز تشکر می‌کنم .همچنین از اساتید محترم گروه فیزیک که در طول مدت تحصیل از محضرشان استفاده نمودم و همه دوستان عزیزم، سپاسگذارم.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه ۱

۱-۱ انرژی هسته‌ای ۱

۱-۲ راکتورهای هسته‌ای ۲

فصل دوم : نظریه راکتورهای هسته‌ای و معادلات پخش نوترون ۵

۲-۱ نوترون و چشمه‌های نوترونی ۵

۲-۲ برهم‌کنش‌های نوترون با ماده ٦

۲-۲-۱ پراکندگی الاستیک ٦

۲-۲-۲ پراکندگی غیرالاستیک ٦

۲-۲-۳ جذب تابش‌زا ۷

۲-۲-٤ شکافت ۷

۲-۳ شار نوترون، سطح‌مقطع‌ها و آهنگ‌های برهم‌کنش ۱۰

۲-٤ واکنش زنجیره‌ای و ضریب تکثیر نوترونی ۱٤

۲-۵ نظریه پخش یک گروهی نوترون ۱۷

۲-٦ معادله پخش نوترون ۲۱

۲-٦-۱ طول پخش ۲۲

۲-٦-۲ پخش نوترون در محیط تکثیرکننده ۲۳

۲-۷ نظریه دوگروهی ۲٦

فصل سوم : روشهای حل عددی ۳۰

۳-۱ روش مونت‌کارلو ۳۱
۳-۱-۱ نظریه اساسی احتمالات ۳۲
۳-۱-۱-۱ متغیرهای تصادفی پیوسته ۳۲
۳-۱-۱-۲ متغیرهای تصادفی گسسته ۳۶
۳-۱-۱-۳ توزیع احتمال تجمعی ۳۶
۳-۱-۱-٤ نظریه نمونه‌گیری ۳۶
۳-۱-۱-٤-۱ تابع توزیع تجمعی معکوس پذیر (روش مستقیم) ۳۷
۳-۱-۱-٤-۲ روش مردود سازی ٤۰
۳-۱-۱-٤-۳ روش مخلوط ٤۱
۳-۲ روش المانهای محدود ٤۳
۳-۲-۱ طبقه‌بندی معادلات ٤٤
۳-۲-۲ شرایط مرزی ٤۷
۳-۲-۳ نحوه آماده‌سازی معادله دیفرانسیل برای حل عددی ٤۸
۳-۲-۳-۱ تقریب متغیر U ٤۸
۳-۲-۳-۱-۱ معرفی سیستم مختصات المان مرجع ۵۱
۳-۲-۳-۲ انتخاب تابع وزن ۵۱
۳-۲-۳-۳ ظاهر کردن شرایط مرزی ۵۳
۳-۲-۳-٤ گسسته کردن ۵۳
۳-۳ شبیه‌سازی‌های انجام گرفته و نتایج ۵٤
۳-۳-۱ گسسته‌سازی معادلات پخش نوترون ۵٤

۳-۳-۲ تعیین شار نوترونی حاصل از چشمه نقطه‌ای ۵۷
۳-۳-۲-۱ حل تحلیلی ۵۷
۳-۳-۲-۲ حل عددی ۵۷
۳-۳-۳ تعیین شار نوترونی برای یک راکتور آزمایشی ۶۰
فصل چهارم : آشوب ۶۷
٤-۱ خلاصه‌ای از علم دینامیک ۶۷
٤-۲ سیستم‌های دینامیکی ۶۹
٤-۳ معادلات دیفرانسیل ۷۱
٤-٤ نگاشت‌های تکرار ۷۲
٤-٤-۱ نگاشت‌های خطی ۷۲
٤-٤-۲ نگاشت‌های غیرخطی ۷۳
٤-٥ مفاهیم اولیه در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی ۷۵
٤-٥-۱ نقاط ثابت ۷۵
٤ -٥-۲ دوشاخه‌شدگی ۷۷
٤-٥-۳ حلقه‌های محدود ۸۰
٤-٥-٤ آشوب ۸۲
٤-٥-٥ نمای لیاپانوف ۸۵
٤-٥-٦ جذب‌کننده‌ها ۸۷
٤-٥-۷ معادلات لورنتس ۸۷
٤-٥-۸ فراکتالها ۹۰

٤-٦ شبکه‌های تزویج یافته ۹۱
٤-۷ ارائه مدل پدیده‌های دینامیکی در سیستم‌های فضایی به کمک مدل **CML** ۹۲
٤-۷-۱ شبکه در حالت یک بعدی ۹۲
٤-۷-۲ شبکه در حالت دو بعدی ۹٤
٤-۷-۳ مدلهای جریان آزاد ۹٤
٤-۸ شبیه‌سازی رفتار راکتور توسط شبکه‌های جفت شده ۹۵
٤-۸-۱ گسسته‌سازی معادلات پخش نوترون با استفاده از FDM ۹٦
٤-۸-۲ مدل شبیه‌سازی شده ۹۸

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ : فرآیند شکافت U^{235} ۷

شکل ۲-۲ : طیف انرژی نوترون شکافت ۹

شکل ۲-۳ : آهنگ برهم‌کنش نوترون‌ها ۱۱

شکل ۲-٤ : تکثیر نوترون و واکنش زنجیره‌ای ۱۵

شکل ۲-۵ : پراکندگی و جریان نوترون ۱۸

شکل ۲-٦ : نشت نوترون از یک عنصر حجم ۲۰

شکل ۳-۱ : نقش روش مونت‌کارلو در علوم کاربردی ۳۲

شکل ۳-۲ : تابع احتمال $P(x) = e^{-x}$ ۳۳

شکل ۳-۳ : یک تابع توزیع احتمال نوعی ۳۷

شکل ۳-٤ : تابع توزیع احتمال تجمعی ۳۸

شکل ۳-۵ : معکوس تابع توزیع احتمال تجمعی ۳۹

شکل ۳-٦ : یک تابع توزیع احتمال نوعی ٤۱

شکل ۳-۷ : منحنی وزن شده توزیع احتمال شکل (۳-٦) ٤۱

شکل ۳-۸ : یک سیستم هسته‌ای شامل قلب راکتور و بازتابنده ۵۵

شکل ۳-۹ : مش‌بندی سیستم ۵۷

شکل ۳-۱۰ : المانهای مرزی ۵۸

شکل ۳-۱۱ : المانهای حجمی ۵۹

شکل ۳-۱۲ : نحوه توزیع شار نوترون ۵۹

شکل ۳-۱۳ : گرادیان شار نوترونی ٦۰

شکل ۳-۱٤ : مقایسه حل عددی و تحلیلی شار نوترون ٦٠
شکل ۳-۱۵ : سطح مقطع افقی راکتور ٦١
شکل ۳-۱٦ : نحوه توزیع شار نوترون‌های حرارتی در راکتور ٦٢
شکل ۳-۱۷ : مقایسه نحوه توزیع شار نوترون‌های سریع و حرارتی ٦٢
شکل ۳-۱۸ : گرادیان شار نوترونی ٦٣
شکل ۳-۱۹ : سطوح هم‌شار نوترونی در راکتور ٦٣
شکل ۳-۲۰ : نحوه توزیع شار نوترونی در حضور بور ٦٤
شکل ۳-۲۱ : سطوح هم‌شار نوترونی ٦٥
شکل ۳-۲۲ : گرادیان شار نوترونی ٦٥
شکل ۳-۲۳ : مقایسه نحوه توزیع شار نوترون‌های سریع و حرارتی با روش‌های المانهای محدود و مونت‌کارلو .٦٦
شکل ٤-۱ : سری‌های زمانی به ازای r ٧٤
شکل ٤-۲ : نقاط ثابت به ازای مقادیر مختلف پارامتر r برای معادله $\dot{x} = r + x^2$ ٧٨
شکل ٤-۳ : نمودار دوشاخه‌شدگی برای معادله $\dot{x} = r + x^2$ ٧٨
شکل ٤-٤ : نقاط ثابت به ازای مقادیر مختلف پارامتر r برای معادله $\dot{x} = rx - x^2$ ٧٩
شکل ٤-۵ : نمودار دوشاخه‌شدگی برای معادله $\dot{x} = rx - x^2$ ٧٩
شکل ٤-٦ : نقاط ثابت به ازای مقادیر مختلف پارامتر r برای معادله $\dot{x} = rx - x^3$ ٨٠
شکل ٤-۷ : نمودار دوشاخه‌شدگی برای معادله $\dot{x} = rx - x^3$ ٨٠
شکل ٤-۸ : حالت‌های مختلف حلقه‌های پایدار ٨١
شکل ٤-۹ : نمای کلی از فضای فاز سیستم‌های دینامیکی دوبعدی ٨٢
شکل ٤-۱۰ : انتخاب دو مسیر در فضای فاز با فاصله جدایی به اندازه δ_0 ..... ٨٦

شکل ٤-١١ : نمونه‌ای از جذب‌کننده عجیب در دوبعد ٨٩

شکل ٤-١٢ : نمونه‌ای از جذب‌کننده عجیب در سه‌بعد ٨٩

شکل ٤-١٣ : نمونه‌ای از فراکتالها ٩٠

شکل ٤-١٤ : مش‌بندی فضایی برای گسسته‌سازی معادلات پخش نوترون ٩٧

شکل ٤-١٥ : شبکه‌بندی حجم راکتور ٩٨

شکل ٤-١٦ : منحنی تغییرات نمای لیاپانوف به ازای تغییرات چگالی اورانیم ٩٩

شکل ٤-١٧ : منحنی تغییرات نمای لیاپانوف به ازای تغییرات چگالی اورانیم ٩٩

شکل ٤-١٨ : منحنی تغییرات k_{∞} به ازای تغییرات چگالی اورانیم ١٠٠

شکل ٤-١٩ : منحنی تغییرات نمای لیاپانوف به ازای تغییرات چگالی اورانیم با مقدار ثابت غلظت بور ١٠١

شکل ٤-٢٠ : منحنی تغییرات k_{eff} به ازای تغییرات چگالی اورانیم با مقدار ثابت غلظت بور ١٠١

شکل ٤-٢١ : منحنی تغییرات نمای لیاپانوف به ازای تغییرات غلظت بور با مقدار ثابت چگالی اورانیم ١٠٢

شکل ٤-٢٢ : منحنی تغییرات k_{eff} به ازای تغییرات غلظت بور با مقدار ثابت چگالی اورانیم ١٠٢

شکل ٤-٢٣ : نحوه تغییرات نمای لیاپانوف به ازای تغییرات همزمان چگالی اورانیم و غلظت بور ١٠٣

شکل ٤-٢٤ : نحوه تغییرات k_{eff} به ازای تغییرات همزمان چگالی اورانیم و غلظت بور ١٠٣

شکل ٤-٢٥ : توزیع شار نوترونی راکتور به ازای مقادیر منفی نمای لیاپانوف ١٠٤

شکل ٤-٢٦ : توزیع شار نوترونی راکتور به ازای مقادیر مثبت نمای لیاپانوف ١٠٤

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱ : مواد راکتور قدرت ۳

جدول ۲-۱ : تعداد نوترون‌های گسیل‌شده به ازای هر شکافت ۹

جدول ۲-۲ : ثابت‌های پخش و کندشدگی کندکننده‌ها ۲۲

جدول ۱-۳ : شرایط مرزی یک سیستم هسته‌ای ۵۵

جدول ۱-٤ : خلاصه‌ای از تاریخچه آشوب ٦۹

چکیده

از زمان مطرح شدن انرژی هسته‌ای یکی از مهمترین و جذابترین موضوعات ، پایداری راکتورهاست که تلاشهای بسیاری از آن زمان تا کنون در زمینه های تجربی و محاسبات تئوری برای تشخیص و کنترل ناپایداری‌ها صورت گرفته است. راکتور هسته‌ای سیستم پیچیده‌ای است که برای بررسی رفتار گذرا یا پایای آن نیاز به مدل‌های دقیق کامپیوتری و ریاضی است. روشهای حل عددی بر مبنای ابعاد مش‌های تخمینی به دو دسته تقسیم می‌شوند برخی روشها مانند روش تفاضل محدود (FDM)در محاسبات راکتور از مش‌های بسیار کوچکی از مرتبه یک میانگین پویش آزاد برای نوترون حرارتی (در هر بعد کوچکتر از یک سانتیمتر) استفاده می‌کنند و در مقابل روشهای گرهی(nodal) مانند روش المانهای محدود (FEM) از مش‌هایی با ابعاد بسیار بزرگتر از پویش آزاد میانگین استفاده می‌کنند. روش المانهای محدود یک شیوه شناخته شده در ریاضیات کاربردی و علوم مهندسی است که به علت انعطاف پذیری و قابلیت انطباق در برخورد با منحنی‌ها یا شکل‌های هندسی نامنظم و پیچیده به جایگزین قبلی‌اش FDM ترجیح داده می‌شود.

در این پایاننامه با استفاده از روش المانهای محدود، معادلات پخش نوترون را مورد بررسی قرار می‌دهیم و به مقایسه نتایج حاصل از روش‌های حل عددی المانهای محدود و مونت کارلو برای معادله پخش نوترون، در یک چشمه نقطه-ای، و یک راکتور آزمایشی می‌پردازیم سپس با استفاده از روش تفاضل محدود معادلات حاکم بر راکتور را گسسته می-کنیم وبا استفاده از نگاشت سیستم‌های تزویج یافته به بررسی نمای لیاپانوف(که یکی از مهمترین معیارها در تشخیص آشوب در سیستم‌هاست) می‌پردازیم و نتایج حاصل از آن را با حل تحلیلی مقایسه می‌کنیم.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ انرژی هسته‌ای

تاریخچه کشف انرژی هسته‌ای (شکافت) به سال ۱۹۳۲ که چادویک[۱] نوترون را در آزمایشگاه کاوندیش واقع در کمبریج[۲] شناسایی کرد برمی‌گردد. این کشف از چند نظر دارای اهمیت بود؛ اولاً تشریح ساختار اتم به شکل قابل قبول‌تری امکان‌پذیر شد و نشان داده شد که هر عنصر می‌تواند چندین ایزوتوپ مختلف داشته باشد، ثانیاً نوترون ذره جدیدی بود که برای بمباران هسته اتم و ایجاد واکنش‌های مصنوعی در اختیار فیزیکدانان قرار می‌گرفت. در سال‌های قبل دانشمندان برای این منظور از ذرات پروتون و آلفا استفاده می‌کردند اما بلافاصله پس از کشف نوترون، فرمی[۳]، دانشمند ایتالیایی دریافت که این ذره به علت بی‌بار بودن آسان‌تر به درون سد پتانسیل هسته اتم نفوذ کرده و با آن واکنش می‌دهد.

چند سال بعد فرمی و همکارانش در رم، عناصر طبیعی بسیاری را با نوترون بمباران کردند و فراورده‌های واکنش‌های حاصل را مورد بررسی قرار دادند. در بسیاری از موارد فرمی دریافت که ایزوتوپ‌های پرتوزای عناصر اصلی تشکیل می‌شدند

---

[۱] Chadwick
[۲] Cambridge
[۳] Fermi

و وقتی این عناصر وامی‌پاشیدند، عناصر دیگری، کمی سنگین‌تر از ایزوتوپ اولیه عنصر، تولید می‌شدند. با این روش اورانیوم، سنگین‌ترین عنصر طبیعی، در اثر بمباران به عناصر سنگین‌تر از خود که بصورت طبیعی در زمین یافت نمی‌شدند تبدیل شد. در این زمان فرمی به دو نکته مهم دیگر نیز پی‌برد: اول اینکه نوترون‌های کم‌انرژی برای تولید واکنش‌های هسته‌ای نسبت به نوترون‌های پرانرژی مؤثرتر هستند و دوم برای کندکردن نوترون‌های با انرژی بالا، بهترین راه استفاده از عناصر سبک در ترکیباتی مانند آب و پارافین است.

در سال ۱۹۳۸ دو فیزیکدان آلمانی به نامهای هان[۱] و استراسمن[۲] ، در هنگان تکرار آزمایش‌های فرمی بر روی اورانیوم دریافتند یکی از فرآورده‌های برهم‌کنش نوترون با اورانیوم ، باریوم است که در در میانه‌های جدول تناوبی قرار دارد و نشان می‌داد که اورانیوم در اثر بمباران با نوترون به دو هسته با جرم متوسط تبدیل شده است. دو فیزیکدان آلمانی به نامهای مایتنر[۳] و فریش[۴] دیگر توانستند با استفاده از مدل قطره-مایع توضیحی برای این کشف پیدا کنند و محاسبه کردند که انرژی زیادی از این فرآیند که نام شکافت بر آن گذاشته شد، آزاد می‌شود. ژولیو[۵] و همکارانش در فرانسه نشان دادند که در فرآیند شکافت چند نوترون گسیل می‌شود، به این ترتیب این امکان وجود داشت که فرآیند شکافت که با یک نوترون آغاز می‌شود و دو یا سه نوترون ایجاد می‌کرد در صورت بروز شکافت‌های دیگری توسط این نوترون‌های جدید، بصورت زنجیره‌ای ادامه پیدا کند و بدین ترتیب انرژی زیادی آزاد شود.[۱]

۱-۲ راکتورهای هسته‌ای

راکتور هسته‌ای به دستگاهی اطلاق می‌شود که در آن واکنش زنجیره‌ای شکافت هسته‌ای کنترل شده، رخ می‌دهد که بسته به نوع مواد ساختمانی آن و انرژی نوترون‌هایی که باعث شکافت می‌شوند به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند (جدول شماره (۱-۱)). در یک چنین دستگاهی، نوترون‌ها باعث شکافت در هسته‌های سنگین می‌شوند. هسته سنگین به هسته سبکتر تجزیه می‌شود (پاره‌های شکافت) و مقداری انرژی آزاد می‌شود (در حدود $۲۰۰\,MeV$) و چند نوترون اضافی نیز تولید می‌شود .

---

[۱] Hahn
[۲] Strassman
[۳] Meitner
[۴] Frisch
[۵] Jolieo

این نوترون‌های جدید، خود می‌توانند باعث شکافت‌های دیگری شوند که این عمل باعث بوجود آمدن واکنش زنجیره‌ای می‌شود. راکتور باید شامل مقدار زیادی از ماده قابل شکافت (^{235}U ، ^{239}Pu ،...) باشد تا واکنش زنجیره‌ای بتواند پابرجا بماند. با این توصیف‌ها یک گوی کوچک از اورانیوم ۲۳۵ باشعاع در حدود ۸ سانتیمتر نیز می‌تواند یک راکتور هسته‌ای بشمار آید. اما در یک راکتور مدرن شرایط بسیار پیچیده‌تر است. چنین سیستمی نه تنها باید شامل شبکه سوخت‌های بسیاری که با دقت تمام ساخته و در کنار هم قرار گرفته‌اند باشد، بلکه باید دارای سیستمی برای خنک‌کردن راکتور در طول واکنش‌های زنجیره‌ای شکافت و آزاد شدن انرژی ناشی از آن باشد و برخی مکانیسم‌ها برای کنترل واکنش شکافت و حفاظت محیط اطراف از اشعه‌ها و محصولات خطرناک تولید شده درون راکتور در نظر گرفته شده باشد[۲].

جدول ۱-۱ : مواد راکتور قدرت

	آبی تحت فشار (PWR)	آبی جوشان (BWR)	اورانیم طبیعی آب سنگین (CANDU)	دمای بالای خنک‌کننده گازی (HTGR)	فلز مایع زاینده سریع (LMFRB)
شکل سوخت	UO_2	UO_2	UO_2	UC, ThC_2	PuO_2, UO_2
درصد غنی	^{235}U -۳٪	^{235}U -۲/۵٪	^{235}U -۰/۷٪	^{235}U -۹۳٪	^{239}Pu -۱۵٪wt.
کندکننده	آب	آب	آب سنگین	گرافیت	--------
خنک‌کننده	آب	آب	آب سنگین	گاز هلیم	سدیم مایع
غلاف سوخت	زیرکالوی	زیرکالوی	زیرکالوی	گرافیت	فولاد زنگ نزن
میله کنترل	میله B_4C یا $Ag-In-Cd$	میله صلبی B_4C	سطح کندکننده	میله B_4C	میله تانتالم یا B_4C
دیگ	فولاد	فولاد	فولاد	بتون پیش‌تنیده	فولاد

در چنین سیستمی چیدمان و جنس مواد میله‌های سوخت و کندکننده‌های اطراف آن و میله‌های کنترل باید طوری طراحی شوند که دقیقاً یکی از نوترون‌های تولیدشده در یک شکافت منجر به شکافت دوم و یکی از نوترون‌های این نسل منجر به شکافت سوم و الآخر شود، که این شرط لازم برای واکنش زنجیره‌ای پایدار و خودنگهدار است و می‌توان آنرا با ضریب تکثیر، k، که بصورت نسبت تعداد نوترون‌ها در یک نسل به تعداد نوترون‌های نسل پیش از آن، تعریف می‌شود، بیان کرد. وقتی این ضریب برابر یک باشد واکنش زنجیره‌ای دقیقاً برقرار است و گفته می‌شود راکتور بحرانی است. اگر این ضریب بزرگتر از یک باشد راکتور فوق‌بحرانی است که طی آن چگالی نوترون و آهنگ شکافت و انرژی حاصل از آن می‌تواند به راکتور آسیب برساند. اگر ضریب تکثیر کوچکتر از یک باشد راکتور در حالت زیربحرانی است و به‌تدریج خاموش می‌شود[۳].

هدف نظریه راکتور تحلیل فرآیندهای مختلف درون راکتور و محاسبه ضریب تکثیر برای یک اندازه ترکیب معینی از قلب راکتور است یا بالعکس. بررسی و آنالیز راکتورهای هسته‌ای مدرن، تنها از طریق کامپیوترهای قدرتمند و استفاده از روش‌های حل عددی برای تعیین توزیع جمعیت نوترون‌های آزاد در نقاط مختلف قلب راکتور امکان پذیر است. در راکتورهای تجاری یکی از ویژگی‌ها و مشخصه‌های مهم، توزیع جمعیت و شار نوترون در هر نقطه می‌باشد که برای تعیین اینکه آیا راکتور در توان ثابت کار می‌کند؟، واکنش زنجیره‌ای می‌تواند سریعاً خاموش شود؟ (مخصوصاً در هنگام بروز حادثه)، چگالی توان در هر منطقه از راکتور بیشتر از مقدار مجاز و میزان قابل تحمل میله‌های سوخت نباشد و اینکه آیا از تمام سوخت و در حداکثر راندمان از آن استفاده می‌شود یا نه؟ بکار می‌رود. محاسبات را می‌توان برای پیدا کردن اندازه یا ترکیب راکتور به ازای یک ضریب تکثیر معین انجام داد، که لازمه آن بررسی معادلات پخش نوترون درون سیستم راکتور و محاسبه شار و چگالی نوترون در هر نقطه از راکتور است[٤].

فصل دوم

نظریه راکتورهای هسته‌ای و معادلات پخش نوترون

مقدمه

برای بررسی عملکرد راکتورهای هسته‌ای و فرآیندهایی که در آن رخ می‌دهد باید ابتدا رفتار نوترون در برخورد با مواد مختلف موجود در راکتور را بطور کامل درنظر گرفت. در این فصل ابتدا خصوصیات نوترون و برهم‌کنش‌هایی از آن‌را که مورد توجه فیزیکدانان هسته‌ای است را مورد بررسی قرار خواهیم داد سپس به بررسی معادلات پخش نوترون به عنوان پایه توصیف راکتورهای هسته‌ای خواهیم پرداخت.

۲-۱ نوترون و چشمه‌های نوترونی

کشف نوترون در خلال سال‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۲ رخ داد، و در سال ۱۹۳۰ با کشف تابش پرنفوذی که از برهم‌کنش ذرات آلفا با عناصر سبکی همچون برلیوم بوجود آمد، به اوج خود رسید. در سال ۱۹۳۲ چادویک[1] اعلام

[1] Chadovic

کرد که اینها ذرات بدون باری هستند که جرمی تقریباً برابر جرم پروتون دارند. وی نام این ذرات را نوترون گذاشت[۵].

نوترون آزاد در طبیعت وجود ندارد و واکنش‌های هسته‌ای تنها چشمه‌های نوترونی هستند. عمر متوسط نوترون در طبیعت حدود ۱۲ دقیقه است ولی در راکتورهای هسته‌ای عمر آن همواره کسری از ثانیه است.

۲-۲ برهم‌کنش‌های نوترون با ماده

یک ویژگی روشن و مهم برهم‌کنش‌های نوترون- هسته آن است که، به‌علت بی‌بار بودن وقتی به هسته نزدیک می‌شود تحت تأثیر هیچ نیروی دافعه‌ای قرار نمی‌گیرد. در نتیجه نوترون می‌تواند با هر انرژی با هسته برهم-کنش کند.

۲-۲-۱ پراکندگی الاستیک

در این پدیده نوترون به هسته که در تراز پایه قرار دارد برخورد می‌کند و سپس از آن دور می‌شود و هسته در تراز عادی باقی می‌ماند. هر چند که نوترون گسیل شده الزاماً نوترون اولیه نیست. در این حالت گفته می‌شود که نوترون برخورد (پراکندگی) الاستیک انجام داده و آن‌را به اختصار با (n,n) نشان می‌دهند.

۲-۲-۲ پراکندگی غیرالاستیک

این عمل شبیه پراکندگی الاستیک می‌باشد با این تفاوت که هسته به حالت تحریک در می‌آید. چون پس از برخورد مقداری انرژی در هسته باقی می‌ماند، این برخورد انرژی‌گیر است. هسته تحریک شده با گسیل یک پرتو گاما به حالت پایه‌اش وامی‌پاشد. قانون بقای انرژی جنبشی برای پراکندگی غیرالاستیک برقرار نیست زیرا قسمی از انرژی جنبشی اولیه صرف تابش گاما می‌شود و انرژی جنبشی کل کمتر از چیزی است که در ابتدای واکنش بوده است. این واکنش معمولاً بین نوترون‌های با انرژی نسبتاً بالا و هسته‌های متوسط و سنگین رخ می‌دهد و آن‌را به-صورت (n,n') نشان می‌دهند.