

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

(گرایش هسته ای)

# بررسی فیزیک رآکتورهای ترکیبی شکافت - همجوشی با استفاده از کد محاسباتی MCNP

از:

سید مهدی تیموری سندسی

استاد راهنما:

دکتر عباس قاسمی زاد

شهریور ۹۲

تقدیم به مولا و صاحب عصر والزمان، حضرت بقیہ اللہ (ارواحنا فداہ)



اللهم عجل لولیک الفرج

و العافیہ والنصر

و اجعلنا من خیر اعوانہ و انصارہ

والمستشہدین بین یدیه

و تقدیم به:

چهار تن از رہبران بیداری قلب ها

از سلاله پاک رسول خدا (ص)

	سید علی حسینی خامنه ای	سید روح الله موسوی خمینی	
	سید حسن نصرالله	سید عباس موسوی	

## تشکر ویژه می کنم از:

پدر و مادر عزیزم که در تمام دوران تحصیل، چراغ راهم بودند

استاد عزیزم، دکتر عباس قاسمی زاد، که به واقع راهنمای من بودند

تمامی دوستانی که در این دو سال به من درس زندگی آموختند

و تمام کسانی که در این مدت، مرا یاری دادند



## فهرست مطالب

د.....	چکیده فارسی.....
ذ.....	چکیده انگلیسی.....
۱.....	مقدمه.....
۳.....	<b>فصل ۱ شکافت هسته ای و رآکتورهای شکافت.....</b>
۴.....	۱-۱- اصول فیزیکی فرآیند شکافت هسته ای.....
۵.....	۱-۱-۱- مواد شکافتنی.....
۵.....	۱-۱-۲- شکافت $^{235}U$ .....
۵.....	۱-۱-۳- انرژی شکافت.....
۷.....	۲-۱- رآکتور هسته ای.....
۸.....	۳-۱- ساختار رآکتور و پوشش ایمنی.....
۹.....	۳-۱-۱- جایگاه رآکتور.....
۱۱.....	۳-۱-۱-۱- مجموعه های سوخت.....
۱۲.....	۳-۱-۲- کند کننده ها.....
۱۳.....	- مشخصات یک کند کننده خوب.....
۱۳.....	۳-۱-۳-۱- میله های کنترل.....
۱۵.....	۳-۱-۴-۱- خنک کننده ها.....
۱۵.....	- خواص ایده آل برای یک خنک کننده.....
۱۶.....	۳-۲-۱- سیستم اولیه خنک کننده رآکتور.....
۱۷.....	۳-۲-۱-۱- پمپ های اصلی خنک کننده.....
۱۷.....	۳-۲-۲- مولدهای بخار.....
۱۹.....	۳-۲-۳-۱- فشارنده و سیستم انبساط.....
۲۱.....	۳-۲-۴-۱- لوله های اصلی مدار اولیه.....
۲۱.....	۳-۲-۵-۱- عایق بندی تجهیزات مدار اولیه.....
۲۲.....	۳-۳-۱- سیستم های امدادی رآکتور.....
۲۲.....	۳-۳-۱-۱- سیستم کنترل حجم و کیفیت شیمیایی آب (RCV).....
۲۲.....	۳-۳-۲- سیستم تغذیه آب و بورون (REA).....
۲۳.....	۳-۳-۳-۱- سیستم خنک کننده رآکتور پس از خاموشی (RRA).....
۲۳.....	۳-۳-۴-۱- سیستم جابجایی و ذخیره سازی سوخت (PMC).....
۲۴.....	۳-۴-۱- سیستم های ایمنی رآکتور.....
۲۵.....	۳-۴-۱-۱- سیستم تزریق آب در حالت اضطراری (RIS).....
۲۶.....	۳-۴-۲- سیستم پخش آب از سقف ساختمان پوشش رآکتور (EAS).....
۲۷.....	۳-۴-۳- سیستم تغذیه آب امدادی (ASG).....
۲۸.....	۳-۴-۴- سیستم جداسازی ساختمان پوشش رآکتور (EIE).....

۲۹	فصل ۲ همجوشی هسته ای
۳۰	۱-۲- همجوشی هسته ای
۳۱	۲-۲- شرایط وقوع فرآیند همجوشی هسته ای
۳۲	۱-۲-۲- محصور سازی
۳۲	۲-۲-۲- رسیدن به دمای بالا
۳۳	۳-۲- انواع واکنش های همجوشی هسته ای
۳۳	۱-۳-۲- همجوشی از طریق محصورسازی لختی
۳۵	۲-۳-۲- همجوشی از طریق محصورشدگی مغناطیسی
۳۶	۳-۳-۲- همجوشی از طریق کاتالیزور میونی
۳۷	۴-۲- رآکتورهای همجوشی هسته ای
۳۸	۱-۴-۲- رآکتور همجوشی پایا
۳۸	۲-۴-۲- رآکتور تپی
۳۸	۳-۴-۲- رآکتور شبه پایا
۳۸	۵-۲- قسمت های اصلی یک رآکتور همجوشی هسته ای از نوع ICF
۳۹	۱-۵-۲- قلب
۳۹	۲-۵-۲- ساچمه سوخت
۳۹	۳-۵-۲- دیواره اولیه
۴۰	۴-۵-۲- پوشش
۴۱	فصل ۳ شبیه سازی با کد MCNPX 2.6.0
۴۲	۱-۳- ساختار فایل ورودی
۴۳	۲-۳- تعریف هندسه (سطح و سلول)
۴۴	۱-۲-۳- سطوح ماکروبادی
۴۶	۳-۳- تعریف چشمه
۴۷	۴-۳- تعریف ماده
۴۷	۱-۴-۳- تعریف یک ماده معمولی
۴۸	۵-۳- داده های ضروری
۴۸	۱-۵-۳- کارت MODE
۴۸	۲-۵-۳- کارت IMP
۴۹	۳-۵-۳- کارت NPS
۴۹	۶-۳- رسم گرافیکی با VISUAL EDITOR
۵۰	۱-۶-۳- پنجره ورودی

۵۱	۳-۶-۲- رسم سه بعدی .....
۵۱	۳-۷- انواع مختلف خروجی ها.....
۵۱	۳-۷-۱- تالی .....
۵۲	۳-۷-۲- BURNUP .....
۵۲	۳-۷-۳- KCODE .....
۵۳	۳-۷-۴- تالی های پیشرفته.....
<b>۵۶</b>	<b>فصل ۴ اصول فیزیکی سیستم های هیبرید شکافت - همجوشی.....</b>
۵۷	۴-۱- اصول فیزیکی سیستم های هیبرید شکافت - همجوشی.....
۶۰	۴-۲- معیار لاوسون.....
۶۲	۴-۳- تکثیر انرژی.....
۶۵	۴-۴- جریان توان سیستم هیبرید.....
۶۶	۴-۵- توازن انرژی.....
<b>۶۹</b>	<b>فصل ۵ شبیه سازی رآکتور هیبرید شکافت- همجوشی با استفاده از کد محاسباتی MCNPX 2.6.0.....</b>
۷۰	۵-۱- طراحی رآکتور.....
۷۱	۵-۱-۱- ساختمان فیزیکی .....
۷۱	۵-۱-۱-۱- اتاقک همجوشی.....
۷۲	۵-۱-۱-۲- جداره آغازین.....
۷۲	۵-۱-۱-۳- اتاقک شکافت.....
۷۳	۵-۱-۱-۴- کند کننده.....
۷۴	۵-۱-۱-۵- زایش تریتیوم.....
۷۴	۵-۱-۱-۶- جبران کاهش نوترون.....
۷۴	۵-۱-۲- مواد مورد استفاده در لایه های مختلف.....
۷۴	۵-۱-۲-۱- جداره آغازین.....
۷۵	۵-۱-۲-۲- کند کننده (خنک کننده).....
۷۵	۵-۱-۲-۳- اتاقک شکافت.....
۷۶	۵-۱-۲-۴- زایش تریتیوم.....
۷۷	۵-۱-۲-۵- جبران کاهش نوترون.....
۷۷	۵-۲- شرح کار.....
۷۷	۵-۳- اجرای برنامه.....
۷۸	۵-۴- تولید تریتیوم.....
۷۸	۵-۵- تولید انرژی.....
۷۹	۵-۵-۱- انرژی ناشی از شکافت.....

۷۹	۵-۵-۲- انرژی ناشی از واکنش های دیگر
۷۹	۵-۶- جمع بندی نتایج
۷۹	۵-۶-۱- زایش تریتیوم
۸۰	۵-۶-۱- انرژی ناشی از شکافت
۸۰	۵-۶-۲- انرژی ناشی از دیگر واکنش ها
<b>۸۱</b>	<b>فصل ۶ بحث، نتیجه گیری و پیشنهاد ها</b>
۸۲	۶-۱- بحث و نتیجه گیری
۸۲	۶-۱-۱- زایش تریتیوم
۸۲	۶-۱-۲- انرژی ناشی از شکافت
۸۲	۶-۱-۳- انرژی واکنش های دیگر
۸۳	۶-۲- نتیجه نهایی
۸۳	۶-۳- پیشنهادهایی برای ادامه کار
۸۵	<b>مراجع</b>
۸۹	پیوست-أ اعداد به دست آمده
۱۱۳	پیوست-ب مقالات منتشر شده

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱: حالت های فروپاشی  $^{236}\text{U}$  ..... ۴
- شکل ۱-۲: نمایی از محفظه فشار یک رآکتور هسته ای نوعی ..... ۹
- شکل ۱-۳: اجزای خارجی قلب یک رآکتور هسته ای ..... ۱۵
- شکل ۱-۴: نمایی از یک مولد بخار ..... ۱۹
- شکل ۱-۵: نمایی از یک فشارنده ..... ۲۰
- شکل ۱-۲: تحت تابش قرار گرفتن ساچمه سوخت توسط باریکه لیزری یا یونی ..... ۳۴
- شکل ۲-۲: تشکیل هاله در اطراف ساچمه سوخت به علت یونش موضعی ..... ۳۴
- شکل ۲-۳: ایجاد موج فشار و بوجود آمدن شرایط فشرده سازی سوخت ..... ۳۵
- شکل ۲-۴: انجام فرآیند همجوشی هسته ای و متلاشی شدن ساچمه سوخت ..... ۳۵
- شکل ۲-۵: ساختمان رآکتور قدرت همجوشی ..... ۳۹
- شکل ۳-۱: بشکه استوانه ای با ضخامت یک سانتی متر ..... ۴۵
- شکل ۲-۳: پنجره Input ..... ۵۰
- شکل ۱-۴: نمودار سطح مقطع های تکثیر نوترون حاصل از همجوشی دوتریم - تریتیوم ..... ۵۸
- شکل ۲-۴: طرح نمایشی پوشش های مختلف رآکتور هیبرید ..... ۵۹
- شکل ۳-۴: جریان انرژی در یک سیستم همجوشی هسته ای ..... ۶۰
- شکل ۴-۴: باندهای معیار لاوسون برای همجوشی  $d-d$  و  $d-t$  ..... ۶۲
- شکل ۵-۴: نمودار ضریب تکثیر انرژی یک رآکتور هیبرید از نوع دوتریم - تریتیوم بر حسب نسبت تبدیل شکافت و به ازای  $C_b$  های متفاوت ..... ۶۴
- شکل ۶-۴: نمودار جریان سوخت و توان در سیستم هیبرید شکافت - همجوشی ..... ۶۵
- شکل ۷-۴: جریان انرژی یک سیستم همجوشی محصورسازی لختی ..... ۶۷
- شکل ۱-۵: طراحی رآکتور هیبرید با استفاده از MCNPX VISUAL EDITOR ..... ۷۱
- شکل ۲-۵: نمایی از سوخت ..... ۷۲
- شکل ۳-۵: سوخت، غلاف و کند کننده در داخل استوانه های شش وجهی ..... ۷۳

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: انرژی گسیل شده و انرژی قابل بازیافت در شکافت هسته U-235 ..... ۷
- جدول ۱-۳: بعضی از سطوح قابل تعریف در کد mcnp ..... ۴۴
- جدول ۲-۳: سطوح ماکروبادی ..... ۴۴
- جدول ۳-۳: پارامترهای قابل تعریف چشمه ..... ۴۶
- جدول ۴-۳: توزیع های مختلف قابل تعریف برای چشمه ..... ۴۷
- جدول ۵-۳: انواع تالی ..... ۵۱
- جدول ۶-۳: تالی های پیشرفته ۱ ..... ۵۴
- جدول ۷-۳: تالی های پیشرفته ۲ ..... ۵۵
- جدول ۱-۶: مقادیر حاصل برای زایش تریتیوم بر حسب  $\frac{\#}{Cm^2}$  ..... ۷۹
- جدول ۲-۶: مقادیر حاصل از انرژی شکافت بر حسب  $10^{-2} \frac{MeV}{gr}$  ..... ۸۰
- جدول ۳-۶: مقادیر انرژی دیگر واکنش ها بر حسب  $10^{-2} MeV$  ..... ۸۰

## بررسی فیزیک رآکتورهای ترکیبی شکافت-همجوشی با استفاده از کد محاسباتی MCNP

سید مهدی تیموری سندسی

### چکیده

تولید انرژی به روش همجوشی هسته ای، به دلیل بهره انرژی ضعیفی که تولید می کند، صرفه اقتصادی ندارد. در نتیجه رسیدن به همجوشی پایدار، مستمر و اقتصادی، نیاز به محرکی برای جبران کاستی ها و برآوردن معیار لائوسون، دارد؛ نیز همجوشی مستمر نیاز به تولید تریتیوم، به عنوان سوخت همجوشی، به صورت خودکفا دارد. این مهم، دانشمندان را به فکر ترکیب شکافت با گداخت برای جبران این موضوع انداخت. با استفاده از نوترون های پر انرژی ناشی از همجوشی، می توان هم سوخت شکافای اورانیوم یا پولوتونیوم تولید کرد و هم با استفاده از ایزوتوپ های مختلف لیتیوم، تریتیوم مورد نیاز را به وجود آورد. کاربرد دیگری که برای این تکنولوژی پیشنهاد گردیده، از بین بردن پسمان های هسته ای ناشی از شکافت و تبدیل آنها به عناصری با سمیت پایین تر می باشد، که می تواند موضوع پژوهش های دیگر قرار گیرد.

در این پایان نامه، کند کننده های مختلف آب سبک، آب سنگین، برلیوم و اکسید برلیوم را در حضور زاینده های مختلف تریتیوم، لیتیوم طبیعی، اکسید لیتیوم، لیتیوم-6 و لیتیوم-7 برای سه فاکتور مهم تولید تریتیوم، تولید انرژی شکافت و تولید انرژی ناشی از دیگر واکنش ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین این نتایج بدون حضور کند کننده نیز مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، برای زایش تریتیوم و انرژی ناشی از واکنش های غیر از شکافت، بهترین عملکرد را لیتیوم-6 دارد و بیشترین مقدار نیز زمانی به دست آمد که لیتیوم-6 بدون حضور خنک کننده بررسی گردید. گزینه دوم بیشترین کارایی برای لیتیوم-7 ثبت شد. در مورد انرژی ناشی از شکافت اگرچه نتایج به یکدیگر نزدیک می باشد لیکن، آب سبک در حضور لیتیوم طبیعی، اکسید لیتیوم و لیتیوم-7 بهترین کارایی و مقدار انرژی را از خود نشان دادند.

کلیدواژه: لیتیوم-6، تریتیوم، رآکتور هیبرید، کد MCNPX 2.6.0

## **Investigation of Physics of Hybrid Fission-Fusion Reactors Using MCNP Calculating Code**

Seyyed Mahdi Teymoori sendesi

### **Abstract**

Energy Production with Nuclear Fusion isn't economical as its poor energy gain. So, achievement of a stable, continuous and economic fusion, needs to a driver for restitution of leakages and complying Lawson's scale; besides, continuous and economic fusion needs to self-sufficient tritium breeding as fusion fuel. This importance, bemused scientists to combine fission and fusion, to solve that. We can either produce uranium and plutonium fissile fuels, or breed demanded tritium with different lithium isotopes, using energetic neutrons produced by fusion. Another suggested application for this technology, is annihilation of nuclear fission wastes and deformation of them to less radio toxicity, - as it can be investigated later-.

In this thesis, different moderators, light water, heavy water, beryllium and beryllium oxide, were investigated in presence of different tritium breeders, Lithium-6, Lithium-7, natural lithium and lithium oxide, for three important factors, tritium breeding, released energy from fission and released energy from other reactions except fission. Also, these results were investigated without any moderators. According to results, for tritium breeding and produced energy of other reactions except fission, Lithium-6 showed the best efficiency and the maximum amount achieved when lithium-6 was investigated without any moderators. The second selection for the most efficiency was written for lithium-7. For produced fission energy, light water in presence of natural lithium, lithium oxide and lithium-7 showed the best efficiency, although, the results were approximately the same.

Keywords: lithium-6, tritium, hybrid reactor, MCNPX 2.6.0 code

## مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و نیاز شدید به منابع انرژی، بشریت را به فکر استفاده از منابع دیگر انرژی غیر از سوخت های فسیلی انداخت. انرژی هایی که علاوه بر تجدیدپذیر بودن، پاک نیز باشند و با انتشار مواد آلاینده، محیط پیرامون را آلوده نکنند.

اگرچه آب و باد و خورشید، هریک در نوع خود منابع مفیدی برای تأمین انرژی بشر هستند، اما مقدار پایین انرژی حاصل شده از آنها، عملاً راه را برای رسیدن به بازده اقتصادی مثبت دشوار می کند. از این رو استفاده از انرژی هسته ای که در سال ۱۹۳۸، با کشف شکافت هسته ای توسط هان و استراسمن آغاز گردید و از حدود ۵۰ سال پیش، با استفاده از نیروگاه های قدرت تولید برق هسته ای به صورت صنعتی و اقتصادی ادامه پیدا کرد، نمود بیشتری یافت.

شکافت هسته ای نیز اگرچه از لحاظ میزان انرژی تولید شده و نیز آلودگی های ناشی از انجام واکنش، مزایای چشمگیری نسبت به سوخت های فسیلی داشت، اما مشکلات ناشی از غنی سازی و تهیه سوخت های شکافت پذیر و نیز موارد مربوط به ایمنی هسته ای از جمله پسمانداری هسته ای و حفاظت در برابر اشعه، معضلاتی بزرگ در استفاده از این کشف شگرف و بودند.

ایده گداخت هسته ای که از سال ۱۹۳۸ - و همزمان با کشف شکافت هسته ای - توسط بته، مطرح گردید، می توانست جایگزین مناسبی برای شکافت هسته ای باشد زیرا علاوه بر فراوانی سوخت دوتریوم به عنوان سوخت گداخت هسته ای، فرآورده های ناشی از گداخت، سمیت و خطر کمتری داشته و پسمان های کمتری بر جا می گذارند. اما انرژی نسبتاً اندک ناشی از واکنش های گداخت و وجود محدودیتی به نام معیار لاوسون، رسیدن به همجوشی اقتصادی و پایدار را تا حدی دور از تصور کرده است.

از این رو دانشمندان بر آن شدند تا با ترکیب واکنش غنی انرژی شکافت با گداخت، علاوه بر برآوردن معیار لاوسون، به بازده اقتصادی مثبت دست یابند. این ایده، اساس طراحی رآکتور ترکیبی شکافت-همجوشی بود.

در این پایان نامه، پس از معرفی واکنش های شکافت و همجوشی و نیز نیروگاه ها و رآکتورهای شکافت و همجوشی در فصل ۱ و ۲، در فصل ۴ اصول فیزیکی رآکتور هیبرید را شرح دادیم و با استفاده از نسخه ۲.۶.۰ کد محاسباتی شبیه ساز MCNPX، این رآکتور را طراحی کرده و پس از اجرای برنامه، داده های مورد نیاز را بدست آوردیم تا در فصل ۶ این داده ها را ارزیابی نماییم. روش کد نویسی و شبیه سازی با استفاده از این کد، در فصل ۳ آمده است.

با توجه به داده های به دست آمده، برای موارد مختلف استفاده از این رآکتور، هرکدام از مواد مختلف بریلیم، آب سبک، لیتیوم-۶ و لیتیوم-۷ در نوع خود و برای کارآیی خاص، مناسب بودند که شرح این موارد به تفصیل در فصل ۵ و ۶ آمده است.

فصل ۱

شکافت هسته‌ای

و

راکتورهای شکافت

پدیده شکافت هسته ای، نخستین بار در سال ۱۹۳۸ میلادی توسط اتوهان و استراسمن کشف گردید. در این پدیده، برخلاف پرتوزایی طبیعی که ذرات ریزتر از اتم، از هسته منتشر می گردد، برای اولین بار شکستن هسته اتم میسر گردید و همراه ایجاد دو هسته جدید، مقدار زیادی انرژی آزاد شد. متأسفانه این انرژی در ساخت بمب هسته ای به کار گرفته شد و در ششم آگوست سال ۱۹۴۵ میلادی منجر به انفجار نخستین بمب هسته ای در هیروشیما ژاپن گردید. گذشته از این کاربرد فاجعه آمیز، کاربرد گسترده صلح آمیز برای انرژی اتمی، یک حقیقت است که شامل تولید نیروی برق در مقیاس صنعتی و تولید تعداد زیادی رادیوایزوتوپ برای استفاده در تحقیقات بنیادی، پزشکی، کشاورزی صنعت می باشد.

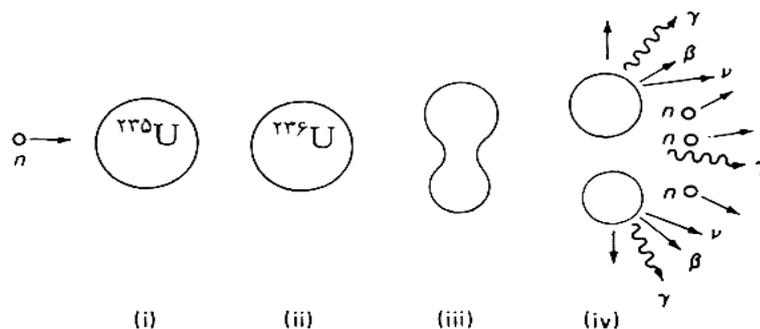
مبدأ کشف انرژی هسته ای را باید در برهم کنش نوترون، (پس از کشف آن توسط جیمز چادویک در سال ۱۹۳۲) با اورانیوم، یعنی سنگین ترین عنصر موجود در طبیعت جستجو کرد.

این کشف، مجموعه ای از نتایج کاری سه گروه بود:

- انریکو فرمی در ایتالیا
- ژولیوت و ماری کوری و نیز سویچ در فرانسه
- اتوهان و استراسمن در آلمان

### ۱-۱- اصول فیزیکی فرآیند شکافت هسته ای

بلافاصله بعد از اعلام شکافت به وسیله هان و استراسمن، لایز میتنر و فریش، یک تئوری بر اساس تغییر شکل هسته برانگیخته به دنبال جذب نوترون ارائه نمودند که در آن هسته برانگیخته در جهت فائق آمدن بر نیروی انرژی سطح - از طریق آنچه در شکل (۱-۱) نشان داده شده است - شکافت حاصل نموده و به دو پاره با جرم های قابل مقایسه تقسیم می گردد. همچنین برخی از هسته های برانگیخته به دنبال تجزیه  $\alpha$  فروپاشی حاصل میکنند. [۱]



شکل ۱-۱: حالت های فروپاشی  $^{235}\text{U}$  [۲]

### ۱-۱-۱- مواد شکافتنی

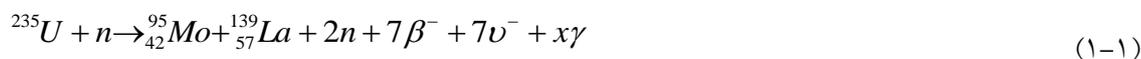
مواد ناپایدار برای اینکه به پایداری برسند، انرژی گسیل می‌کنند تا به حالت پایدار برسند. معمولا عناصری شکافت پذیر هستند که جرم اتمی آنها بالای ۱۵۰ باشد، مانند  $^{235}U$  و  $^{238}U$  که در معادن خاصی یافت می‌شود. ۹۹/۳ درصد اورانیوم معادن  $^{238}U$  می‌باشد و تنها ۰/۷٪ آن  $^{235}U$  می‌باشد. از طرفی  $^{235}U$  با نوترونهای کند واکنش نشان می‌دهد، در صورتی که  $^{238}U$  تنها با نوترونهای تند کار می‌کند، بنابر این در نیروگاههای هسته‌ای حرارتی،  $^{235}U$  به عنوان سوخت عمده محسوب می‌شود. در نتیجه به دلیل اینکه در طبیعت کم یافت می‌شود. باید این اورانیوم غنی شود، یعنی اینکه درصد آن از ۰/۷ درصد به ۱ الی ۳ درصد و بالاتر رسانیده شود.

### ۱-۱-۲- شکافت $^{235}U$

در این واکنش هسته‌ای وقتی نوترون کند بر روی  $^{235}U$  برخورد می‌کند به  $^{236}U$  تحریک شده تبدیل می‌شود. نهایتا تبدیل به باریوم و کریبتون و ۳ نوترون سریع و  $177 \text{ MeV}$  انرژی آزاد می‌شود. یعنی در واکنش اخیر به ازای هر نوکلئون حدود یک مگاالکترون ولت انرژی آزاد می‌شود. در صورتی که در واکنشهای شیمیایی مثل انفجار به ازای هر مولکول حدود  $30 \text{ MeV}$  انرژی ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است در رآکتورهای هسته‌ای که با نوترون کار می‌کند، طبق واکنشهای به عمل آمده ۲ الی ۳ نوترون سریع تولید می‌شود. این نوترونهای سریع، با توجه به سطح مقطع شکافت  $^{235}U$ ، حتما باید کند شوند. [۳]

### ۱-۱-۳- انرژی شکافت

مانند تمامی واپاشی‌های پرتوزا، پدیده شکافت هسته‌ای نیز همراه با یک کاهش جرم آزاد شده مقدار معادل آن انرژی می‌باشد. مقدار کاهش جرم در شکافت هسته‌ای تقریبا برابر  $0.2 \text{ amu}$  (واحد جرم اتمی) است که یکصد برابر بزرگتر از کاهش جرم در کلیه انواع دیگر تجزیه‌های رادیواکتیو است. این مقدار فوق‌العاده حاصل از انرژی شکافت، این فرآیند را از نقطه نظر تولید انرژی هسته‌ای برای مقاصد علمی مورد توجه خاص قرار می‌دهد. چنانچه بخواهیم این انرژی را برای شکافت هسته  $^{235}U$ ، توسط نوترون‌های حرارتی به پاره‌های با اعداد جرمی ۹۵ و ۱۳۹، که بهره شکافت نسبتا بالاست بررسی نماییم، با نشان دادن واکنش دهنده‌های اولیه و محصولات نهایی و جرم‌های آنها خواهیم داشت:



انرژی اولیه واکنش فوق  $u$   $236/0.526$  و انرژی ثانویه آن  $u$   $235/8.292$  می باشد. لذا کاهش انرژی،  $u$   $0.2234$  می باشد. با توجه به اینکه هر  $u$  معادل  $931\text{MeV}$  است، انرژی شکافت برابر خواهد بود با:

$$E_f = 931u \approx 200\text{MeV} \quad (2-1)$$

از یک بررسی جداگانه نیز به همین مقدار برای انرژی شکافت می رسیم. انرژی بستگی میانگین برای عناصر سنگین قابل شکافت مانند اورانیوم و پلوتونیوم ( $A > 200$ )، در حدود  $7/5 \text{ MeV}$  بر نوکلئون است، در حالی که این مقدار برای محصولات شکافت با جرم متوسط ( $A \approx 100-150$ ) تقریباً برابر  $8/4 \text{ MeV}$  بر نوکلئون می باشد. این بدان معنی است که یک هسته با انرژی بستگی  $7/5 \text{ MeV}$  بر نوکلئون به وسیله شکافت به دو هسته با انرژی بستگی  $8/4 \text{ MeV}$  بر نوکلئون تغییر می کند. در نتیجه، افزایش خالص در انرژی بستگی به موجب کاهش جرم، که انرژی شکافت است، تقریباً برابر  $0.9 \text{ MeV}$  بر نوکلئون می باشد و با توجه به انتشار  $2-3$  نوترون بر شکافت، انرژی شکافت به  $210 \text{ MeV} \approx 233 \times 0.9$  می رسد، مقداری که تقریباً هم اندازه با مقدار قبلی است. در اندازه گیری های کالری متریک دقیق نیز، از کل انرژی شکافت  $^{235}\text{U}$ ، مقداری از  $5 \pm 175$  تا  $5 \pm 190 \text{ MeV}$  به دست آمده است. با یادآوری اینکه انرژی حمل شده توسط نوترینوهای همراه با بتاها از کالریمتر فرار میکنند، تطابق با تئوری در حقیقت خیلی خوب بوده است. مقدار انرژی شکافت  $^{233}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  نیز حدود  $200 \text{ MeV}$  محاسبه گردیده است. انرژی کل معادل  $200 \text{ MeV}$ ، بین محصولات شکافت، کم و بیش به صورت جدول 1-1 توزیع شده است:

جدول ۱-۱: انرژی گسیل شده و انرژی قابل بازیافت در شکافت هسته U-235 [۲]

انرژی گسیل شده (MeV)	انرژی قابل بازیافت (MeV)	
۱۶۸	۱۶۸	محصولات شکافت
۵	۵	نوترون های شکافت
۷	۷	تابش گامای آبی
-	-	واپاشی محصولات شکافت
۸	۸	تابش $\beta$
۷	۷	تابش $\gamma$
۰	۱۲	نوترینوها
~۵	۰	گیراندازی تابش گاما
~۲۰۰	۲۰۷	جمع

با توجه به اینکه انرژی آزاد شده حتی در قوی ترین واکنش های شیمیایی کمتر از  $20 \text{ eV}$  بر اتم یا مولکول واکنش دهنده است، مقدار بسیار بالای انرژی شکافت در حدود ۲۰۰ میلیون الکترون ولت بر هسته شکافته بوده و بر این اساس کاربردهای امکان پذیر آن را می توان تخمین زد .

### ۱-۲- رآکتور هسته ای

دستگاهی که در آن واکنش هسته ای کنترل شده و خودنگهدار شکافت زنجیره ای نوترون رخ می دهد، رآکتور هسته ای نامیده می شود. بر حسب نوع مواد ساختمانی آن و انرژی نوترون هایی که باعث شکافت می شوند، رآکتورها به انواع مختلفی تقسیم می شوند. بعضی از آن ها عبارتند از:

- ۱- رآکتور های آب سبک تحت فشار (PWR)
- ۲- رآکتور های آب سبک جوشان (BWR)
- ۳- رآکتور های خنک شونده با گاز (GCR)

۴- رآکتور های خنک شونده با آب سبک و کند کننده گرافیکی (LWGR and RBMK)

۵- رآکتور های آب سنگین تحت فشار (CANDU)

۶- رآکتور های زاینده سریع با فلز مایع (LMFBR/FBR)

۷- رآکتور های خنک شونده با مواد آلی [۴]

در ذیل ساختار یک نیروگاه شکافت هسته ای ، با استفاده از رآکتور آب تحت فشار، مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۳-۱- ساختار رآکتور و پوشش ایمنی

رآکتور آب تحت فشار و تجهیزات مدارهای اولیه و همچنین سیستم های امدادی و اضطراری در داخل ساختمان قرار می گیرند که با دیواره ها و ساختارهای بتنی، محل استقرار این تجهیزات را از یکدیگر جدا می سازد. این ساختمان که ساختمان رآکتور نامیده می شود به وسیله پوشش ایمنی احاطه شده، دیگ فشار رآکتور در مرکز این ساختمان و در یک فضای استوانه ای شکل که به آن محفظه رآکتور<sup>۱</sup> می گویند مستقر می باشد. ساختمان های سوخت و توربین- ژنراتور در اطراف ساختمان رآکتور قرار دارند. پوشش ایمنی به شکل یک استوانه با دیوار، سقف و کف به صورت یک ساختار مستقل و خوداتکا از بتن پیش فشرده ساخته می شود. هم چنین یک لایه فولادی داخل پوشش ایمنی را می پوشاند.

محاسبه ی ابعاد و استقامت پوشش ایمنی براساس عوامل زیر انجام گرفته است:

- وزن پوشش و تجهیزاتی که به آن تکیه دارند
- بارهای طبیعی مثل برف ، باد ، طوفان و شتاب زلزله
- بارهای تصادفی مثل سقوط هواپیما ، رها شدن و پرتاب شدن قطعات فلزی داخل پوشش
- بارهای ایجاد شده در اثر آزمایش های نفوذناپذیری پوشش که هر چند گاه انجام می گیرد.

---

<sup>۱</sup> Reactor cavity