

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران مرکزی
دانشکده فیزیک، گروه فیزیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)
گرایش: فیزیک هسته ای

عنوان:

اندازه‌گیری توزیع فلاکس محوری در راکتور زیربحرانی آب سبک
اصفهان و مقایسه با نتایج محاسبات توسط کد MCNP

استاد راهنما:

دکتر جمشید خورسندی

استاد مشاور:

دکتر بهزاد تیموری

پژوهشگر:

شیوا شیروانی

تابستان ۱۳۹۰



ISLAMIC AZAD UNIVERSITY

Central Tehran Branch

Faculty of Physics – Department of Basic science

"M.Sc" Thesis

On nuclear physics

Subject:

**Measurement of Axial Flux Distribution in the Isfahan Light
Water Subcritical Reactor and Comparison with Calculation
Results using MCNP Code**

Thesis Advisor:

Jamshid Khorsandi

Consulting – Advisor:

Behzad Teymouri

By:

Shiva Shirvani

Summer ۲۰۱۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که گام به گام مراحل زندگی ام تلالو زیبای محبت های آن هاست.

تقدیم به

آنان که در کنارم نیستند ولی حس بودنشان شعله های امید را در دل من روشن نگاه داشت.

تقدیم به

خردمندان ، آنان که در این راه رفتند؛ آنان که در راه اند و آنان که خواهند آمد تا قدم بر این مسیر گذارند.

تقدیر و تشکر از:

در ابتدای کلام خدا را حمد و سپاس گویم که در قلم این بی بضاعت توانی آفرید تا آنچه را که در محضر استادانم آموختم به رشته تحریر درآورم.

قدر استاد نکو دانستن حیف استاد به من یاد نداد

استاد جوانبخت پیرخرد

چون دیگران زدل نروی چون روی ز چشم کاندر میان جانی و از دیده در مجیب

تابش آفتاب پاک وجودت چه سنگ‌ها که لعل و بارش باران دانشت چه صدف‌ها که از دُر پر نساخت این کمترین که افتخار دانشجویی از محضر شریف‌ت را گران‌بهارترین گوهر زندگی اش می‌داند، چشم مهرافشان و زبان شکر افشانت چگونه پاس دارد. استادی را که با شیرهی جان خویش نهال‌های مردمان پرورده تا میوهی فرهنگ برآورند چگونه باید سپاس گفت؟ اکنون که در مسیر پر افتخار علم و دانش در فرصت ذی قیمت زندگی توانستم با بهره‌مندی از همت والا و استفاده از اندیشه‌های عالی و انسانی استادان ارجمند جناب آقای دکتر جمشید خرسندی، جناب آقای دکتر بهزاد تیموری، جناب آقای دکتر محسن رضایی زاده، جناب آقای دکتر علی اکبر میرزایی و جناب آقای دکتر پژمان شیرمردی به موفقیتی هرچند ناچیز در دریای بی‌کران علم دست یابم بر خود لازم می‌دانم به رسم قدرشناسی از تلاش بی‌شائبه آن اساتید فرهیخته صمیمانه تقدیر و تشکر، سلامتی و موفقیت روز افزون ایشان را با تمام وجود از ایزد منان خواستار گردم.

پیشگاهتان قرین آفرین باد. دادار دادگر؛ نیکبختی تان پایدار، تندرستی تان ماندگار و پرتو افشانی تان جاویدان بداراد.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: انواع راکتورها و راکتور زیربحرانی

۲	(۱-۱) مقدمه
۳	(۲-۱) طبقه‌بندی انواع راکتورها
۴	(۳-۱) خواص کند کننده‌ها
۴	(۴-۱) خواص خنک کننده‌ها
۵	(۵-۱) خواص هسته‌ای مواد سوخت
۵	(۶-۱) طبقه بندی راکتورهای زیربحرانی
۶	(۷-۱) رفتار زمانی راکتور بی‌نهایت
۸	(۸-۱) چشمه‌ی نوترون
۸	(۱-۸-۱) برخی از چشمه‌های ثابت در راکتور زیربحرانی
۹	(۱-۱-۸-۱) چشمه‌ی امرسیوم - برلیوم
۹	(۲-۱-۸-۱) چشمه‌ی پلوتونیوم - برلیوم
۱۰	(۳-۱-۸-۱) چشمه‌ی پلونیوم - برلیوم
۱۰	(۴-۱-۸-۱) چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیوم ۲۵۲
۱۱	(۲-۸-۱) چشمه پالسی در راکتور زیربحرانی
۱۱	(۹-۱) کاربرد راکتورهای زیربحرانی

فصل دوم: راکتور زیربحرانی آب سبک LWSCR اصفهان

۱۴	(۱-۲) مقدمه
۱۷	(۲-۲) مشخصات فنی راکتور زیر بحرانی اصفهان
۱۷	(۱-۲-۲) تانک راکتور
۱۷	(۲-۲-۲) میله‌ی سوخت
۱۹	(۳-۲-۲) کپسول سوخت
۲۱	(۴-۲-۲) شبکه‌ی نگهدارنده‌ی میله‌های سوخت
۲۱	(۵-۲-۲) کند کننده
۲۱	(۶-۲-۲) بازتابنده‌ها
۲۲	(۷-۲-۲) چشمه‌ی کالیفرنیوم ۲۵۲

فصل سوم: معرفی روش‌های تعیین شار در راکتور

۲۴	(۱-۳) مقدمه
۲۴	(۲-۳) شبیه‌سازی مونت کارلو و نوشتن برنامه با کد MCNP
۲۴	(۱-۲-۳) روش مونت کارلو
۲۵	(۲-۲-۳) کد محاسباتی MCNP
۲۶	(۳-۲-۳) کمیت‌ها و واحدهای اصلی در MCNP

۲۶	..... فایل ورودی MCNP (۴-۲-۳)
۲۷	..... کارت عنوان (۵-۲-۳)
۲۷	..... بدنه اصلی برنامه در کد MCNP (۶-۲-۳)
۲۸	..... کارت سلول (۷-۲-۳)
۲۹	..... سطوح در MCNP (۸-۲-۳)
۲۹	..... (۱-۸-۲-۳) سطوحی که به وسیله معادلاتشان مشخص می‌شوند
۳۲	..... کارت داده‌ها (۹-۲-۳)
۳۲	..... (۱-۹-۲-۳) دستورات معرفی نوع مسأله
۳۲	..... (۲-۹-۲-۳) معرفی مواد
۳۴	..... (۳-۹-۲-۳) دستورات ساختمان‌های تکرار شونده و شبکه
۳۶	..... (۴-۹-۲-۳) مشخصات چشمه
۴۱	..... (۵-۹-۲-۳) دستور حسابگر (TALLY) یا (Fn)
۴۳	..... (۶-۹-۲-۳) دستورهای خاتمه دهنده مسئله
۴۴	..... (۳-۳) معرفی روش‌های آشکارسازی نوترون به‌شیوه آزمایشگاهی
۴۵	..... (۱-۳-۳) تعیین شار با استفاده از اندازه‌گیری تعداد واکنش $^{10}B(n,\alpha)^7Li$ در واحد زمان
۴۶	..... (۲-۳-۳) تعیین شار با استفاده از اندازه‌گیری فعالیت اشباع پولک های فعال شده در درون راکتور
۴۷	..... (۴-۳) معادله‌ی توزیع شار در یک راکتور استوانه‌ای

فصل چهارم: شبیه سازی راکتور زیر بحرانی با استفاده از کد محاسباتی MCNP

۵۰	..... (۱-۴) مقدمه
۵۰	..... (۲-۴) مراحل شبیه‌سازی راکتور زیر بحرانی با استفاده از کد MCNP
۵۲	..... (۱-۲-۴) تانک راکتور
۴۳	..... (۲-۲-۴) قلب راکتور
۵۴	..... (۱-۲-۲-۴) تعریف ناحیه مرکزی قلب (میله‌های سوخت)
۵۴	..... (۲-۲-۲-۴) تعریف ناحیه بالایی قلب (پلی اتیلن)
۵۵	..... (۳-۲-۲-۴) تعریف ناحیه زیر قلب (آب)
۵۵	..... (۳-۲-۴) میله سوخت
۵۶	..... (۴-۲-۴) لوله آلومینیومی (Guide Tube)
۵۹	..... (۳-۴) تعریف کارت‌های سطح
۵۹	..... (۱-۳-۴) تعریف سطوح شش وجهی
۶۳	..... (۴-۴) تعریف مواد موجود در فایل ورودی
۶۳	..... (۱-۴-۴) محاسبه چگالی عددی ناحیه سوخت
۶۴	..... (۲-۴-۴) محاسبه چگالی عددی ناحیه آلومینیومی
۶۵	..... (۳-۴-۴) محاسبه چگالی عددی ناحیه پلی اتیلن

۶۶	..... (۴-۴-۴) چگالی عددي ناحیه غلاف (نیکل)
۶۶	..... (۵-۴-۴) محاسبه چگالی عددي ناحیه هوا
۶۷	..... (۶-۴-۴) محاسبه چگالی عددي ناحیه آب
۶۸	..... (۷-۴-۴) محاسبه چگالی عددي تانک
۶۸	..... (۵-۴) محاسبه ضریب تکثیر مؤثر (k_{eff})

فصل پنجم: اندازه گیری شار با استفاده از روش های آزمایشگاهی

۷۱	..... (۱-۵) مقدمه
۷۱	..... (۲-۵) روش تعیین شار با استفاده از شمارنده BF_3
۷۳	..... (۳-۵) روش تعیین شار با استفاده از فعالیت پولک

فصل ششم: نتایج بحث و ارائه پیشنهادات

۷۷	..... (۱-۶) مقدمه
۷۷	..... (۲-۶) مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی در گام چهارم (شعاع ۱۸/۸ cm)
۷۹	..... (۳-۶) محاسبه γ برای گام های مختلف با استفاده از کد محاسباتی MCNP
۸۴	..... (۴-۶) تعیین k_{eff} بهینه برای راکتور زیر بحرانی توسط کد MCNP
۸۶	..... (۵-۶) ارائه پیشنهادات

فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۱): مشخصات چشمه امرسیوم - برلیوم	۹
جدول (۲-۱): مشخصات چشمه پلوتونیوم - برلیوم	۱۰
جدول (۳-۱): مشخصات چشمه پلونیوم - برلیوم	۱۰
جدول (۱-۲): مشخصات فنی کلی راکتور زیر بحرانی	۱۵
جدول (۲-۲): مشخصات فنی تانک	۱۷
جدول (۳-۲): عناصر به کار رفته در ساخت فولاد	۱۷
جدول (۴-۲): مشخصات لوله آلومینیومی	۱۹
جدول (۵-۲): مشخصات سوخت	۲۰
جدول (۶-۲): مقادیر آب در تانک	۲۱
جدول (۱-۳): کمیت ها و واحدهای اصلی در MCNP	۲۶
جدول (۲-۳): سطوح مورد استفاده در کد MCNP	۳۱
جدول (۳-۳): طیف های مورد استفاده در MCNP	۳۹
جدول (۴-۳): حسابگرهای MCNP	۴۲
جدول (۱-۴): شعاع نواحی مختلف سلول سوخت	۵۲
جدول (۲-۴): چگالی عددی عناصر ناحیه سوخت	۶۳
جدول (۳-۴): عناصر ناخالصی موجود در لوله آلومینیومی	۶۴
جدول (۴-۴): چگالی عددی عناصر تشکیل دهنده لوله آلومینیومی	۶۵
جدول (۵-۴): چگالی عددی عناصر تشکیل دهنده پلی اتیلن	۶۵
جدول (۶-۴): چگالی عددی مولکول های تشکیل دهنده هوا	۶۶
جدول (۷-۴): چگالی عددی عناصر تشکیل دهنده هوا	۶۷
جدول (۸-۴): چگالی عددی عناصر تشکیل دهنده آب	۶۷
جدول (۹-۴): چگالی عددی عناصر تشکیل دهنده فولاد ضد زنگ	۶۸
جدول (۱۰-۴): مقایسه Keff حاصل از کد MCNP با کد Citation	۶۹
جدول (۱-۵): نتایج شمارش به دست آمده توسط آشکارساز BF ^۳	۷۲
جدول (۲-۵): تابع نمایی مربوط به نمودار در گام چهارم (شعاع ۱۸/۸ cm)	۷۳
جدول (۳-۵): نتایج به دست آمده از آزمایش توسط فعالسازی پولک های ایندیم	۷۴
جدول (۴-۵): تابع نمایی مربوط به نمودار در شعاع ۱۸/۸ cm	۷۵
جدول (۱-۶): ضرایب γ تابع نمایی به دست آمده با روش های مختلف در گام چهارم (شعاع ۱۸/۸ cm)	۷۹
جدول (۲-۶): نتایج محاسبه شده برای γ در گام های مختلف	۷۹
جدول (۳-۶): keff در گام های مختلف راکتور زیر بحرانی	۸۵

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۱۶	شکل (۱-۲): نمای راکتور زیربحرانی اصفهان
۱۶	شکل (۲-۲): شمای عمودی راکتور زیربحرانی اصفهان
۱۸	شکل (۳-۲): شمای میله‌ی سوخت
۱۹	شکل (۴-۲): انتهای میله‌ی سوخت
۲۰	شکل (۵-۲): کپسول سوخت
۴۵	شکل (۱-۳): یک دستگاه آشکارساز تپی
۵۳	شکل (۱-۴): صفحه $x=0$ ، که در آن لوله‌های سوخت و تانک راکتور مشخص شده است.
۵۶	شکل (۲-۴): صفحه $z=0$ ، که در آن میله سوخت از نمای بالا مشخص شده است.
۵۶	شکل (۳-۴): صفحه $z=0$ ، که در آن کپسول پلی‌اتیلن از نمای بالا مشخص شده است.
۵۷	شکل (۴-۴): صفحه $y=0$ ، که در آن لوله‌های سوخت و لوله آلومینیومی مرکز راکتور مشخص شده است.
۵۷	شکل (۵-۴): صفحه $z=0$ ، که در آن لوله آلومینیومی با بزرگنمایی مشخص شده است.
۵۸	شکل (۶-۴): صفحه $z=0$ ، که در آن قلب راکتور و عناصر موجود در آن مشخص شده است.
۵۸	شکل (۷-۴): صفحه $z=0$ ، که در آن شبکه سوخت با بزرگنمایی مشخص شده است.
۵۹	شکل (۸-۴): قسمتی از شبکه یک راکتور شش ضلعي

- نمودار (۱-۴): توزیع شار محوری نوترون در شعاع $18/8$ cm با استفاده از کد MCNP ۶۹
- نمودار (۱-۵): توزیع شار محوری نوترون در گام چهارم (شعاع $18/8$ cm) با استفاده آشکارساز BF_3 ۷۲
- نمودار (۲-۵): توزیع شار محوری نوترون در گام چهارم (شعاع $18/8$ cm) با استفاده از فعالسازی پولک ۷۵
نمودار (۱-۶): مقایسه‌ی تابع توزیع شار محوری به‌دست آمده از دو روش محاسباتی و تجربی (BF_3) در گام
چهارم (شعاع $18/8$ cm) ۷۷
- نمودار (۲-۶): مقایسه‌ی تابع توزیع شار محوری به‌دست آمده از دو روش محاسباتی و تجربی (فعالسازی پولک)
در گام چهارم (شعاع $18/8$ cm) ۷۸
- نمودار (۳-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام اول (شعاع $4/7$ cm) با استفاده از کد محاسباتی MCNP ۸۰
- نمودار (۴-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام دوم (شعاع $9/4$ cm) با استفاده از کد محاسباتی MCNP ۸۰
- نمودار (۵-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام سوم (شعاع $14/1$ cm) با استفاده از کد محاسباتی MCNP ۸۱
- نمودار (۶-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام چهارم (شعاع $18/8$ cm) با استفاده از کد محاسباتی
MCNP ۸۱
- نمودار (۷-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام پنجم (شعاع $23/5$ cm) با استفاده از کد محاسباتی
MCNP ۸۲
- نمودار (۸-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام ششم (شعاع $28/2$ cm) با استفاده از کد محاسباتی
MCNP ۸۲
- نمودار (۹-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام هفتم (شعاع $32/9$ cm) با استفاده از کد محاسباتی
MCNP ۸۳
- نمودار (۱۰-۶): توزیع شار محوری نوترون در گام هشتم (شعاع $37/6$ cm) با استفاده از کد محاسباتی
MCNP ۸۳
- نمودار (۱۱-۶): نمودار ضریب تکثیر مؤثر بر حسب گام شبکه با استفاده از کد محاسباتی MCNP ۸۶

چکیده

راکتور تحقیقاتی آب سبک زیربحرانی (LWSCR) وسیله‌ای کارا و بسیار ایمن برای انجام آزمایشات فیزیک راکتور و اندازه‌گیری پارامترهای قلب راکتور است. این راکتور به گونه‌ای طراحی گردیده است که ضریب تکثیر موثر نوترون در آن کمتر از یک بوده و هیچگاه بحرانی نمی‌گردد. همچنین این راکتور با یک چشمه ثابت کار می‌کند. در این پروژه ابتدا توزیع شار محوری راکتور با دو روش تجربی اندازه‌گیری شده است. در روش اول از سیستم آشکارسازی با استفاده از آشکارسازی BF_3 و در روش دوم از پولک‌های ایندیم و تابش‌دهی آن‌ها در قلب و سپس اندازه‌گیری پرتوایی آن‌ها استفاده گردیده است. توزیع شار محوری علاوه بر دو روش آزمایشگاهی توسط محاسبات و به صورت تئوریک نیز بدست آمده است. در روش تئوریک از کد MCNP که بر اساس روش مونت کارلو کار می‌کند استفاده گردیده است. با توجه به قابلیت‌های کد MCNP دقت کافی در تعریف هندسی قلب راکتور که یک شبکه شش ضلعی توپر (مثلثی) است مبذول گردیده و کلیه قسمت‌های قلب به طور کامل لحاظ گردیده است.

قبل از محاسبات توزیع شار، محاسبات ضریب تکثیر بحرانی انجام گردیده؛ نتایج محاسبات با نتایج محاسبات توسط کدهای WIMS و CITATION که قبلاً انجام گردیده، بسیار نزدیک می‌باشد. همچنین منحنی تغییرات ضریب تکثیر بر حسب گام راکتور نیز جهت اطمینان از درستی گام انتخاب شده در طراحی اولیه بدست آمده است که حداکثر ضریب تکثیر در گام $4/7$ سانتی متر (گام راکتور) حاصل گردید.

محاسبات شار محوری با استفاده از ورودی نوشته شده انجام و با نتایج اندازه‌گیری مقایسه گردید که نتایج از تطابق خوبی برخوردار است.

فصل اول
انواع راکتورها و راکتور زیر بحرانی

(۱-۱) مقدمه

راکتور هسته‌ای وسیله‌ای است که در آن چنان ترتیبی داده شده است که واکنش زنجیری فیسوین می‌تواند خود به خود و تحت کنترل ادامه پیدا کند. شرط لازم برای یک واکنش زنجیری خود مداوم آن است که به ازاء هر فیسوین درست یک نوترون که بتواند موجب فیسوین دیگر شود به وجود آید. این شرط را می‌توان با ضریب تکثیر، k ، که عبارتست از تعداد فیسوین‌ها در هر نسل به تعداد فیسوین در نسل بلافاصله قبل از آن است، بیان کرد. وقتی این ضریب دقیقاً برابر یک می‌شود، راکتور بحرانی است و یک واکنش زنجیره‌ای پایدار وجود دارد. اگر این ضریب بزرگتر از یک شود، راکتور فوق بحرانی است و یک واکنش زنجیره‌ای واگرا وجود دارد. نهایتاً اگر این ضریب کوچکتر از یک باشد راکتور زیر بحرانی است و واکنش زنجیره‌ای کاهش یافته و نهایتاً از بین می‌رود.

ساختار اصلی یک راکتور شامل سوخت، ماده‌ی کند کننده نوترون‌ها و ماده خنک کننده می‌باشد. مهمترین قسمت یک راکتور که شکافت در آن رخ می‌دهد و انرژی به شکل حرارت آزاد می‌شود. محدوده‌ی سوخت می‌باشد، که آن را قلب راکتور^۱ می‌نامند. برای این‌که یک راکتور هسته‌ای شروع به تولید انرژی گرمایی کند، باید به حالت بحرانی درآمده باشد. این که در شرایطی از ابعاد هندسی و ترکیب مواد، راکتور می‌تواند به حالت بحرانی رسیده و انرژی تولید کند، موضوعی است که در طراحی و ساخت راکتور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

راکتورها بر حسب میانگین انرژی نوترون‌ها که باعث قسمت عمده فیسوین می‌شوند به راکتورهای حرارتی و سریع و بر حسب مصرف سوخت به راکتورهای سوزاننده، مبدل و زاینده، بر حسب غنای سوخت به راکتورهای اورانیوم طبیعی، راکتورهای اورانیوم غنی شده، بر حسب خنک کننده به راکتورهای با خنک کننده گاز، آبی (آب سبک و آب سنگین) و خنک کننده سدیم مذاب، بر حسب فاز سوخت و کند کننده به راکتورهای همگن و ناهمگن و بالاخره بر حسب کاربرد به راکتورهای قدرت، تولید نوکلئید و تحقیقاتی تقسیم می‌شوند [۱].

^۱. Reactor Core

(۱-۲) طبقه‌بندی انواع راکتورها

انواع مختلف راکتورهایی را که در جهان ساخته شده‌اند می‌توان بر حسب نوع سوخت، کند کننده و خنک کننده‌هایی که در آن‌ها استفاده می‌شود طبقه بندی نمود.

۱. راکتورهایی که از آب سبک به عنوان خنک کننده و کند کننده و اورانیوم غنی شده (۲ تا ۴ درصد اورانیوم ۲۳۵) به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. این راکتورها عموماً تحت عنوان راکتورهای آب سبک (LWR)^۱ شناخته می‌شوند. راکتورهای آب تحت فشار (PWR)^۲، آب جوشان (BWR)^۳ از این دسته‌اند.

۲. راکتورهایی که از گاز (Co₂ و He) به عنوان خنک کننده، گرافیت به عنوان کند کننده و اورانیوم طبیعی یا کم غنی شده به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. این راکتورها به گاز-گرافیت (GCR)^۴ معروفند. راکتور گازی پیشرفته (AGR)^۵ از این نوع می‌باشند.

۳. راکتورهایی که از آب سنگین به عنوان کند کننده و خنک کننده و از اورانیوم طبیعی به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. این راکتورها تحت عنوان راکتورهای آب سنگین (HWR)^۶ شناخته می‌شوند، نوع کانادایی این راکتور به CANDU^۷ موسوم است.

۴. راکتورهایی که از مخلوط اورانیوم و پلوتونیوم به عنوان سوخت و سدیم مایع به عنوان خنک کننده استفاده کرده و فاقد کند کننده می‌باشند. این راکتورها تحت عنوان راکتورهای زاینده سریع (FBR)^۸ شناخته می‌شوند [۱].

(۱-۳) خواص کند کننده‌ها

خواص مهم هر کند کننده‌ی راکتور هسته‌ای به شرح زیر می‌باشد:

۱. اتم‌های آن باید دارای عدد جرمی پایین باشند زیرا هر چه قدر عنصر سبکتر باشد نوترون بیش‌تر انرژی خود را از دست می‌دهد.

^۱. Light Water Reactor

^۲. Pressurized Water Reactors

^۳. Boiling Water Reactors

^۴. Gas Cooled Reactors

^۵. Advanced Gas Cooled Reactors

^۶. Heavy Water Reactors

^۷. Canadian Deuterium Uranium

^۸. Fast Breeder Reactors

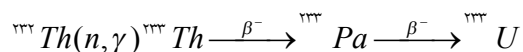
۲. هسته‌ی اتم‌ها باید دارای سطح مقطع جذب پایین باشند تا اکثر نوترون‌ها بدون جذب به کند شدن خود ادامه دهند.
۳. هسته‌ی اتم‌ها باید دارای سطح مقطع پراکندگی بالایی باشند یا به عبارتی امکان برخورد کشسان زیاد باشد.
۴. آب سبک، آب سنگین، گرافیت مهم‌ترین کند کننده‌ها در راکتورها هستند [۱].

(۴-۱) خواص خنک کننده‌ها

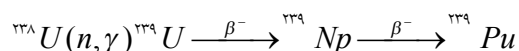
- هر خنک کننده راکتور هسته‌ای باید دارای شرایط اصلی زیر باشد:
۱. خواص ترمودینامیکی خوب، یعنی رسانندگی گرمایی، چگالی، و گرمای ویژه بالا، و چسبندگی پایین.
 ۲. عدم برهم کنش شیمیایی با قسمتهای دیگر راکتور.
 ۳. سطح مقطع جذب نوترونی خیلی پایین.
 ۴. پرتوزا نشدن هنگام عبور خنک کننده از قلب راکتور
- مواد زیادی به عنوان خنک کننده در راکتورهای آزمایشی و قدرت به کار برده شده اند که از میان آنها می‌توان آب سبک، آب سنگین، سدیم، گازکربنیک و هلیوم را نام برد [۱].

(۵-۱) خواص هسته‌ای مواد سوخت

ایزوتوپ‌های اورانیوم -۲۳۳ و اورانیوم -۲۳۵ و پلوتونیوم -۲۳۹ و پلوتونیوم -۲۴۱ سوخت‌های عملی برای راکتورها می‌باشند زیرا این ایزوتوپ‌ها می‌توانند با نوترونهای با انرژی پایین شکافته شوند. سطح مقطع شکافت معمولاً با انرژی و سرعت نوترون نسبت معکوس دارد، بنابراین احتمال شکافت هسته‌ها با نوترون‌های کم انرژی بیشتر است. از میان ۴ ایزوتوپ فوق فقط اورانیوم -۲۳۵ در طبیعت یافت می‌شود. ایزوتوپ اورانیوم -۲۳۳ با واکنش زیر از توریم بدست می‌آید که تاکنون از اورانیوم -۲۳۳ برای سوخت راکتورهای هسته‌ای به کار نرفته است.



پلوتونیوم -۲۳۹ به وسیله واکنش زیر از ${}^{238}\text{U}$ بوجود می‌آید و به دلیل تولید گرانشی آن و خواص فیزیکی و شیمیایی آن نسبتاً کم برای سوخت راکتور استفاده می‌شود.



پلوتونیوم -۲۴۱ در اثر برخورد نوترون با پلوتونیوم -۲۳۹ به وجود می‌آید و هرگز به طور مستقیم بعنوان سوخت راکتور بکار نرفته زیرا هزینه تولید آن بیش از حد است [۱].

(۶-۱) طبقه بندی راکتورهای زیربحرانی

راکتورهای زیربحرانی بر حسب سوخت مورد استفاده و کند کننده‌ی نوترونی دسته بندی می-شوند در راکتورهای زیربحرانی از خنک کننده استفاده نمی‌شود زیرا در راکتورهایی که قدرت آن‌ها از ۱۰۰ وات کمتر است خنک کننده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

در راکتورهای زیر بحرانی از اورانیوم طبیعی و اورانیوم غنی شده به عنوان سوخت و از آب سبک، آب سنگین، گرافیت بعنوان کند کننده استفاده می‌شود. پس در مجموع شش نوع راکتور زیربحرانی طرح و محاسبه می‌شوند لازم به ذکر است که از اورانیوم غنی شده و آب سنگین نمی‌توان برای راکتورهای زیربحرانی استفاده نمود. در طراحی راکتور زیربحرانی برای دو نوع سوخت سه نوع شبکه مربعی، شش ضلعی توخالی، شش ضلعی توپر که مجموعاً شش حالت را تشکیل می‌دهند وجود دارد از میان این حالات، حالت بهینه زمانی انتخاب می‌شود که با سوخت کمتر به ضریب تکثیری بی‌نهایت دست یابیم یعنی حالتی که دارای $\frac{V_m}{V_f}$ بیش‌تری

است. مثلاً برای اورانیوم فلزی شبکه شش ضلعی توپر شبکه بهینه می‌باشد [۲].

راکتورهای زیربحرانی به‌گونه‌ای طراحی می‌گردند که در آنها ضریب تکثیر مؤثر نوترون کمتر از ۱ باشد، پس چرخه شکافت در آن به‌صورت خودبه‌خودی انجام نمی‌پذیرد بلکه لازم است یک چشمه نوترون درون قلب راکتور تعبیه گردد تا راکتور بتواند به فعالیت خود ادامه دهد. در ادامه برای اثبات این موضوع به بررسی رفتار زمانی راکتور بینهایت می‌پردازیم.

(۷-۱) رفتار زمانی راکتور بی‌نهایت

رفتار زمانی راکتور بی‌نهایت را در نظر بگیرید. ابتدا واضح است که در غیاب چشمه‌های نوترون خارجی فلوی راکتور به مقدار صفر باقی می‌ماند زیرا برای شروع یک واکنش زنجیری به حداقل یک نوترون احتیاج است فرض کنید در $t=0$ چشمه نوترون یکنواختی که S نوترون سریع تولید می‌کند وارد سیستم شود در نتیجه یک فلوی نوترون به وجود می‌آید که می‌توان آن را از معادله‌ی پخش تابع زمان به دست آورد. φ_T از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$-\varphi_T + \frac{S}{\bar{\Sigma}_a} = t_d \frac{d\varphi_T}{dt} \quad (1-1)$$

که S دانسته‌ی نوترون‌های حرارتی چشمه و t_d زمان پخش حرارتی می‌باشد. برای عبارت چشمه حرارتی دو جزء وجود دارد یکی مربوط به چشمه‌ی نوترون خارجی و دیگری مربوط به نوترون فیزیون می‌باشد.

$$S = PS + K_\infty \bar{\Sigma}_a \varphi_T \quad (2-1)$$

از آنجا که S نوترون از چشمه تولید می‌شوند تعداد PS از این نوترون‌ها در راکتور کند می‌شوند.

با جایگذاری (۲-۱) در (۱-۱) داریم:

$$\frac{PS}{\bar{\Sigma}_a} + (K_\infty - 1)\varphi_T = t_a \frac{d\varphi_T}{dt} \quad (۳-۱)$$

با اعمال شرط اولیه $\varphi_T(0) = 0$ فلوی نوترون از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varphi_T = \frac{PS/\bar{\Sigma}_a}{K_\infty - 1} \left[\exp(K_\infty - 1) \frac{t}{t_a} - 1 \right] \quad (۴-۱)$$

در معادله‌ی فوق وقتی که $K_\infty < 1$ می‌شود داریم:

$$\varphi_T = \frac{PS/\bar{\Sigma}_a}{1 - K_\infty}$$

با ضرب طرفین معادله در $\bar{\Sigma}_a$ به نتیجه‌ی زیر می‌رسیم:

$$\varphi_T \bar{\Sigma}_a = \frac{PS}{1 - K_\infty} \quad (۵-۱)$$

طرف چپ معادله‌ی (۵-۱) برابر است با تعداد نوترون‌های حرارتی که در هر نقطه از راکتور جذب می‌شوند. طرف راست این عبارت با استفاده از تعریف K_∞ (که عبارتست از نسبت تولید به مصرف نوترون‌های حرارتی از یک نسل به نسل بعد) که با رابطه زیر تعریف می‌شود به این صورت است که جذب تعداد PS نوترون حرارتی چشمه باعث تولید PSK_∞ نوترون جدید می‌شود و جذب این نوترون‌ها باعث تولید PSK_∞^2 نوترون جدید می‌شود. بنابراین انتشار S نوترون سریع منجر به تولید تعدادی نوترون برابر مقدار زیر می‌گردد:

$$K_\infty = \frac{n_1}{n} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_3}{n_2} = \dots$$

$$PS + PSK_\infty + PSK_\infty^2 + \dots = \frac{PS}{1 - K_\infty} = n_t$$

بنابراین معادله‌ی (۵-۱) بیان‌کننده‌ی این واقعیت است که در راکتور زیر بحرانی تعداد نوترون‌هایی که جذب می‌شوند با تعداد نوترون‌هایی که تولید می‌شوند برابر است، فلوی نوترون را نمی‌توان بدون وجود چشمه‌ی خارجی حفظ کرد. بلکه برای اینکه راکتور زیر بحرانی بتواند به فعالیت خود ادامه دهد یک چشمه نوترون خارجی باید در زیر یا داخل یا در جوار راکتور قرار داده شود [۳ و ۴].

(۸-۱) چشمه‌ی نوترون

همان‌گونه که در قسمت قبل توضیح داده شد وجه تمایز راکتورهای زیر بحرانی با راکتورهای بحرانی و فوق بحرانی نیاز به وجود یک چشمه‌ی نوترون خارجی در اینگونه راکتورها می‌باشد. از آنجا که نوترون‌های آزاد به علت کوتاه بودن نیمه عمر (۱۲ min) نمی‌توانند در طبیعت

وجود داشته باشند؛ لذا از واکنش‌های هسته‌ای برای ایجاد چشمه‌ی نوترونی مورد نیاز استفاده می‌شود. از جمله واکنش‌های هسته‌ای می‌توان واکنش‌های (α, n) ، (γ, n) ، (p, n) را نام برد که این دسته از چشمه‌ها نوترون با شدت ثابت تولید می‌کنند. دسته‌ی دوم که بعنوان چشمه‌ی نوترون استفاده می‌شوند مولدهای نوترون می‌باشند که این گروه از چشمه‌ها نوترون‌های با شدت متغیر و به صورت پالسی تولید می‌کنند [۵].

(۱-۸-۱) برخی از چشمه‌های ثابت در راکتور زیربحرانی

در واکنش (α, n) هسته هدف تحت بمباران ذرات α قرار گرفته که تشکیل هسته‌ی تحریک شده مرکب داده و منجر به گسیل نوترون می‌شود. این چشمه‌ها به صورت مخلوطی از پودر عناصر گسیل کننده‌ی α مثل ^{241}Am ، ^{239}Pu و ^{210}Po با عناصر سبکی مثل 6Li ، 9Be و ^{11}B می‌باشند که متداولترین آن‌ها که دارای بهره نوترونی زیاد است عبارتند از: چشمه‌ی امرسیوم - برلیوم، چشمه‌ی پلوتونیوم - برلیوم، چشمه‌ی پلونیوم - برلیوم می‌باشند. در واکنش (α, n) اساس واکنش به صورت زیر است:



نوترون‌های تولید شده ممکن است قبل از خروج از پودر چشمه، مقداری از انرژی خود را در اثر برخورد با هسته‌های عناصر موجود در پودر از دست بدهند. در نتیجه نوترون‌های حاصل از چشمه تک انرژی نبوده و دارای طیف انرژی خواهند بود. اندازه‌ی چشمه‌ی نوترون که به صورت کپسول ساخته می‌شود بستگی به اکتیویته‌ی ذرات گسیل کننده‌ی آلفا دارد. معمولاً حجم آن از چند میلی‌متر تجاوز نمی‌کند از مزایای چشمه‌های (α, n) کمی حجم آن‌ها و قابلیت پایداری فلوی نوترون تولید شده و عدم احتیاج به منبع تغذیه و از معایب آن‌ها عدم توانایی در خاموش کردن آن‌ها را می‌توان نام برد [۲].

(۱-۱-۸-۱) چشمه‌ی امرسیوم - برلیوم

این چشمه مخلوطی از پودر اکسید امرسیوم و برلیوم است که مشخصات آن به شرح جدول زیر می‌باشد:

جدول (۱-۱): مشخصات چشمه امرسیوم - برلیوم

$2/2 E^6$ n/sec/ci	بهره‌ی نوترون به ازای هر کوری (۱۶) گرم
$1/6 E^6$ n/sec/gr	بهره‌ی نوترون به ازای هر گرم
۴۵۸ Year	نیمه عمر
۴ Mev	انرژی متوسط نوترون‌ها

(۲-۱-۸-۱) چشمه‌ی پلوتونیوم - برلیوم

قدرت این چشمه مرتباً برای سال‌های زیادی افزایش می‌یابد زیرا پلوتونیوم تجاری معمولاً از $91\% \text{ }^{239}\text{Pu}$ ، $8\% \text{ }^{240}\text{Pu}$ ، $1\% \text{ }^{241}\text{Pu}$ و ^{241}Am تشکیل شده و ایزوتوپ ^{241}Pu موجود با گسیل اشعه‌ی بتا به ^{241}Am تبدیل می‌شود که این خود در مقابل Be تولید نوترون می‌کند. سایر مشخصات آن به شرح جدول زیر است و مزیت این چشمه عدم تابش فوتون گامای قابل نفوذ می‌باشد.

جدول (۲-۱): مشخصات چشمه پلوتونیوم - برلیوم

بهره‌ی نوترون به ازای هر کوری (۱۶) گرم	$8/5 \text{ E}^4 \text{ n/sec/ci}$
بهره‌ی نوترون به ازای هر گرم	$1/4 \text{ E}^6 \text{ n/sec/gr}$
نیمه عمر	۲۴۳۶۰ Year
انرژی متوسط نوترون‌ها	$4/2 \text{ Mev}$

(۳-۱-۸-۱) چشمه‌ی پلونیوم - برلیوم

از مزیت‌های این چشمه تابش بسیار ضعیف اشعه‌ی گاما و بتا و از معایب آن نیمه عمر کم می‌باشد. مشخصات آن به شرح جدول ذیل می‌باشد:

جدول (۳-۱): مشخصات چشمه پلونیوم - برلیوم

بهره‌ی نوترون به ازای هر گرم	$2/5 \text{ E}^6 \text{ n/sec/gr}$
نیمه عمر	$138/4 \text{ Day}$
انرژی متوسط نوترون‌ها	$4/5 \text{ Mev}$

(۴-۱-۱-۸) چشمه‌ی نوترونی کالیفرنیم - ۲۵۲

بعضی از هسته‌های سنگین نظیر کالیفرنیم - ۲۵۲ عمل شکافت خود به خود انجام داده که در نتیجه آن نوترون تولید می‌شود و به علت اکتیویته‌ی زیاد ذرات آلفا (520 Ci/gr) این چشمه در کپسول فلزی قرار داده می‌شود [۶] و این چشمه دارای بهره‌ی نوترونی برابر (n/sec/gr) $12 \text{ E}^{12} (2/34)$ می‌باشد که این نوترون‌ها با انرژی متوسط $2/35 \text{ Mev}$ ساطع می‌شوند [۷]. نوترون‌های حاصل از شکافت با نرخ $5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ از این منابع کپسول شده ساطع می‌شوند [۸]. زمانی که چشمه‌ی کالیفرنیم - ۲۵۲ را در یک محیط ایزوله قرار می‌دهیم. شار نوترون‌ها به قدرت منبع و فاصله منابع از نقطه اندازه‌گیری بستگی دارد. میدان‌های نوترونی از این دست را برای اندازه‌گیری سطح مقطع برخورد استفاده می‌کنند [۹].

(۲-۸-۱) چشمه پالسی در راکتور زیربحرانی