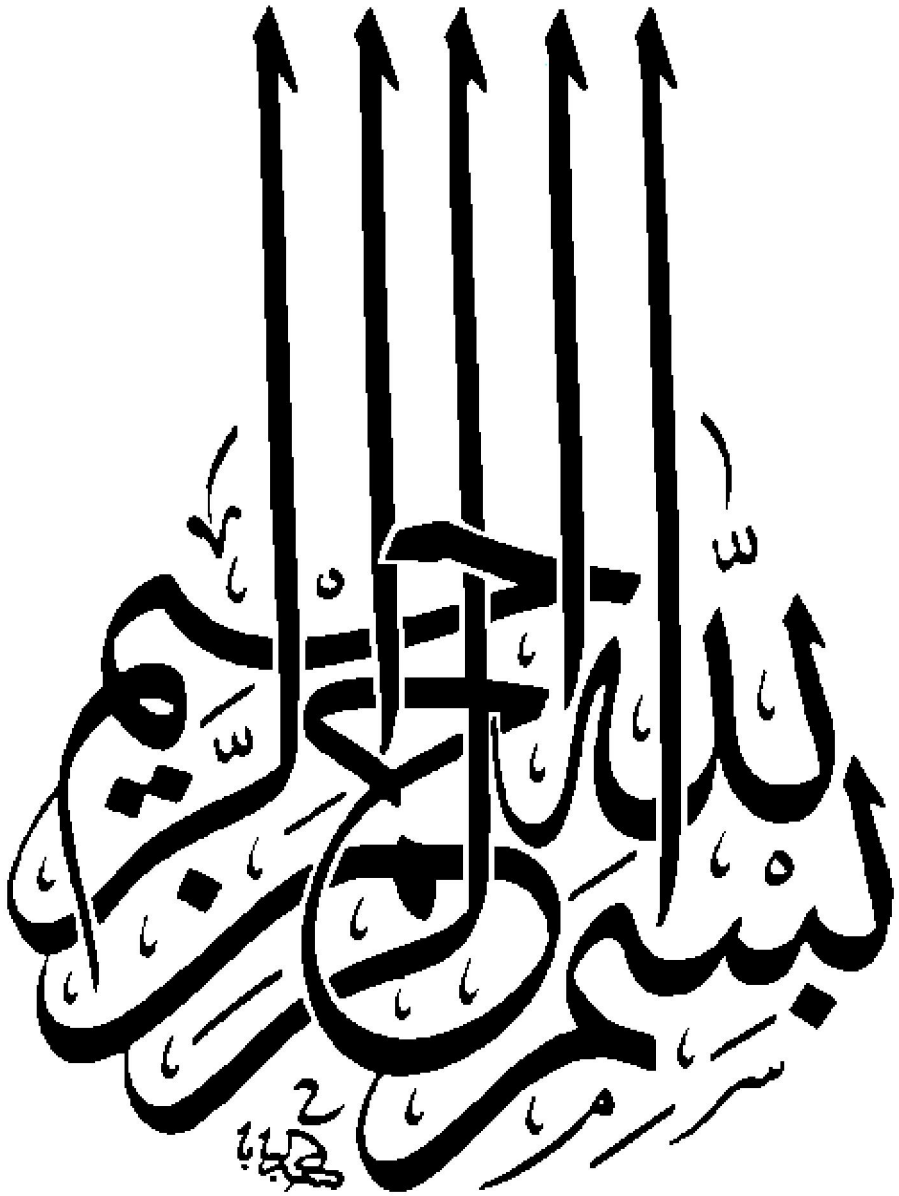

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه اصفهان
دانشکده علوم و فناوری‌های نوین
گروه مهندسی هسته‌ای

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی هسته‌ای گرایش راکتور

تحلیل شروع و تکامل یک موج خود نگهدار درحال سوختن هسته‌ای در یک راکتور سریع بحرانی

استاد راهنما:

دکتر مهدی نصری نصرآبادی

پژوهشگر:

محسن حسامی

دی ماه ۱۳۹۰

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

دانشگاه اصفهان
دانشکده علوم و فناوری‌های نوین
گروه مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی هسته‌ای گرایش راکتور

آقای محسن حسامی

تحت عنوان

تحلیل شروع و تکامل یک موج خود نگهدار درحال سوختن هسته‌ای در یک راکتور سریع بحرانی

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مهدی نصری نصرآبادی	با مرتبه علمی استادیار	امضا
۲- استاد داور داخل گروه	دکتر محمد حسین استکی	با مرتبه علمی استادیار	امضا
۳- استاد داور خارج از گروه	دکتر بهزاد تیموری	با مرتبه علمی استادیار	امضا
۴- استاد ناظر	دکتر مهران میراولیائی	با مرتبه علمی استادیار	امضا

امضای مدیر گروه

تقدیم به:

پدر

و مادرم

چکیده:

این تحقیق به بررسی امکان شکل‌گیری پدیده‌ای به نام موج شکافان هسته‌ای که اخیرا در طراحی راکتورهای هسته‌ای مورد توجه قرار گرفته است، می‌پردازد. این موج با استفاده از یک چشمه‌ی نوترون خارجی (در مراحل اولیه‌ی راه‌اندازی موج) و با برقراری شرایط لازم و کافی [۱۲و۱۳و۱۵] ایجاد شده و قادر خواهد بود تا سال‌ها بدون سوخت‌گذاری مجدد انرژی تولید کند. سوخت مورد نیاز این نوع راکتور می‌تواند اورانیوم طبیعی و یا اورانیوم تهی شده باشد. پسماند این نوع راکتور نسبت به راکتورهای امروزی به مراتب خوش رفتارتر بوده و دارای بار کمتری از اکتینیدها مانند پلوتونیوم ۲۳۹ می‌باشد[۱]. بررسی این موج با حل سیستم حاصل از معادله‌ی پخش نوترون تک گروهی وابسته به زمان سه بعدی، کوپل شده با معادلات مصرف سوخت و سینتیک و با در نظر گرفتن سیکل سوخت U-Pu در یک قلب استوانه‌ای، انجام گرفته است. روش خطی‌سازی به کار گرفته شده در حل این سیستم نه تنها حل آن را با جدا کردن زیرسیستم‌های پخش و واکنش و از بین بردن حالت غیر خطی آن ساده‌تر می‌کند، بلکه در این حالت روبرو شدن با چند صد روز زمان واقعی شبیه‌سازی جهت بررسی تشکیل موج، معقول‌تر به نظر می رسد. گسسته سازی فضائی و زمانی زیرسیستم خطی شده‌ی پخش به ترتیب با روش‌های المان محدود سه بعدی و تتا و نهایتا همگرائی آن با استفاده از روش بهینه‌ی BiCGStab(l) انجام شده است. تغییرات اندک غلظت عناصر مربوط به زیرسیستم واکنش، با استفاده از روش دقیق رانگ–کوتا (۵) ثبت شده است. با در نظر گرفتن زمان طولانی شبیه‌سازی، سه بعدی بودن مساله و همچنین کوچک بودن پله‌های زمانی و محاسبات سنگین مربوط به آن، با استفاده از روش OpenMp و موازی کردن برنامه‌ی نوشته شده به زبان فرترن ۹۵، زمان لازم برای انجام محاسبات به نحو چشمگیری کاهش پیدا کرده است. روش المان محدود عنصر به عنصر به کارگیری شده ، حافظه‌ی مورد نیاز را حدود ۱/۱۰ کاهش داده است. از موارد جالب توجه در مورد این نوع راکتور، ایمنی حاصل از حالت خودبخودی موج و بازده‌ی بالای مصرف سوخت آن می‌باشد. در نهایت موج مورد نظر با سرعت میانگین ۰/۷ cm/day و بازده‌ی مصرف سوخت حدود ۳۵ درصد حاصل شد.

کلید واژه‌ها: موج پایای شکافان هسته‌ای، معادله‌ی پخش، معادلات مصرف سوخت، معادلات سینتیک، روش المان محدود عنصر به عنصر، فرترن ۹۵، OpenMp

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: راکتور موج پایای شکافان هسته‌ای

۱-۱-مقدمه..... ۱

۱-۲-انگیزه‌های اصلی پرداختن به این نوع راکتور..... ۲

۱-۲-۱-پسماند، بازفرآوری و نگرانی در مورد گسترش سلاح‌های اتمی..... ۲

۱-۲-۲-میزان سوخت مورد نیاز، بازدهی مصرف وغناسازی..... ۳

۱-۲-۳-منابع اورانیوم..... ۳

۱-۲-۴-ایمنی ذاتی راکتور موج پایای شکافان هسته‌ای..... ۴

۱-۲-۵-راه حل تکنولوژیکی مناسب..... ۸

۱-۳-تحقیقات انجام شده روی راکتور موج پایای شکافان هسته‌ای..... ۹

۱-۳-۱-تحقیقات Edwadrd Teller و همکارانش..... ۹

۱-۳-۲-تحقیقات Hiroshi Sekimoto و همکارانش در جهت طراحی CANDLE ۱۴

۱-۳-۳-تحقیقات شرکت Terra Power و طراحی Traveling Wave Reactor ۱۹

۱-۳-۳-۱-بعضی مشکلات پیش روی این نوع راکتور..... ۲۳

فصل دوم: شبیه‌سازی موج پایای شکافان هسته‌ای

۲-۱-شبیه سازی موج..... ۲۵

۲-۱-۱-بدست‌آوردن معادلات نوترونی..... ۲۶

۲-۱-۲-حل معادلات نوترونی..... ۳۰

۲-۱-۳-روش انتخاب شده جهت حل سیستم..... ۳۲

۲-۱-۴-معرفی چند روش به اختصار..... ۳۳

۲-۱-۵-حل معادله‌ی پخش..... ۳۵

۲-۱-۵-۱-تقسیم بندی فضایی..... ۳۵

۲-۱-۵-۲-تقسیم بندی زمانی..... ۳۹

عنوان **صفحه**

۲-۱-۵-۳-حل معادلات مربوط به تغییر غلظت عناصر ۴۰
۲-۱-۵-۴-شرایط مرزی و اولیه ۴۱
۲-۱-۶- الگوریتم کلی حل مساله ۴۵

فصل سوم: پارامترهای شبیه‌سازی و نتایج

۳-۱-هندسه‌ی راکتور ۴۷
۳-۲-شرط لازم شکل گیری موج ۴۷
۳-۳-حل معادلات مصرف سوخت و سینتیک ۵۱
۳-۴-حل سیستم اصلی ۵۳
۳-۴-۱-انجام محاسبات به صورت موازی ۵۳
۳-۴-۲-اشتباه در محاسبه‌ی ضریب پخش ۵۳
۳-۴-۳-نتایج ۵۵
۳-۴-۳-۱-تغییرات شار ۵۵
۳-۴-۳-۲-سرعت موج ۵۷
۳-۴-۳-۳-تغییرات غلظت ^{238}U ۶۰
۳-۴-۳-۴-تغییرات غلظت محصولات شکافت ۶۱
۳-۵-پیشنهادها ۶۳
پی‌وست شماره ۱ ۶۴
پی‌وست شماره ۲ ۷۳
منابع و مآخذ ۹۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱: تغییرات غلظت پلوتونیوم نسبت به زمان..... ۶
شکل۱-۲: زنجیره U-Pu ۶
شکل۱-۳: موقعیت موج سوزش و زایش نسبت به هم..... ۸
شکل۱-۴: نمای قطری-محوری از مدل تلر و همکارانش..... ۱۰
شکل۱-۵: نتایج تحقیقات تلر و همکارانش..... ۱۱
شکل۱-۶: سیستم کنترل قدرت ترموستاتک لیتمی..... ۱۲
شکل۱-۷: موج دو طرفه در مدل تلر و همکارانش..... ۱۳
شکل۱-۸: استراتژی CANDLE ۱۴
شکل۱-۹: تغییر ضریب تکثیر بینهایت در طول محور قلب..... ۱۷
شکل۱-۱۰: چگالی عددی هسته‌های مهم در طول محور راکتور..... ۱۸
شکل۱-۱۱: مدل استفاده شده توسط سکیموتو و همکارانش..... ۱۸
شکل۱-۱۲: نمایش موج در دو زمان متفاوت..... ۲۰
شکل۱-۱۳: فرآیند محاسباتی انجام شده توسط MCNPX_CINDER-90 ..... ۲۰
شکل۱-۱۴: مجتمع سوخت، میله‌ی سوخت و نمای قلب از بالا..... ۲۱
شکل۱-۱۵: مقایسه‌ی نسبی میان LWR و TWR ۲۲
شکل۲-۱: قانون ساده‌ی بقا برای عنصر A ۲۸
شکل۲-۲: المان به کارگیری شده در تقسیم بندی فضایی..... ۳۶
شکل۲-۳: هندسه‌ی راکتور و شرط مرزی ثابت..... ۴۲
شکل۲-۴: مختصات سیستم به کار گرفته شده در بدست‌آوردن ضریب Albedo ۴۳
شکل۲-۵: شرط مرزی نوع سوم..... ۴۴
شکل۲-۶: الگوریتم حل مساله..... ۴۶
شکل۳-۱: هندسه‌ی راکتور..... ۴۷
شکل۳-۲: نمایش رابطه‌ی (۳-۴) برای مقادیر مجاز بحرانی پلوتونیوم..... ۵۰
شکل۳-۳: تغییرات غلظت U^{238} با زمان..... ۵۱
شکل۳-۴: تغییرات غلظت Pu^{239} با زمان..... ۵۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۳-۵: تغییرات غلظت U^{239} با زمان..... ۵۲

شکل۳-۶: شار مرکز قلب..... ۵۴

شکل۳-۷: شار مرکز قلب بین روزهای ۱۱۵/۷-۱..... ۵۶

شکل۳-۸: شار مرکز قلب بین روزهای ۲۴۳-۱۱۵/۷..... ۵۷

شکل۳-۹: شار مرکز قلب بین روزهای ۲۷۳/۳-۲۴۳..... ۵۸

شکل۳-۱۰: شار مرکز قلب بین روزهای ۳۱۶/۶-۲۷۳/۳..... ۵۸

شکل۳-۱۱: سرعت نقطه به نقطه‌ی موج..... ۵۹

شکل۳-۱۲: سرعت موج (cm/day) با تغییر شعاع قلب..... ۶۰

شکل۳-۱۳: تغییرات غلظت اورانیوم..... ۶۱

شکل۳-۱۴: غلظت بازده‌ی مصرف سوخت..... ۶۲

شکل۳-۱۵: تغییرات غلظت محصولات شکافت..... ۶۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۱-۱: پارامتر های مربوط به قلب راکتور.....۱۹
جدول۱-۲: نتایج محاسبات مدل سکیموتو.....۱۹
جدول ۳-۱ : تخمین $\Lambda(a)$ به صورت تحلیلی توسط Feoktistov ۴۹
جدول ۳-۲ : نسبت مقدار تعادلی پلوتونیوم به مقدار بحرانی آن.....۴۹

فصل اول: راکتور موج پایای شکافان هسته‌ای

۱-۱-مقدمه

امروزه هدف سیستم‌های تولید انرژی پیشرفته‌ی هسته‌ای که برمبنای طیف سریع نوترون کار می‌کنند، به حفظ و گسترش منابع سوخت هسته‌ای خلاصه نمی‌شود، بلکه به دنبال تکنولوژی‌هایی هستیم که پاک‌تر، با پسماند کمتر و همچنین با دل نگرانی‌های کمتر در مورد تولید سلاح‌های هسته‌ای، انرژی مورد نیاز ما را تامین کند. این تغییر در الویت‌ها و همچنین پیشرفت‌های اخیر در زمینه علوم هسته‌ای، این فرصت را فرا روی ما قرار می‌دهد که در کنار استفاده از یک سیکل سوخت باز[۱] در یک راکتور سریع، بتوانیم سوخت هسته‌ای با درصد غنای پایین را به کار گرفته و بازده نسبتا بالایی در مصرف سوخت بدست آوریم. امروزه پدیده‌ای که به نام موج شکافان هسته‌ای[۲] شناخته می‌شود آینده‌ای نویدبخش را حتی بدون بازفرآوری سوخت برای نیل این اهداف، فرا روی ما گشوده است. چنین پدیده‌ای این قابلیت را به راکتور می‌دهد که سوخت مورد نیاز خود را از طریق زایش و تبدیل[۳] در سوخت قابل شکستن[۴] و تبدیل آن به سوخت شکافان، تولید کرده و آن را مصرف کند. تحقیقات و طراحی‌های اخیر نشان داده است که

۱- Open Fuel Cycle

۲- Nuclear Burning Wave

۳- Breed and Transmutation

۴- Fertile

سوخت قابل شکستن اولیه‌ی مورد نیاز می‌تواند به طور کلی اورانیوم طبیعی یا اورانیوم تهی شده باشد که این به نوبه‌ی خود نیاز به فرآیند پرهزینه غنی‌سازی را به اندازه چشمگیری کاهش خواهد داد[۱].

مسائل اساسی مربوط به دانش فنی و طراحی راکتورهای سریع که امروزه اندوخته شده است، با ساخت و توسعه راکتورهای زاینده خنک شونده با سدیم در کشورهای روسیه، انگلستان و امریکا در خلال سال‌های ۱۹۴۰ تا نیمه دهه‌ی ۱۹۵۰ شروع شده است. البته این تحقیقات بعدها در کشورهای دیگر نیز دنبال شده است. برای مثال می‌توان به راکتور Phenix در فرانسه، راکتورهای BOR-60 و BN-600 در روسیه، راکتورهای JOYO و MONJU در ژاپن و راکتور Fast Breeder Test در هند اشاره کرد. ساخت راکتورهای سریع جدید در کشورهایی مانند چین، هند و روسیه در دستور کار قرار دارد و در کشورهایی مانند ژاپن و فرانسه به صورت آزمایشی مورد طراحی قرار گرفته است. انگیزه اولیه‌ی اولیه‌ی پرداختن به راکتورهای سریع در دهه‌ی ۱۹۵۰ واوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ چیزی جز پتانسیل این نوع راکتور ها به عنوان راکتور های زاینده نبود. در آن سال‌ها اورانیوم جهت پشتیبانی یک برنامه سنگین تامین انرژی هسته‌ای غیر نظامی کمیاب به نظر می رسید و تنها راه حفظ و افزایش طول عمر منابع سوخت هسته ای، به اندازه ده برابر آنچه از طریق غنی‌سازی بدست می‌آمد، راکتورهای سریع زاینده بود[۱].

با تحقیقاتی که امروزه روی فراوانی منابع اورانیوم قابل برداشت از طبیعت انجام شده، سیکل معرفی شده بر اساس پدیده موج پایای شکافان هسته‌ای، با در نظرگرفتن نرخ مصرف موجود، می‌تواند به صورت پایداری تا حدود یک قرن نیازمندی‌های ما را پاسخگو باشد[۱].

۱-۲-انگیزه‌های اصلی پرداختن به این نوع راکتور

۱-۲-۱-پسماند، بازفرآوری و نگرانی در مورد گسترش سلاح‌های اتمی

بازفرآوری شیمیایی سوخت‌های هسته‌ای مصرف شده، ریسک توسعه سلاح‌های اتمی را افزایش می‌دهد و این امر یک مانع جدی در مسیر پیشرفت راکتورهای سریع که نیاز به یک سیکل سوخت بسته[۱] دارند، به حساب می‌آید. هنوز برخی، چه بیرون از فعالیت‌های هسته‌ای و چه درگیر با آن، ضرورت و صرفه اقتصادی بازفرآوری سوخت را مورد

۱- Closed Fuel Cycle

سوال قرار می‌دهند و عنوان می‌کنند این فرآیند نه تنها هزینه‌های زیادی را متوجه صنعت هسته‌ای می‌کند، بلکه انگیزه‌ی تولید سلاح‌های هسته‌ای را نیز افزایش می‌دهد.

مدیریت پسماند سوخت موارد و مشکلات مخصوص خود را دارد. اگر بخواهیم پسماندهای رو به ازدیاد سوخت راکتورهای آب سبک را به کار بگیریم، به نوع جدیدی از راکتورهای سریع که بتواند پسماندهایی با اکتینیدهای سطح بالا را به صورت موثر و اقتصادی مصرف کند وبه لحاظ بازده و ایمنی نیز با استانداردهای بین‌المللی هماهنگ باشند، نیاز داریم. بیشتر تلاش‌های کنونی معطوف به راکتورهایی تحت عنوان سوزاننده[۱] است که ضریب تبدیل[۲] کوچکتر از یک دارند. کانون توجه بودن این راکتورها به دلیل توانایی کاهش حجم ومیزان سمیت رادیواکتیویته‌ی مربوط به پسماندهای سوخت راکتورهای آب سبک امروزه در کانون توجه دانشمندان قرار دارند. اگر چه این رهیافت در مواجه با پسماندهای در حال افزایش راکتورهای آب سبک جذاب به نظر می‌رسد، ولی به هر حال در این مسیر فرآیند باز فرآوری و تبعات آن هنوز وجود دارد[۱].

۱-۲-۲-میزان سوخت مورد نیاز، بازدهی مصرف وغنی‌سازی

می‌دانیم که راکتورهای سریع از نوترون‌هایی با طیف انرژی بالاتر نسبت به راکتورهای حرارتی استفاده می‌کنند و این مطلب باعث کاهش سطح مقطع‌ها وهمچنین افزایش نشت نوترون می‌شود. این مساله ما را ملزم می‌کند که از سوخت با درصد غنای بالاتری استفاده کنیم. این درصد در راکتورهای حرارتی حدود ۵ ودر راکتورهای سریع به ۲۰ می‌رسد. راکتور موج پایای شکافان هسته‌ای نه تنها از سوخت اولیه طبیعی و بدون غنی‌سازی به عنوان سوخت اصلی استفاده می‌کند، بلکه سوخت مورد نیاز ناحیه چاشنی[۳] در آن برای راه‌اندازی موج، غنایی در حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد دارد. ناحیه چاشنی فقط در هنگام راه اندازی موج (برای دفعه اول) نیاز بوده و تا پایان طول عمر راکتور دیگر نیازی به غنی‌سازی نیست. برای راه اندازی راکتورهای دیگری از این نوع می‌توان از سوخت شکافان تولید شده در این راکتور استفاده کرد. چنانچه از یک شتاب دهنده برای تولید نوترون خارجی استفاده کنیم، داستان غنی‌سازی دیگر به کلی فراموش خواهد شد. یک راکتور آب سبک در طول عمر ۶۰ ساله خود، با احتساب کل پسماندهای کارخانه‌ی تولید سوخت، حدود ۱۱۰۰۰ تن اورانیوم نیاز دارد (در این میان باید مسائل مربوط به غنی‌سازی، تجهیزات مورد نیاز آن و

۱- Burner

۲- Breeding Ratio

۳- Seed

هزینه‌های زیادی که بر این صنعت تحمیل می‌کند را در نظر گرفت). از این مقدار سوخت تنها حدود ۱ درصد آن در راکتور مصرف شده و انرژی تولید می‌کند. مقدار کل سوختی که در طول عمر یک راکتور آب سبک غنی می‌شود حدود ۴۶ تن می‌باشد.

راکتورهای سریع در طول عمر کاری خود به طور قابل توجهی به غنی‌سازی کمتری نسبت به راکتورهای حرارتی نیاز دارند و این به دلیل بازدهی بالاتر آنها در مصرف سوخت و عمل زایش در این نوع راکتورها می‌باشد. علاوه برآن راکتورهای سریع از اورانیوم تهی شده که به عنوان یک محصول فرعی در کارخانه‌های غنی‌سازی تولید می‌شود، می‌توانند به عنوان سوخت مجدد استفاده کنند. راکتورهایی که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود، علاوه بر اینکه تمام خصوصیات یک راکتور سریع را دارند، می‌توانند حتی با بازدهی بالاتر در مصرف سوخت، مقدار سوخت اولیه مورد نیاز و میزان پسماند تولید شده در پایان عمر ۶۰ ساله خود را به مقدار قابل توجهی کاهش دهند[۱].

۱-۲-۳-منابع اورانیوم

راکتورهای سریع منابع اورانیوم را با بازدهی خیلی بهتری نسبت به راکتورهای حرارتی مصرف می کنند. این قابلیت در ابتدا ممکن است با توجه به منابع فراوان سوخت اورانیوم که در کتاب قرمز[۵۱] در سال ۲۰۰۷ گزارش شده است و همچنین قیمت پایین آن و سهم کمی که در هزینه‌های مربوط به تولید انرژی هسته‌ای بازی می‌کند، مهم به نظر نرسد، به هرحال این مساله، یعنی منابع اورانیوم، وقتی اهمیت خود را نشان خواهد داد که قیمت آن رو به افزایش گذاشته و در رقابت با دیگر موارد سهیم در اقتصاد تولید انرژی هسته‌ای قرارگیرد.

به هر حال بازده بیشتر راکتورهای سریع نسبت به راکتورهای حرارتی هنوز مهم به شمار می‌آید. سیاست‌گزاران وجامعه جهانی به طور افزاینده‌ای به این موضوع آگاه هستند که حفظ منابع انرژی جهت استفاده نسل‌های آینده و همچنین به کارگیری تکنولوژی‌هایی که بتواند در دراز مدت، پایدار و جوابگو باشند، از موارد استراتژیک و اساسی به شمار می‌رود. محاسباتی که روی راکتورهای موج پایای شکافان هسته‌ای انجام شده است، نشان داده است که عمر مفید منابع موجود با استفاده از استراتژی مصرف سوخت در این راکتورها (نسبت به راکتورهای آب سبک) می‌تواند با ضریبی از پنج یا بیشتر افزایش یابد و این در حالی است که بازده مصرف سوخت[۱] به ۲۰ درصد محدود شود. هر چه بازده مصرف سوخت بیشتر شود، به بازدهی راکتورهای سریعی که از سیکل بسته مصرف سوخت با حضور فرآیندی

۱- Burnup

به نام بازفرآوری استفاده می‌کنند نزدیک‌تر خواهیم شد، در صورتی که هیچ یک از مشکلات بازفرآوری را نخواهیم داشت[۱].

۱-۲-۴-ایمنی ذاتی راکتور موج پایای شکافان هسته‌ای

در راکتورهای سریع امروزی دو ناحیه وجود دارد، ناحیه اصلی قلب وناحیه روکش[۱]. قلب ناحیه تولید قدرت می‌باشد و به عنوان چشمه نوترون جهت زایش در ناحیه روکش استفاده می‌شود. در راکتورهای موج پایای شکافان هسته‌ای این دو ناحیه در هم ادغام می‌شوند. یعنی همان جایی که تولید قدرت داریم، همزمان عمل زایش نیز انجام می‌شود. امروزه به صورت تجربی ثابت شده است که ضریب زایش،BR، می‌تواند بزرگتر از یک باشد. می‌توانیم ضریب زایش را به صورت زیر بنویسیم:

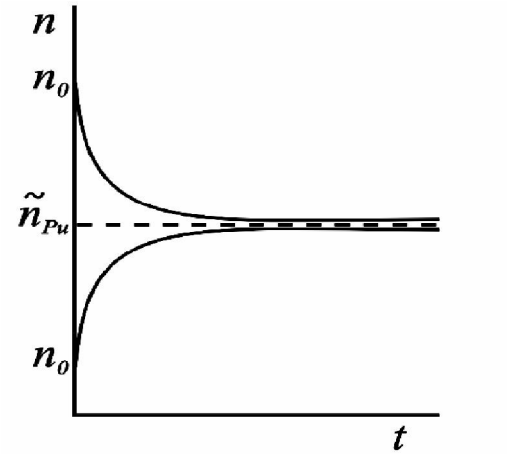
$$BR = \frac{\tilde{n}_{Pu}}{n_{crit}} U_8 \qquad (۱-۱)$$

که در آن تقریبا n_{crit} - ۱ $\approx U_8$ می‌باشد. U_8 غلظت ^{238}U در حالت ترکیب با غلظت بحرانی پلوتونیوم n_{crit} بوده و $\tilde{n}_{Pu}$ غلظت پلوتونیوم در حالت پایای سیستم، یعنی غلظتی که پلوتونیوم به سوی آن میل خواهد کرد، می‌باشد. اگر غلظت اولیه بارگذاری شده‌ی پلوتونیوم از مقدار پایای آن بیشتر باشد یعنی $n_0 > \tilde{n}_{Pu}$ ، پلوتونیوم شروع به سوختن می‌کند و از بالای $\tilde{n}_{Pu}$ به آن میل خواهد کرد. اگر $n_0 < \tilde{n}_{Pu}$ باشد، پلوتونیوم شروع به زایش کرده و از زیر $\tilde{n}_{Pu}$ به آن میل خواهدکرد و انباشته می‌شود (شکل ۱-۱). حال اگر یک ناحیه ایجاد کنیم که در آن $\tilde{n}_{Pu} > n_{\text{crit}}$ یعنی $BR>1$ چه اتفاقی خواهد افتاد؟

با توجه به ادعای Feoktistov[۱] چنین سیستمی اگر به حال خود وا گذاشته شود نه تنها به حالت فوق بحرانی نخواهد رفت، بلکه سعی خواهد کرد به مقداری از غلظت پلوتونیوم، بالاتر از غلظت بحرانی آن میل کند $\tilde{n}_{Pu} > n_{\text{crit}}$. چطور می‌توان چنین تضادی را شرح داد؟ در زنجیره U-Pu (شکل ۱-۲) با دو مقیاس زمانی مهم روبرو هستیم:

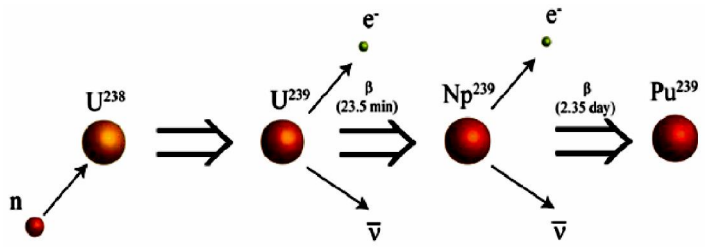
۱-زمان متوسط میان آزاد شدن نوترون ها در شکافت و جذب یا نشت آنها که حدود $۱۰^{-۶}$-$۱۰^{-۷}$ ثانیه بوده ودر واقع همان طول عمر نوترون می‌باشد.

۱- Blanket



شکل ۱-۱: تغییرات غلظت پلوتونیوم نسبت به زمان

۲-فاصله زمانی میان شکافت پلوتونیوم و جذب نوترون‌های آزاد شده در اورانیوم ۲۳۸ وآزاد شدن دو بتا و در نهایت زایش پلوتونیوم که حدود چند روز طول می کشد.



شکل ۱-۲: زنجیره U-Pu

این دو مقیاس زمانی به طور قابل توجهی متفاوت هستند. در این زنجیره پارامترهای زمانی بزرگتر تعیین کننده بوده و شکل نهایی موج را تعیین خواهند کرد. شرایط به چند صورت می‌تواند رقم بخورد. اول اینکه موج تشکیل شود ولی بعد از مدتی خاموش شود. دوم اینکه موج تشکیل شده و به یک حالت پایا برسد و سوم اینکه سیستم به یک حالت فوق بحرانی غیر قابل کنترل، هدایت شود. حالت سوم از نظر مسائل مربوط به ایمنی مهم بوده و اثبات خواهد شد که این حالت در این راکتور هیچگاه اتفاق نمی افتد. آنچه سیستم را به حالت فوق بحرانی خواهد برد چیزی جز پلوتونیوم تولید شده از طریق فرآیند زایش نمی‌تواند باشد. پولوتونیوم زایش شده، از طریق جذب نوترون در طول زمانی حدود $۱۰^{-۶}$- $۱۰^{-۷}$ ثانیه شکافته شده و سیستم دوباره به حالت زیر بحرانی خواهد رفت. نکته‌ی مهم این است که تولید دوباره پولوتونیوم توسط نوترون‌های تولید شده در شکافت دوباره پلوتونیوم انجام می‌شود و این فرآیند حدود چند

روز طول خواهد کشید و این بدان معناست که سیستم در حالت بحرانی قرار دارد و هیچگاه به حالت فوق بحرانی نخواهد رفت. در واقع به دلیل اینکه پلوتونیوم همواره از مقداری کمتر از مقدار بحرانی پلوتونیوم به آن میل می‌کند حالت فوق بحرانی نخواهیم داشت و به عبارت دیگر فاصله‌ی زمانی لازم جهت افزایش قدرت چیزی حدود چند روز است. این همان راز ایمنی ذاتی این سیستم می‌باشد.

این سیستم در صورت شکل گیری موج، با توجه به دلایل گفته شده دربالا، می تواند خود را خود بخود هدایت کرده و بدون نیاز به میله کنترل یا دخالت اپراتور به پیش برود. اگر این سیستم را به حال خود واگذاریم در ابتدا قدرت یا همان شار افزایش خواهد یافت و بعد با سوختن $^{238}\mathrm{U}$ و تولید محصولات شکافت، دوباره توان به صورت خود بخود کاهش می‌یابد. شاید کسی بگوید درست است که افزایش قدرت طی چند روز انجام می‌شود، ولی ممکن است بعد از چندین روز حالت انفجار اتفاق بیفتد. در این میان یک نکته وجود دارد و آن این است که مقدار پایای پلوتونیوم یعنی $\tilde{n}_{Pu}$ با غلظت $^{238}\mathrm{U}$ متناسب بوده و دیر یا زود ضریب تبدیل از یک کوچکتر شده ($\tilde{n}_{Pu} < n_{\mathrm{crit}}$) و واکنش رو به افول خواهد گذاشت. البته این حالت برای درصد سوختن سوخت[۱] بالا یعنی حدود ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد. حال اگر ترکیب سوخت راکتور را به نحوی تعیین کنیم که واکنش زیر به وقوع بپیوندد، می‌توانیم راکتوری داشته باشیم که طبق آنچه Feoktistov در مقاله‌های خود[۱۲،۱۳،۱۴] بیان کرده، ایمن بوده و موارد گفته شده در بالا در آن صدق خواهد کرد:

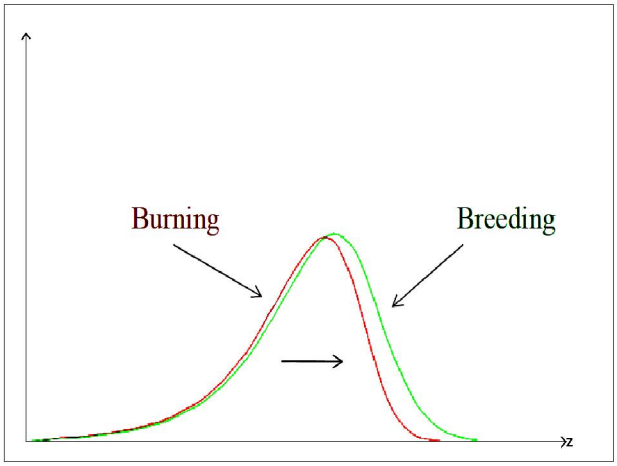
$$^{238}_{92}U(n,\gamma) \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}Pu(n, fission) \qquad (۲-۱)$$

در این حالت پلوتونیوم تولید شده بلافاصله به عنوان سوخت مصرف می‌شود. زمان مشخصه چنین واکنشی با زمان آزاد شدن دو بتا قابل مقایسه بوده که تقریبا برابر۳/۳ روز، یعنی حدودا $۱۰^{۴}$ برابر زمان مشخصه نوترون‌های تاخیری. در رابطه با خود نگه‌دار بودن موج می‌توان گفت که اگر شار افزایش یابد، سوختن پلوتونیوم نیز افزایش یافته و این خود غلظت پلوتونیوم را کاهش می‌دهد و متعاقبا شار کاهش خواهد یافت. در مقابل اگر به هر دلیلی شار نوترون کاهش یابد، سوختن پلوتونیوم نیز کمترخواهد شد ودر نتیجه پلوتونیوم بیشتر انباشته شده و بعد از چند روز دوباره تولید نوترون افزایش یافته و شار کاهش خواهد یافت.

۱-۲-۵-راه حل تکنولوژیکی مناسب

۱- Burnup

یک تکنولوژی برخاسته از راکتورهای سریع که به طور همزمان پسماند را کاهش دهد، تکثیر سلاح‌های هسته‌ای را متوقف سازد و هزینه های تولید انرژی را قابل توجیه نگه دارد، می‌تواند راه حلی ایده‌آل جهت مرتفع ساختن تنش‌های دراز مدت بیان شده در بالا باشد. تکنولوژی مورد نظر همچنین می‌تواند طول عمر مفید منابع سوخت اورانیوم را به نحوی که قابل استفاده در راکتورهای سریع با یک سیکل مصرف بسته باشد، افزایش دهد. اگر تکنولوژی جدید بتواند از توریم نیز به عنوان سوخت استفاده کند، می‌تواند منابع موجود را تا سه برابر گسترش دهد. تکنولوژی‌هایی که بتواند برخی یا همه این امور را پوشش دهد به صورت آزمایشی و نزدیک به اجرا در آمده‌اند.



شکل ۱-۳: موقعیت موج زایش و سوزش نسبت به هم

چندین طرح اولیه برای راکتورهای سریعی که در سیکل کاری آنها نیازی به فرآوری وجود ندارد، پیشنهاد شده است. راکتوری که از این تکنولوژی استفاده می‌کند، می‌تواند قدرتی معادل ۱Gw را تنها با یک دهم تا یک ششم سوخت معادل مورد نیاز در راکتورهای LWR تولید کند. می‌توان اولین فردی را که روی چنین مفهومی صحبت کرده است، Feinberg در سال ۱۹۵۸ دانست. او پیشنهاد کرد که راکتور سریع با ویژگی زایش و سوزش[۱] می‌تواند طوری طراحی شود که تنها از اورانیم طبیعی یا تهی شده به عنوان سوخت استفاده کند. افراد دیگر مانند Teller وهمکارانش نیز ایده‌ای مبنی بر استفاده از یک چاشنی کوچک اولیه از سوخت شکافنده به عنوان یک محرک که بتواند موجی را در قلب راکتور با سوخت طبیعی یا تهی شده راه اندازی کند، پیشنهاد کرده‌اند[۳،۲]. این موج ترکیبی از یک جبهه‌ی زایش و یک جبهه‌ی سوزش که به فاصله‌ی چند سانتی‌متر از هم قرار گرفته‌اند، می‌باشد. جبهه‌ی زایش جلوتر از

۱- Breed and Burn