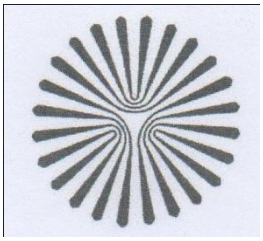


دانشگاه پیام نور

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک هسته ای

عنوان پایان نامه:

بررسی بهره انرژی همجوشی هسته ای در یک پلاسمای تبهگن

استاد راهنما:

آقای دکتر عباس قاسمی زاد

استاد مشاور:

آقای دکتر پرویز پرورش

نگارش:

شهره صیاد ماهرنیا

ماه و سال انتشار:

شهریور۸۹

تشکر و قدردانی

پیش از هر چیز خداوند متعال را شاکرم که تا این مرحله از زندگی یاریم نمود.

از جناب آقای دکتر عباس قاسمی زاد، استاد راهنمای بزرگوارم که راهنمائی ها و تشویقهای ایشان همواره باعث دلگرمی اینجانب بوده و در طی مراحل انجام این پروژه از هیچ کوششی دریغ ننمودند و همچنین از جناب آقای دکتر پرویز پرورش استاد مشاورم بابت زحماتی که در طی این پروژه متحمل شدندونیز همه اساتید محترمی که در جلسه دفاع اینجانب حضور یافتند، کمال تشکر را دارم.

در پایان لازم می دانم که از تمامی اساتید محترم گروه فیزیک دانشگاه پیام نور تهران که اینجانب در طی سالهای تحصیلم در این دانشکده، دانشجوی این عزیزان بوده ام، تشکر و قدردانی نمایم.

نام خانوادگی دانشجو: **صیاد ماهرنیا** نام : **شهره**

عنوان پایان نامه : **بررسی بهره انرژی همجوشی هسته ای در یک پلاسمای تبهگن**

استاد راهنما : **آقای دکتر عباس قاسمی زاد**

استاد مشاور : **آقای دکتر پرویز پرورش**

مقطع تحصیلی : **کارشناسی ارشد** رشته : **فیزیک** گرایش : **هسته ای** دانشگاه : **پیام نور تهران**

تاریخ فارغ التحصیلی : تعداد صفحه : ۸۷

کلید واژه ها : **همجوشی هسته ای ، همجوشی محصور شدگی لختی ، بهره انرژی ، پلاسمای تبهگن**

چکیده

بررسی بهره ی انرژی همجوشی هسته ای در یک پلاسمای تبهگن

در همجوشی محصور شدگی لختی، سوخت همجوشی هسته ای با چگالی زیاد توسط باریکه های تابشی، متراکم شده تا مواد همجوشی کننده به هم نزدیک شده و احتمال همجوشی افزایش یابد.

یکی از روش های رایج در همجوشی محصور شدگی لختی، احتراق سریع است که در مرحله تراکم پلاسمای چگال با دمای کم پدید می آید که اگر دمای نهایی به اندازه ی کافی پایین باشد، الکترون های پلاسما تبهگن می شود و باتوجه به ویژگی های پلاسمای تبهگن، می توان آن ها را تا چگالی های بسیار بالا متراکم کرد. در پلاسمای تبهگن فرمی چون دمای الکترون پایین است، اتلاف ناشی از تابش برمشترالانگ کاهش می یابد ودر نتیجه سوختن سوخت های متداول همجوشی هسته ای به ویژه سوخت انئوترونیک پروتون- بور ۱۱،موثرتر از حالت کلاسیکی صورت می گیرد. سوخت های انئوترونیک بسیار ایمن تر وپاک تر ازسایر سوخت ها هستند و این سوخت، مهم ترین کاندید برای این نوع از سیستم های ایمن است که تنها مشکل آن دمای احتراق بالاست.

تبهگنی پلاسما سبب کاهش دمای احتراق سوخت دوتریم- تریتیوم و پروتون- بور۱۱ می شود. در این پایان نامه، بهره انرژی این دو سوخت در حالت کلاسیکی و حالت تبهگن باهم مقایسه شده است.

کارهای انجام شده در این پایان نامه نشان می دهد که برقراری شرایط تبهگنی برای سوخت دوتریم ـ تریتیوم صرفا" سبب کاهش دمای احتراق آن شده ولی نقش مثبتی در افزایش بهره انرژی همجوشی ندارد ،اما برای سوخت پروتون ـ بور۱۱، حالت تبهگن سیستم می تواند علاوه بر کاهش دمای احتراق، بهره انرژی را نسبت به حالت کلاسیکی افزایش دهد.

پیشگفتار

مطالب ارائه شده در این پایان نامه در چهار فصل تدوین شده است . فصل اول شامل بیان ضرورت استفاده از انرژی هسته ای و معرفی روش های متداول استخراج این نوع انرژی می باشد و با توجه به مزایای بیان شده برای روش همجوشی هسته ای ، این روش به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل دوم به معرفی روش همجوشی محصور شدگی لختی و شناسایی پارامترهای مطرح در این شیوه که یکی از روش های همجوشی هسته ای و اساس کار ما در این پایان نامه است ، پرداخته ایم.

در فصل سوم شرایط دستیابی به پلاسمای تبهگن و تأثیر آن بر بهره انرژی دو نوع سوخت همجوشی متداول (سوخت دوتریم ـ تریتیوم و سوخت پروتون ـ بور ۱۱) به طور مفصل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

نهایتا" فصل آخر شامل نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای ادامه کار در آینده می باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: همجوشی هسته ای ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- شکافت هسته ای ۳

۱-۳- همجوشی هسته ای ٦

۱-۳-۱- سدکولنی در همجوشی هسته ای ۹

۱-۳-۲- روش های غلبه بر سدکولنی در فرآیندهمجوشی هسته ای ۱۳

۱-٤- پارامترهای مهم در فرآیند همجوشی هسته ای ۱٤

۱-٤-۱- چگالی توان همجوشی و پارامتر سیگما – وی ۱٤

۱-٤-۲- تابش ترمزی ۱٦

۱-٤-۳- بهره انرژی ۱۸

۱-۵- واکنش های همجوشی هسته ای ۱۸

۱-٦- روش های دستیابی به همجوشی هسته ای ۲۱

۱-٦-۱- همجوشی دمای پایین ۲۱

۱-٦-۲- همجوشی داغ ۲۳

فصل دوم : همجوشی محصورشدگی لختی ۲۷

۲-۱- مراحل انجام فرآیند همجوشی محصورشدگی لختی ۲۸

۲-۲- نکات دارای اهمیت در همجوشی محصورشدگی لختی ۳۰
۲-۳- کمیت های مطرح در همجوشی محصورشدگی لختی ۳۲
۲-۳-۱- زمان محصورشدگی لختی ۳۲
۲-۳-۲- کسر مصرف سوخت ۳۳
۲-۳-۳- پارامتر محصورشدگی ۳٤
۲-۳-٤- ضریب جفت شدگی موثر باریکه تابشی وانتقال انرژی درساچمه سوخت ۳٤
۲-٤- لزوم متراکم سازی سوخت ۳٤
۲-۵- ایده های موجود در همجوشی محصورشدگی لختی ۳٦
۲-۵-۱- شیوه راه اندازی مستقیم ۳٦
۲-۵-۲- شیوه راه اندازی غیر مستقیم ۳۸
۲-٦- ایده های همجوشی محصورشدگی لختی به روش راه اندازی مستقیم ۳۹
۲-٦-۱- احتراق حجمی ۳۹
۲-٦-۲- احتراق جرقه مرکزی ٤۰
۲-٦-۳- احتراق سریع ٤٤
۲-۷- مزیت ایده احتراق سریع نسبت به احتراق حجمی و احتراق جرقه مرکزی ٤٦
فصل سوم : محاسبه بهره انرژی پلاسمای تبهگن ٤۸
۳-۱- پلاسمای تبهگن ٤۹
۳-۲- نقش تبهگنی در کاهش اتلاف انرژی سیستم های همجوشی ۵۲

-۳- تحلیل پلاسمای دوتریم – تریتیوم ۵۳

۳-۳-۱- محاسبه بهره انرژی پلاسمای تبهگن دوتریوم _ تریتیوم ۵۹

۳-٤- تحلیل پلاسمای پروتون _ بور۱۱ ..... ٦۰

۳-۵- پلاسمای تبهگن پروتون _ بور۱۱ ..... ٦۲

۳-۵-۱- تعیین شرایط تبهگنی پلاسمای پروتون _ بور۱۱ ..... ٦۵

۳-۵-۲- محاسبه بهره انرژی پلاسمای تبهگن پروتون _ بور۱۱ ..... ۷۱

فصل چهارم : جمع بندی مطالب..... ۷۸

٤-۱- مقایسه عددی بهره انرژی ساچمه سوخت در حالت کلاسیکی و تبهگن ۷۹

٤-۲- نتیجه گیری..... ۸۱

٤-۳- پیشنهاداتی برای ادامه کار در آینده ۸۳

مراجع..... ۸۵

فهرست شکل ها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل(۱-۱): نمایش طرح وار یک واکنش شکافت هسته ای ۴

شکل (۱-۲): واکنش همجوشی دوتریوم _ تریتیوم ٦

شکل(۱-۳): زنجیره پروتون _ پروتون ۷

شکل(۱-٤): چرخه کربن _ نیتروژن _ اکسیژن ۸

شکل(۱-۵): انرژی پتانسیل ناشی ازنیروی کولنی و نیروی هسته ای دو پروتون ۱۰

شکل(۱-٦): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای دو هسته سنگین ۱۱

شکل(۱-۷): نمودار طرح وار پدیده تونل زنی ۱۱

شکل(۱-۸): نمودار تغییرات انرژی بستگی بر نوکلئون هسته ها برحسب عددجرمی ۱۲

شکل(۱-۹): سد کولنی برای مخلوط دوتریم - تریتیوم ۱۳

شکل(۱-۱۰): نمودار وابستگی دمایی پارامتر سیگما- وی برای سوخت های همجوشی ۱٦

شکل(۱-۱۱): پدیده تابش ترمزی ۱۷

شکل(۱-۱۲): نمودار طرح وار یک سیستم تولید انرژی ۱۸

شکل(۱-۱۳): نمودارآهنگ همجوشی ویژه برحسب دما برای تعدادی از سوخت های همجوشی..

..... ۲۱

شکل(۱-۱٤): طرح شماتیک فرآیند همجوشی کاتالیزور میونی ۲۲

شکل(۱-۱۵): محصورسازی پلاسما توسط میدان مغناطیسی ۲٤

شکل(۱-۱۶): دستگاه توکامک ۲٤
شکل(۱-۱۷): تحت تابش قرارگرفتن ساچمه سوخت همجوشی ۲۵
شکل(۲-۱): مراحل انجام واکنش همجوشی ۳۰
شکل(۲-۲): پراکندگی الکترون داغ درداخل ساچمه سوخت ۳۲
شکل(۲-۳): تابش انرژی راه انداز به ساچمه سوخت ۳۵
شکل(۲-٤): مراحل انفجار داخلی به شیوه راه اندازی مستقیم ۳۷
شکل(۲-۵): مراحل انفجارداخلی به شیوه راه اندازی غیرمستقیم ۳۸
شکل(۲-٦): نمودار توزیع یکنواخت دما وچگالی سوخت برحسب شعاع ساچمه سوخت درایده احتراق حجمی..... ٤۰
شکل(۲-۷): نمودار تغییرات دما و چگالی برحسب شعاع ساچمه درروش احتراق خارج از مرکز ٤۱
شکل(۲-۸): نمودار طرح وار تغییرات چگالی، دما و فشار برحسب شعاع ساچمه سوخت در ایده احتراق جرقه مرکزی در مدل هم فشار ٤۲
شکل(۲-۹): نمودار طرح وار تغییرات چگالی، دما و فشار برحسب شعاع ساچمه سوخت در ایده احتراق جرقه مرکزی در مدل هم چگالی ٤۳
شکل(۲-۱۰): نمودار بهره انرژی برحسب انرژی راه اندازلیزری برای دو مدل هم فشار و هم چگالی ٤۳
شکل(۲-۱۱): طرح شماتیک انجام فرآیند احتراق سریع ٤٤
شکل(۲-۱۲): ساچمه سوخت همجوشی در ایده احتراق برخوردی ٤۵

شکل(۲-۱۳): ترکیب سوخت دوتریوم- تریتیوم درایده احتراق جرقه مرکزی وایده احتراق سریع ٤٦

شکل(۳-۱): نمودار انرژی الکترون..... ۵۰

شکل(۳-۲): تغییرات کسر مصرف سوخت..... ۵۵

شکل(۳-۳): نمودارتغییرات انرژی خروجی برحسب پارامتر سیگما- وی..... ۵۷

شکل(۳-٤): نمودار وابستگی انرژی محرک به ضریب جفت شدگی موثر وشعاع ساچمه سوخت.....۵۸

شکل (۳-۵) : نمودار تغییرات بهره انرژی برحسب پارامتر..... ۵۹

شکل(۳-٦): نمودار تغییرات بهره انرژی بر حسب ضریب جفت شدگی موثر و پارامتر .....٦۰.

شکل(۳-۷): مکانیزم ارتباطی در توسعه موج همجوشی هسته ای و اتلاف انرژی الکترون ٦۲

شکل (۳-۸): مقایسه بین توان همجوشی و توان برمشترالانگ برای سوخت پروتون _ بور۱۱.....٦٤

شکل(۳-۹): نمودار تغییرات انرژی محرک برحسب ضریب جفت شدگی موثر به ازای شعاع های مختلف ٦٦

شکل(۳-۱۰): نمودار تغییرات انرژی محرک برحسب شعاع سوختن ٦۷

شکل(۳-۱۱): نمودار تغییرات انرژی محرک برحسب ضریب جفت شدگی و شعاع ساچمه سوخت ٦۷

شکل(۳-۱۲): نمودار نسبت توان گرماهسته ای به توان برمشترالانگ بر حسب دمای یونی ۷۰

شکل(۳-۱۳): نمودار نسبت توان گرماهسته ای به توان برمشترالانگ ۷۱

شکل(۳-۱٤): وابستگی کسر مصرف سوخت ۷۳

شکل(۳-۱۵): نمودار تغییرات انرژی خروجی..... ۷٤

شکل(۳-۱٦): نمودار تغییرات بهره انرژی برحسب ضریب جفت شدگی موثر ۷۵

شکل(۳-۱۷): نمودار تغییرات بهره انرژی ۷٦

شکل (۳-۱۸): نمودار تغییرات بهره انرژی برحسب ضریب جفت شدگی ۷٦

شکل(٤-۱): نمودار بهره سوخت همجوشی برحسب چگالی ۷۹

شکل(٤-۲): نمودار تغییرات آهنگ همجوشی برای پلاسمای دوتریوم- تریتیوم و پروتون- بور۱۱..... ۸۱

شکل(٤-۳): طراحی های مختلف ساچمه برای همجوشی سوخت اصلی پروتون- بور۱۱ به صورت قطاعی از کره متقارن..... ۸۳

فصل اول

همجوشی هسته ای

۱-۱- مقدمه

پیشرفت جامعه بشری با افزایش روز افزون مصرف انرژی همراه است . در دوره های اولیه ، انسان به کمک پدیده های طبیعی نظیر نور و گرمای خورشید ، امواج دریا و بادها به طریقی نیاز خود را به انرژی مرتفع می ساخت . پیشرفت بشر در زمینه علم و تکنولوژی سبب شد که زمان استفاده از انرژی های تجدید پذیر به پایان رسیده و جای خود را به استفاده از منابع تجدید ناپذیر نظیر نفت و زغال سنگ بدهد . اما از آن جا که منابع فسیلی محدود هستند ، بشر در پی یافتن منابع جدید انرژی بر آمد .شکاف موجود بین تولیدانرژی از طریق منابع فسیلی ومصرف آن ها تنها با بکارگیری انرژی هسته ای امکان پذیر شده است . استفاده از انرژی هسته ای ،نه تنها برای جبران کمبود منابع سوختی موردنیاز بشر می باشد بلکه حفظ شرایط زیست محیطی و جلوگیری از گسیل گازهای گلخانه ای را نیز به دنبال خواهد داشت [۱] .

انرژی الکتریکی یکی از اهرم های اصلی و مهم در زندگی صنعتی است و همه کشورها برای پاسخگویی به رشد سریع تقاضای برق ، به دنبال ساخت نیروگاه هایی هستند که درعین اقتصادی بودن ، نیاز این کشورها به انرژی را تأمین نمایند. درحال حاضر سه نوع نیروگاه اصلی برای تولید برق وجوددارد:

۱- نیروگاه آبی ۲- نیروگاه فسیلی ۳- نیروگاه هسته ای

نوع اول به دلیل ساختار خاصی که دارد فقط در نقاطی که دسترسی به آب های آزاد وجود دارد قابل استفاده است و نوع دوم به دلیل محدود بودن منابع سوخت های فسیلی در آینده با مشکلات جدی رو به رو خواهد شد . در نتیجه دستیابی به تکنولوژی هسته ای یکی از مهم ترین راه هایی است که کشورهای پیشرفته به دنبال آن هستند . برای به دست آوردن انرژی از این طریق ، روش های شکافت هسته ای و همجوشی هسته ای مورد بررسی قرار گرفته است .

در حال حاضر اکثر نیروگاه های هسته ای جهان از طریق شکافت تولید انرژی می کنند . از طرفی به دلیل محدود بودن منابع سوخت های هسته ای از نوع شکافت و روند افزایش مصرف انرژی در جهان ، استفاده از انرژی هسته ای از نوع همجوشی به منظور دستیابی به یک منبع انرژی تقریبا " پایان ناپذیر، اجتناب

ناپذیر شده است . با توجه به تحقیقاتی که صورت گرفته است، انرژی همجوشی هسته ای مزایایی دارد که در آینده ، ساخت نیروگاه هایی بر پایه این تکنولوژی را اقتصادی تر و ایمن تر می سازد .

۱-۲- شکافت هسته ای [۱]

به دنبال کشف نوترون توسط چادویک در سال ۱۹۳۲ میلادی ، قدم بعدی مطالعه اثرات هسته هایی بود که در معرض پرتوهای نوترونی قرار می گرفتند . فرمی و همکارانش در سال ۱۹۳٤ میلادی ، آزمایشاتی انجام دادند و عناصر مختلفی را در معرض پرتوی نوترون قرار دادند و پرتوزایی ناشی از گیراندازی نوترون را مطالعه کردند . این آزمایشات نشان داد که نوترون، سبب متلاشی شدن برخی از هسته ها می شود . هنگامی که اورانیوم را توسط نوترون مورد بمباران قرار دادند ، به عناصر رادیواکتیو جدیدی دست یافتند . بعدها در سال۱۹۳۹، دانشمندان آلمانی هان [۲] و استراسمن [۳]، اورانیوم را توسط نوترون مورد بمباران قرار دادند . آنها توسط بررسی های تحلیلی شیمی دریافتند که پس از این بمباران، عناصر رادیواکتیو جدیدی بدست می آید و چون این عناصر، سبک تر از اورانیوم بودند، باعث حیرت آنها شد. نتایج این آزمایشات ، هنگامی که منتشر شد، توجه مایتنر [٤] را به خود جلب کرد که یک فیزیکدان اتریشی بود و در تهاجم هیتلر ، مجبور به ترک کشورش شده و به سوئد فرار کرده بود ودر آنجا با فریش [٥]، کار بر روی بمباران نوترون را ادامه دادند . مایتنر و فریش نشان دادند که هسته های اورانیوم، هنگامی که نوترون جذب کنند، جدا شده و به دو هسته دیگر شکافته می شوند . همچنین آن ها دریافتند که جرم اتمی محصولات فرآیند ،برابر با جرم اتمی اورانیوم نیست . مایتنر با استفاده از فرمول تبدیل جرم به انرژی اینشتین نشان داد که این کاهش جرم به انرژی تبدیل شده است و فریش نیز این فرآیند را شکافت هسته ای نامید که یکی از راه های دستیابی به انرژی می باشد.

شکافت هسته ای ، فرآیند جداسازی هسته اتم های سنگین به دو یا چند اتم سبک تر است ، به طوری که وقتی اتم سنگین توسط نوترون بمباران می شود ، فرآیند شکافت انجام شده و مقدار زیادی انرژی به همراه

---

[۱] - Nuclear Fission
[۲] - Otto Hahn
[۳] - Fritz Strassman
[٤] - Lise Meitner
[٥] - Otto Frisch

دو یا تعداد بیشتری نوترون آزاد می گردد . این انرژی آزاد شده ناشی از اختلاف جرمی طرفین واکنش پدیده شکافت هسته ای است . (مجموع جرم های محصولات شکافت کمتر از جرم اتم سنگین اولیه است.) و این کاهش جرم توسط معادله اینشتین $E=(\Delta m)c^2$ به انرژی تبدیل می شود .

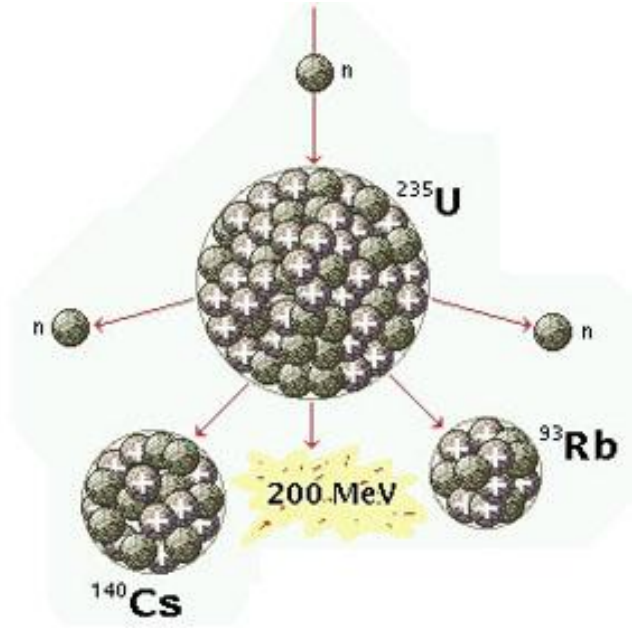
مهم ترین واکنش شکافتی که در نیروگاه های شکافت هسته ای صورت می گیرد، شکافت ایزوتوپ سنگین اورانیوم از طریق تسخیر نوترون حرارتی ($E<1eV$) در اورانیوم ـ ۲۳۵ است . در طی این فرآیند ، هسته مرکب[۶] اورانیوم– ۲۳۶ تولید می شود که در حالت برانگیخته قرار دارد و در مدت زمان کوتاهی طبق واکنش(۱–۱) به دو پاره شکافت تبدیل می شود :

$$n(thermal)+^{235}U \rightarrow {}^{236}U^{*} \rightarrow \ fission\ fragments + 200\ MeV \qquad (۱–۱)$$

واکنش شکافت، مدت های مدیدی است که به طور کنترل شده ، اقتصادی و مداوم در راکتورهای هسته ای حرارتی انجام می شود و تنها عامل محدود کننده در استفاده ازآن ، در نیروگاه های شکافت ، میزان کل اورانیوم موجود در زمین است.

عنوان شد که در نتیجه انجام واکنش شکافت هسته ای نوترون آزاد می شود ، این نوترون ها می توانند مجددا" توسط اورانیوم ـ ۲۳۵ جذب شده و فرآیند شکافت بعدی را انجام دهند . این عمل ، واکنش زنجیره ای[۷] نامیده می شود . تعداد نوترون های تولید شده می تواند کنترل شده باشد (مانند راکتورهای قدرت هسته ای) و می تواند مورد کنترل قرار نگیرد(مانند سلاح های هسته ای)[۲]. نمایش طرح وار یک واکنش شکافت در شکل(۱–۱) ارائه شده است.

[۶] - Compound nucleus
[۷] - Chain reaction



شکل(۱-۱): نمایش طرح وار یک واکنش شکافت هسته ای [۳].

اگر آهنگ واکنش زنجیره ای توانایی نگهداری فرآیندهای شکافت در یک سطح ثابت را داشته باشد، آهنگ تولید نوترون برابر آهنگ کاهش نوترون می شود و واکنش مورد نظر، بحرانی[۸] نامیده می شود. اما اگر آهنگ واکنش زنجیره ای افزایش یابد، یعنی آهنگ تولید نوترون بیشتر از آهنگ از دست دادن شود ، به آن واکنش فوق بحرانی[۹] اطلاق می گردد.

اورانیوم– ۲۳۵ یک هسته رادیواکتیو طبیعی است ، اما عنصر دیگری که در راکتورهای هسته ای

می تواند مورد استفاده قرار گیرد، توریم است که به دلیل داشتن سطح مقطع پایین، در مقایسه با اورانیوم کم ارزش تر بوده و در رقابت سوخت های هستهای تلاش کمتری برای استخراج و کاربرد آن انجام گرفته است . در مقابل این عناصر طبیعی، پلوتونیوم– ۲۳۹ و اورانیوم– ۲۳۳، هسته های رادیواکتیو تولید شده مصنوعی هستند که می توانند با جذب نوترون حرارتی، فرآیند زایش را طی واکنش های زیر انجام دهند:

$$n(thermal)+^{232}Th\rightarrow {}^{233}Th\rightarrow {}^{233}Pa\rightarrow {}^{233}U \qquad (۲-۱)$$

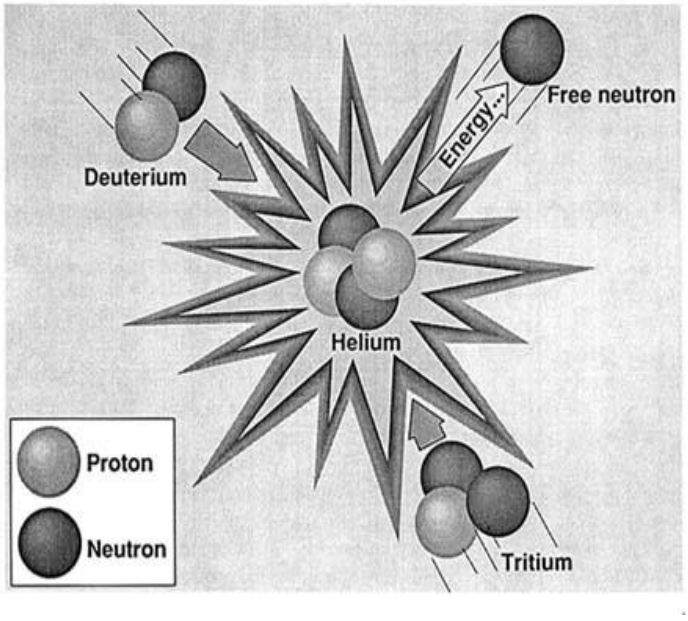
$$n(thermal)+^{238}U\rightarrow {}^{239}U\rightarrow {}^{239}Np\rightarrow {}^{239}Pu \qquad (۳-۱)$$

[۸] - Critical
[۹] - Super critical

۱-۳- همجوشي هسته ای [۱۰]

به عنوان ساده ترین تعریف در مورد همجوشی هسته ای ، می توان گفت که همجوشی هسته ای یعنی ترکیب دو یا چند هسته سبک و تشکیل یک یا چند هسته سنگین تر، که در این فرآیند ممکن است مقداری انرژی آزاد و یا مقداری انرژی برای انجام واکنش همجوشی صرف شود .

شکل زیر فرآیند همجوشی هسته ای را برای ایزوتوپ های هیدروژن نشان می دهد:



شکل (۱-۲) : واکنش همجوشی دوتریوم- تریتیوم [٤].

فرآیند همجوشی هسته ای، منشا اصلی تولید انرژی در ستارگان از جمله خورشید می باشد . در واقع در خورشید ، دما و چگالی بسیار زیاد که برای انجام هر واکنش همجوشی لازم است وجود دارد . در مرکز خورشید در دماهای ۱۰-۱۵ میلیون درجه کلوین ، توسط فرآیند همجوشی ، هیدروژن به هلیوم تبدیل می شود و به قدر کافی انرژی تولید می کند .

[۱۰] - Nuclear fusion

دو مکانیزم عمده سوختن هیدروژن در ستاره ها توسط زنجیره پروتون ـ پروتون[11] یا چرخه کربن ـ نیتروژن ـ اکسیژن[12] صورت می گیرد که در هر دو مورد ، واکنش با چهار پروتون شروع و به اتم هلیوم به عنوان محصول نهایی ختم می شود [۵] .

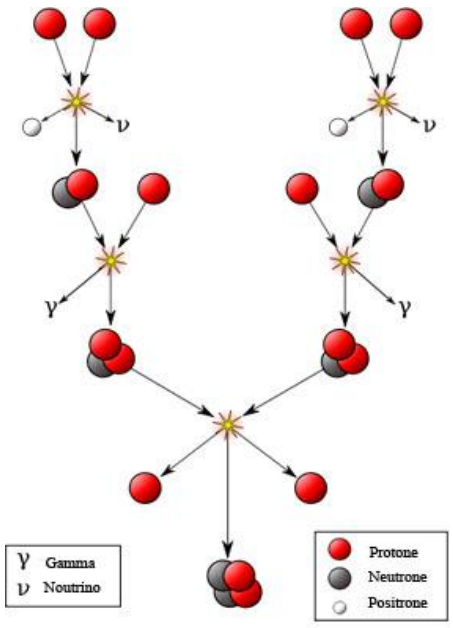
دو مکانیزم فوق به طور شماتیک در زیر نشان داده شده است:

- چرخه p-p :

$$^1H + ^1H \longrightarrow ^2H + \upsilon + e^+$$

$$^2H + ^1H \longrightarrow ^3He + \gamma \qquad (۱-۴)$$

$$^3He + ^3He \longrightarrow ^4He + 2^1H + \gamma$$



شکل (۱-۳) : زنجیره پروتون – پروتون [۶].

[11] - p-p cycle
[12] - CNO cycle