گروه فیزیک
دانشکده علوم پایه
دانشگاه مازندران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک هسته ای

موضوع:

فرآیند تولید تریتیوم در راکتور های همجوشی

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدوی

استاد مشاور:

دکتر سید محمد متولی

دانشجو:

الهام اسدی

شهریور ۹۱

سپاسگزاری

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آشکار نمایم، که هر چه گویم و سرایم ، کم گفته ام. از استاد گرامیم جناب آقای دکتر محمد مهدوی بسیار سپاسگذارم چرا که بدون راهنماییهای ایشان تامین این پایان نامه بسیار مشکل مینمود. همچنین از استاد مشاور جناب اقای دکتر سید محمد متولی نیز تشکر لازم را دارم.

تقدیم به:

خانواده عزیزم

و به تمام آزاد مردانی که نیک می اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارند.

دانشمندان، بزرگان، و جوانمردانی که جان خود را در حفظ و اعتلای این مرز و بوم فدا نموده و مینمایند.

چکیده

با توجه به اهمیت کاربرد تریتیوم به عنوان سوخت اصلی و مهم در راکتور ها ی همجوشی و به دلیل کمیاب بودن آن در طبیعت ، همواره تلاش برای تولید آن با استفاده از واکنش های همجوشی بوده است. در این پایان نامه دو موضوع در رابطه با تریتیوم مورد بررسی قرار گرفته است. اولین موضوع به بررسی چگالی تریتیوم با استفاده از ترکیب میله LiD در آب سنگین در راکتورهای قدرت پرداخته شده است ، که با استفاده از روابط مربوط چگالی تریتیوم محاسبه شده است. موضوع بعدی به منظور تامین سوخت تریتیوم به عنوان سوخت اصلی و کمیاب راکتورهای همجوشی لازم است که دیواره راکتور به گونه ای طراحی شود تا نسبت تولید تریتیوم کافی را فراهم کند. با استفاده از دیواره لیتیوم، نسبت تولید تریتیوم (TBR) در دیواره راکتور باید بزرگتر از یک باشد. محاسبات انجام شده برای پارامترهای زمان دو برابر شدن، کسر مصرف تریتیوم، بهره تزریق و زمان بازیافت پیشنهادی، مقدار نسبت تولید تریتیوم ۱/۰۴ تخمین زده می شود. این مقدار شرط تامین سوخت را برای راکتور همجوشی برآورده خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی:

تریتیوم، نسبت تولید تریتیوم(TBR) ، واکنش های همجوشی، دیواره راکتور، ترکیب لیتیوم- دوترون، لیتیوم.

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فصل ۱- همجوشی و چرخه سوخت همجوشی

۱-۱-مقدمه ۲

۱-۲-هیدروژن ۳

۱-۳-دوتریوم ۴

۱-۴- تریتیوم ۵

۱-۵-واکنش های همجوشی ۵

۱-۵-۱ - واکنش دوترون – تریتیوم(D-T) ۶

۱-۵ - ۲- واکنش دوترون – دوترون(D-D) ۷

۱-۵-۳- واکنش تریتیوم-تریتیوم(T-T) ۸

۱ – ۵ -۴ - واکنش دوترون ـ هلیوم-۳($D\text{-}^{3}He$) ۸

۱ – ۵ – ۵ - واکنش پروتون ـ بور($P\text{-}^{11}B$) ۹

۱ – ۶ – تکثیر کننده ها ۱۰

۱-۷-لیتیوم ۱۰

۱-۷-۱- ایزوتوپ های لیتیوم ۱۱

۱-۸-منابع لیتیوم ۱۱

فصل ۲- تریتیوم

۲-۱-مقدمه ۱۴

۲-۲-تشخیص تریتیوم ۱۶

۲-۳-منابع تریتیوم ۱۷

۲-۴- واکنش های تولید تریتیوم ۱۸

۲-۵- منابع تولید تریتیوم ۲۲

۲-۵-۱- راکتور های شکافت ۲۲

۲-۵-۲- راکتور های کندو ۲۲

۲-۵-۳-راکتور های شکافت تجاری ۲۳

۲-۶- کاربرد تریتیوم ۲۴

۲-۷- تریتیوم به عنوان سوخت راکتور همجوشی DT ۲۴

۲-۸-خطرات تریتیوم ۲۶

۲-۹ - آلودگی تریتیوم ۲۸

۲-۱۰مسائل ایمنی ۲۹

فصل ۳- دیواره های راکتورهای همجوشی

۳-۱-مقدمه ۳۱

۳-۲- دیواره راکتور های همجوشی فشردگی لختی (ICF) ۳۲

۳-۳-دیواره راکتور های همجوشی فشردگی مغناطیسی (MCF) ۳۳

۳-۴-محصور سازی پلاسما ۳۶

۳-۵-پخش نوترون ۳۶

۳-۶-دیواره اولیه ۳۷
۳-۷-بارگذاری دیواره ۳۹
۳-۸-تخریب دیواره توسط اتم ها ۳۹
۳-۹- تخریب دیواره توسط نوترون ها ۴۰
۳-۱۰- لایه حفاظتی پوشش ۴۱
۳-۱۱-تولید کننده تریتیوم..... ۴۲
۳-۱۲-شکافت ۴۴
۴-۱۲- راکتور های هایبرید شکافت – همجوشی ۴۴

فصل ٤ -محاسبه ی چگالی تریتیوم در ترکیب LiD در آب سنگین و دیواره راکتورهای همجوشی

۴-۱-مقدمه ۴۸
۴-۲-آب سنگین ۴۹
۴-۳-نقش میله LiDدر راکتور آب سنگین ۵۰
۴-۴-آهنگ واکنش همجوشی داخل LiD در حضور یک میدان نوترون شکافت ۵۱
۴-۵-محاسبه چگالی تریتیوم در LiD ۵۴
۴-۶- نسبت تریتیوم تولیدی ۵۷
۴-۷-کسر مصرف سوخت تریتیوم ۵۹
۴-۸-تخمین نسبت تولید تریتیوم ۶۳
۴-۹-نتیجه‌گیری و پیشنهاد ۶۸
منابع و ماخذ ۶۹

فهرست شکل‌ها

عنوان ..... صفحه

شکل۲-۱- مقایسه مقدار تریتیوم، منابع، فراوانی ۲۵

شکل۳-۱-مولفه های دیوار برای راکتور های همجوشی فشردگی اینرسی ۳۲

شکل۳ -۲-مولفه های دیوار برای راکتور های همجوشی فشردگی مغناطیسی ۳۳

شکل ۳-۳-پخش نوترون در پلاسما ۳۷

شکل۳-۴-نمایش واکنش های نوترون – هسته های مختلف در دیواره ها ۴۶

شکل۴-۱- طرح کلی از ترکیب شش ضلعیLiD با ۶ لایه ساختار ۵۰

شکل۴-۲-روند تولید نوترون های همجوشی بوسیله نوترون های کند در LiD ۵۲

شکل۴-۳- چگالی تریتیوم بر حسب زمان تابش ۵۷

شکل۴-۴- کسر مصرف سوخت بر حسب زمان محصورسازی ۶۲

شکل۴-۵- نسبت تولید تریتیوم بر حسب زمان دوبرابر شدن ۶۶

شکل۴-۶-نسبت تولید تریتیوم بر حسب زمان بازیافت..... ۶۷

فهرست جدول ها

عنوان .....صفحه

جدول۲-۱-خصوصیات تریتیوم..... ۱۵

فصل ۱

همجوشی و چرخه سوخت همجوشی

فصل ۱

همجوشی و چرخه سوخت همجوشی

۱-۱-مقدمه

از گذشته های دور بشر مایل بود به منبعی دست پیدا کند که علاوه بر آنکه بتواند مدت طولانی از آن استفاده کند بلکه تولید پسماند خطرناک نداشته باشد. اکنون بشر خود را آماده می کند تا با ساخت اولین راکتور های گرما هسته ای[۱] (همجوشی هسته ای) آرزوی نیاکان خود را تحقق بخشد، که دارای سوختی پاک و ارزان به نام هیدروژن که انرژی تولیدی آن زیاد و پسماندی بسیار پاک به نام هلیوم است، می باشد. یک تعریف ساده و پایه ای از همجوشی[۲] عبارت است از فرو رفتن هسته های چند اتم سبکتر و تشکیل

[1]Thermonuclear Reactor
[2]Fusion

یک هسته سنگین تر مانند واکنش همجوشی که در خورشید رخ می دهد. در این واکنش چهار اتم هیدروژن با یکدیگر برخورد می کند و تبدیل به یک اتم هلیوم می شود.

$$4\ {}_1^1H + 2e \rightarrow {}_2^4He + 27.05\ MeV \qquad (۱-۱)$$

اگر بتوان از چنین واکنشی در زمین استفاده کنیم جای بسیار خرسندی است چرا که هیدروژن در زمین به اندازه کافی یافت می شود و محصول واکنش ،هلیوم، گازی بی اثر و پایدار است. با توجه به اثر بارز خورشید بر روی سیارات، می توان گفت وقوع همجوشی هسته ای در خورشید است. پس جای شگفتی نیست که انسان برای بهره برداری از این نوع انرژی و کشف آن تلاش کند[۱].

۱-۲-هیدروژن

هیدروژن یکی از عناصر جدول تناوبی است که با حرف H و عدد اتمی یک نشان داده شده است. این عنصر نقش بسیار حیاتی در تامین انرژی جهان از طریق واکنش پروتون ـ پروتون و چرخه کربن نیتروژن به عهده دارد. این عنصر به مقدار زیاد در ستارگان و سیارات غولهای گازی یافت می شود. هیدروژن دارای سه ایزوتوپ می باشد. فراوان ترین ایزوتوپ آن هیدروژن معمولی یا پروتون نام دارد. این ایزوتوپ دارای عدد جرمی یک و فاقد نوترون می باشد. پروتون شامل۹۹/۹۸ درصد از هیدروژن معمولی است. ایزوتوپ بعدی دوتریوم[1] نام دارد که آن را هیدروژن سنگین نیز می خوانند. این ایزوتوپ دارای عدد جرمی دو، یک پروتون و یک نوترون است. این عنصر را با علامت اختصاری D نشان می دهند. دوتریوم شامل ۰/۰۱۵درصد از هیدروژن طبیعی می باشد. تریتیوم[2] سومین ایزوتوپ هیدروژن است که دارای عدد جرمی سه، یک پروتون

[1]Deuterium
[2]Tritium

و دو نوترون می باشد. تریتیوم را با علامت اختصاری T نشان می دهند و همچنین عنصری پرتوزاست[۲]. ایزوتوپ های کمیاب هیدروژن هر یک کاربرد ویژه‌ای دارند. دوتریوم در واکنش‌های شکافت هسته‌ای به عنوان کُند کننده در کاهش حرکت نوترون‌ها کار می‌کند و در واکنش‌های همجوشی هسته‌ای کاربرد دارد. ترکیب های دوتریوم در پژوهش‌های زیست شناسی و شیمی درباره تاثیرات ایزوتوپ‌ها مورد نیازند. تریتیوم که در راکتورهای هسته‌ای پدید می‌آید، در ساخت بمب‌های هیدروژنی مورد نیاز است. تریتیوم یک ایزوتوپ طبقه بندی شده در علوم زیستی است و به عنوان یک منبع تابنده در رنگ‌های نورانی کاربرد دارد[۳].

۱-۳-دوتریوم

هیدروژن موجود در زمین شامل دوتریوم به نسبت جرمی ۱:۵۰۰۰ است. دوتریم در واکنش های همجوشی زیر با آهنگ واکنش[1] مساوی شرکت می کند:

$$D + D \rightarrow {}_{2}^{3}He + {}_{0}^{1}n + 3.27\ MeV \qquad (۲-۱)$$

$$D + D \rightarrow T + {}_{1}^{1}H + 4.03\ MeV \qquad (۳-۱)$$

اگر در مولکول آب دوترون جایگزین یکی از هیدروژن ها شود، تبدیل به آب سنگین[2](D_2O) می شود. کاربرد آب سنگین در نیروگاه های اتمی جهت خنک کردن راکتور ها است، چون گرمای تبخیر آب سنگین بیشتر از آب معمولی است به همین دلیل می تواند برای این کار بهتر عمل کند.

[1] Reaction Rate
[2] Heavy Water

جدا کردن آب سنگین از آب سبک به علت نزدیک بودن خواص آنها بسیار سخت است. دوتریوم باید تغلیظ و انبار شود تا ابتدا به آب سنگین ۱۵ درصد و سپس به آب ۹۹ درصد تبدیل شود. دوتریوم در آب دریا با غلظت ۱۵۸ppm و در دیگر آب ها ۱٤۰ppmوجود دارد. در هر لیتر آب دریا ۳۵ گرم دوتریوم وجود دارد. دوتریوم موجود در $۱۰^{۲۰}$ لیتر از آب های روی زمین می تواند Q $۷/۵\times۱۰^{۹}$ انرژی همجوشی تولید کند. این انرژی برای رفع احتیاجات $۱۰^{۱۰}$ سال انسان کفایت خواهد کرد. از منابع دیگری که می توان برای دوتریوم نام برد اقیانوس های جهان، رودخانه ها و دریاچه های آب شیرین است[٤].

۱-٤-تریتیوم

تریتیوم ماده رادیواکتیو پخش کننده بتا است.

$$T \rightarrow {}^{3}He + \bar{e} + \bar{\nu_e} \qquad (۴-۱)$$

تریتیوم دارای نیمه عمر ۱۲/۳۲ سال و آهنگ واپاشی $۱۷/۸ \times ۱۰^{-۹}$ بر ثانیه است. بیشینه انرژی تابش بتا ، ۱۸/٦KeV و مقدار متوسط انرژی آن ۵/۷KeV است. این ویژگی ناپایداری هسته ای به دلیل دو مشخصه مهم تریتیوم است: به طور طبیعی نادر است و یک ماده رادیواکتیو می باشد. مقدار طبیعی تریتیوم نزدیک به ۲۰ کیلوگرم در اقیانوس ها و اتمسفر است که توسط واکنش های پرتو های کیهانی تولید می شود[۵].

۱-۵- وا کنش ها ی همجوشی

با توجه به فرآیند های طبیعی و نتایج حاصل از آنها، مشخص شده است که واکنش های همجوشی بسیاری

وجود دارد. برای این واکنش های همجوشی باید مفاهیم آهنگ واکنش همجوشی، سطح مقطع و واکنش پذیری (سیگما ـ وی) درک شود. تعداد برخورد در واحد زمان در واحد حجم را آهنگ واکنش همجوشی می نامند که با R_{fu} نشان داده می شود. آهنگ واکنش همجوشی طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$R_{fu} = N_a N_b \langle \sigma v \rangle_{ab} \qquad (۵-۱)$$

$< \sigma v >_{ab}$ ،(سیگما ـ وی)[1] ، واکنش پذیری نام دارد که احتمال برهمکنش در واحد زمان در واحد چگالی هسته تعریف می شود. واکنش پذیری تابع دما و به نوع واکنش های همجوشی بستگی دارد. به شرط بزرگ بودن آهنگ واکنش مقادیر قابل استفاده ای از انرژی همجوشی تولید خواهد شد. آهنگ واکنش زمانی بزرگ است که سیگما ـ وی بزرگ باشد[٦]. احتمال وقوع واکنش به ازای هر جفت ذره را با پارامتری به نام سطح مقطع[2] معرفی می کنند. سطح مقطع‌ها بر حسب بارن[3] بیان می‌شوند. یک بارن با علامت b برابر با $10^{-24}cm^2$ می‌باشد. در ابتدا واکنش بین ایزوتوپ های هیدروژن، دوتریوم و تریتیوم، را که مهمترین موضوع برای تحقیقات همجوشی است را بررسی می کنیم:

۱-۵-۱- واکنش دوترون - تریتیوم(D-T) :

$$D + T \rightarrow {}^4He\ (3.5\ MeV) + n\ (14.1\ MeV) \qquad (٦-۱)$$

واکنش D-T یکی از واکنش ها ی همجوشی با بیشترین سطح مقطع است. مقدار بیشینه سطح مقطع آن ۵ بارن برای انرژی حدود ٦٤KeV می باشد.

[1] Sigma-Vee
[2] Cross-Section
[3] Barn

۱-۵-۲- واکنش دوترون – دوترون(D-D):

$$D + D \rightarrow T\ (1.01MeV) + P\ (3.03MeV) \qquad (۷-۱)$$

$$D + D \rightarrow {}^{4}He(0.82\ MeV) + n\ (2.45\ MeV) \qquad (۸-۱)$$

این واکنش از طریق دو کانال واکنش جدا همجوشی می کند که مقدار سیگما ـ وی برای هر دو واکنش تقریبا برابر است. سطح مقطح بیشینه در واکنش اول و دوم به ترتیب ۰۹۶/ و۰/۱۱ بارن است. در محدوده انرژی متوسط KeV ۱۰۰ –۱۰، سطح مقطع برای هر کدام از آن ها حدود ۱۰۰ مرتبه کوچکتر از واکنش DT است[۷]. از این دو واکنش در می یابیم که خواص واکنش DT مطلوب تر از خواص واکنش DD است. زیرا واکنشDT سطح مقطعی بالاتر از واکنش DD دارد. این بدان معنی است که هنگامی که یون های برهمکنش نزدیک هم هستند، احتمال واکنش DT بیشتر از واکنش DD است که باعث می شود شرایط همجوشی راحت تر انجام شود. از طرفی قله[1] آهنگ واکنش در ۱۳/٦KeV، برای واکنش DD کمتر از ۱۵KeV است. دیواره ای که برای تولید تریتیوم در راکتور استفاده می شود، دیواره لیتیوم[2] است. همان طور که اشاره شد تولید تریتیوم به طور طبیعی نمی تواند در زمین رخ دهد؛ در نتیجه نیاز است به طور مصنوعی تولید شود. برای انجام این کار دیواره راکتور توسط نوترون های واکنش بمباران می شود. لیتیوم با نوترون ها واکنش می دهد و تریتیوم را به عنوان سوخت راکتور تولید می کند. همچنین تریتیوم برخی نگرانی های گسترش سلاح های هسته ای را در بر دارد.

[1] Peak
[2] Lithium Blanket

نکته بعدی این است که نوترون ۸۰ درصد از انرژی را حمل می کند. این بدان معنی است که تنها ۲۰ درصد از کل انرژی همجوشی شانس ماندن در پلاسما دارد، در نتیجه رسیدن به احتراق دشوار خواهد بود. همچنین شار تابش نوترونی از راکتور ها بسیار شدید است. در نتیجه برای طراحی یک راکتور معرفی این مشکلات مهم است[۸].

۱-۵-۳-واکنش تریتیوم-تریتیوم(T-T)

$$T + T \rightarrow {}^{4}He + 2n + 11.3MeV \qquad (۹-۱)$$

بیشینه سطح مقطع واکنش ۰/۱۶بارن است. این واکنش دارای سطح مقطعی قابل مقایسه با واکنش DD است.

حال به بررسی واکنش های بین ایزوتوپ های هیدروژن و هسته های سبک مانند هلیوم، لیتیوم و بور می پردازیم. در زمینه تحقیقات همجوشی ترکیب هیدروژن و عناصرسبک دیگر را سوخت های همجوشی پیشرفته می نامند. برای این گروه از واکنش ها سطح مقطع در انرژی نسبتا پایین، کوچک است و در انرژی های بالا سطح مقطع ها مقداری بین واکنش DD و واکنش DT دارد.

۱-۵-٤-واکنش دوترون ـ هلیوم-۳ ($D-{}^{3}He$):

$$D + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He\ (3.6\ MeV) + P\ (14.7MeV) \qquad (۱۰-۱)$$

در این واکنش دوترون با سبک ترین ایزوتوپ هلیوم واکنش می دهد. این واکنش نسبت به واکنش DD دارای مزایایی است، این واکنش شامل سوخت رادیو اکتیو نیست و هم چنین یک واکنش نوترونیک است . به عبارت دیگر در مسیر واکنش همجوشی هیچ نوترونی تابش نمی کند، در نتیجه تابش نوترون به طور چشمگیری کاهش می یابد که می تواند به معنای یک محافظ خیلی ارزان برای راکتور استفاده شود زیرا تابش های نوترونی باعث تخریب دیواره راکتور می شوند. قله آهنگ واکنش، در ۵۸KeV است که در دماهای خیلی بالا در مقایسه با واکنش DD و DT است[۸]. تولید هلیوم -۳ بسیار سخت است؛ در حال حاضر می توان آن را محصولی از راکتور های شکافت[1] دانست، زیرا تریتیوم تولید شده در راکتور های شکافت به طور طبیعی بعد از مدتی به هلیوم -۳ واپاشی می کند.

۱- ۵-۵- واکنش پروتون ـ بور($P\text{-}^{11}B$):

$$P + {}^{11}B \rightarrow 3\,{}^{4}He + 8.6\ MeV \qquad (۱۱-۱)$$

این واکنش نیز مانند واکنش $D\text{-}^{3}He$ یک واکنش نوترونیک است وشامل هیچ سوخت رادیو اکتیوی نیست و تنها منجر به انتشار ذرات باردار می شود. نوترون تابش شده در این واکنش حدود۰/۰۰۱ تخمین زده شد و این بدان معنی است که برای هر هزار واکنش همجوشی ، یک نوترون ساطع خواهد شد. سوختی قابل دسترس است ومقدار زیادی از آن موجود است. تنها یک نقطه ضعف عمده در این چرخه سوخت وجود دارد و آن انرژی بسیار بالای آن است. قله آهنگ واکنش در این چرخه ۱۲۳KeV است[۸].

[1] Fission Reactor

۱-٦- تکثیر کننده[1] ها :

برای تولید نوترون های همجوشی می توان از واکنش های تکثیر نوترونی(n , xn) استفاده کرد:

$$n + {}^{A}Z = xn + {}^{A-x+1}Z \qquad x > 1 \qquad (۱۳-۱)$$

این واکنش ها می تواند علاوه بر نوترون برای تولید تریتیوم، یک نوترون اضافه نیز تولید کند. این نوترون های اضافه برای اهداف دیگر مورد استفاده قرار می گیرد. این نوترون ها ممکن است برای تولید سوخت شکافت پذیر مورد استفاده قرار گیرد، یعنی با تسخیر نوترون ها توسط هسته ها ی قابل شکافت، هسته های شکافت پذیر تولید کند. از تکثیر کننده های نوترونی می توان به واکنش های Pb(n , 2n) Be(n , 2n) و $^{7}Li(n ,´n)$ نام برد. این تکثیر کننده ها در محلی نزدیک به قلب راکتور همجوشی قرار می گیرند و جمعیتی از نوترون های حاصل از همجوشی با انرژی زیاد را تولید می کنند. واکنش Be(n,2n) دارای سطح مقطعی بالاست و باعث افزایش قابل توجهی از نوترون در دیواره راکتور همجوشی می شود[٦].

۱-۷-لیتیوم :

لیتیوم فلزی قلیایی، عدد اتمی ۳ و در گروه اول جدول تناوبی قرار دارد. در حالت خالص فلزی نرم و به رنگ سفید خاکستری است و در معرض هوا و آب به سرعت اکسید شده و کدر می شود.

[1] Multiplier