بسم الله الرحمن الرحيم

٢٧٤٦٣

۱۳۷۸ /۱۰/ ۱۶

دانشگاه ارومیه

مرکز اطلاعات علمی ایران
تقدیم به دانشگاه

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد رشتهٔ فیزیک

عنوان :

معرفی طراحی‌های مختلف ساچمه‌های سوختی پیشرفته و محاسبه شرایط جوش و گداخت ساچمه‌های هیدروژن - بور

استاد راهنما :

جناب آقای دکتر رسول خدابخش

نگارش :

بابک مالکی‌نیا

4772

۲۱۴۶۳

تابستان ۱۳۷۸

تقدیم به :

عزیزترین گوهرهای زندگی

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

لم یشکر المخلوق یشکر الخالق

قدردانی :

سپاس خداوند منان که ذکر او آرایش گفتار است و مهر او زیبندهٔ رفتار.

وظیفهٔ خودم می‌دانم که از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر رسول خدابخش به عنوان استاد راهنمای پایان‌نامه، هم به خاطر زحمات فراوان در انجام تحقیقات و هم به عنوان معلم نمونهٔ اخلاق از ایشان بهره گرفتم و با راهنمایی‌های ایشان موفق به اتمام رسانیدن این دوره شدم سپاس خود را ابراز دارم.

جا دارد از پدر بزرگوارم که همیشه مشوق و پشتوانهٔ گرم من در ادامهٔ تحصیلاتم بوده از صمیم قلب تشکّر و قدردانی نمایم.

از همه اساتیدی که در طول تحصیل از حضور مبارکشان استفاده نموده‌ام و همچنین از هیئت محترم داوران که داوری این پایان نامه را تقبل نموده و از ارائه نظرات خویش دریغ نداشته‌اند تشکّر می‌نمایم.

از دوست عزیزم آقای مهندس محمدرضا کولیوند که مرا در امر به ثمر رساندن این پایان نامه کمک فراوانی کرده‌اند کمال تشکّر را دارم.

از مؤسسه تایپ و طراحی نگار که زحمت تایپ این پایان‌نامه را تقبل نمودند نهایت تشکر را دارم.

بابک مالکی‌نیا

عنوان صفحه

فصل اوّل :

ساختار سوخت ها

مقدمه ۱

۱-۱- معرفی سوخت‌های هسته‌ای ۲

۱-۱-۱- واکنش گرما هسته‌ای سوخت $D - T$ ۳

۱-۱-۲- واکنش گرما هسته‌ای سوخت $D - {}^{3}He$ ۴

۱-۱-۳- واکنش گرما هسته‌ای سوخت $H - {}^{11}B$ ۵

۱-۲- طراحی ساچمه‌های سوختی ۶

۱-۲-۱- محاسبهٔ کسر مصرفی سوخت ۸

۱-۲-۲- انرژی مورد نیاز برای همجوشی ۹

۱-۲-۳- طراحی ساچمه های سوختی برای رسیدن به فشار مناسب ۱۱

۱-۳- طراحی ساچمه‌های سوختی با احتراق دهنده داخلی ۱۸

۱-۳-۱- مشخصات ساچمه سوختی $D - D$ / احتراق دهنده $D - T$ ۱۹

۱-۳-۲- مشخصات ساچمه سوختی $D - {}^{3}He$ / احتراق دهنده $D - T$ ۲۱

۱-۳-۳- *AFLINT* با بهره بالا ۲۲

۱-۳-۴- پیشنهاد طرح برای رسیدن به شرایط جوش و گداخت $H - {}^{11}B$ ۲۳

فصل دوّم :

روش‌های مختلف جوش هسته‌ای

۲-۱- مفاهیم اصلی همجوشی هسته‌ای ۲۷

۲-۱-۱- ضابطهٔ لوسن ۲۸

۲-۱-۲- دافعهٔ الکترواستاتیکی ۲۹
۲-۲- همجوشی در میدان مغناطیس ۳۳
۲-۲-۱- حرکت ذره تحت میدان الکتریکی یکنواخت ۳۴
۲-۲-۲- حرکت ذره تحت میدان مغناطیسی یکنواخت ۳۴
۲-۲-۳- حرکت تحت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ۳۷
۲-۲-۴- نیروی وارد بر ذره در میدان مغناطیسی ناهمگن متغیر با فضا (تابع مکان) .. ۳۹
۲-۲-۵- پلاسما به عنوان سیّال ۴۲
۲-۲-۶- فشار جنبشی و مغناطیسی ۴۴
۲-۲-۷- ناپایداری نوع سوسیسی ۴۷
۲-۲-۸- ناپایداری نوع کینک ۴۹
۲-۲-۹- توکامک ۵۲
۲-۲-۱۰- گرمایش پلاسما ۵۴

فصل سوّم:

همجوشی در میدان لختی (ICF)

۳-۱- همجوشی از راه فشردگی لختی ۵۹
۳-۲- مدل‌های جوش هسته‌ای در میدان لختی ۶۰
۳-۳- فرضیهٔ ریاضی انبساط ۶۲
۳-۳-۱- رابطهٔ دما ۶۳
۳-۳-۲- سرعت انبساط ۶۵
۳-۳-۳- میزان واکنش ۶۶
۳-۳-۴- انرژی حاصل از همجوشی ۶۸

۳-۳-۵- بهره همجوشی ۶۹

فصل چهارم:

محاسبه و بررسی بهره‌های جوش و گداخت سوخت پیشرفته هیدروژن - بور با استفاده از مدل حجمی محصورسازی لختی

۴-۱- خصوصیات گداخت حجمی ۷۵

۴-۲- شرایط جوش و گداخت حجمی ساچمه $H - {}^{11}B$ ۷۷

۴-۳- محاسبهٔ بهره‌های سوخت $H - {}^{11}B$ با استفاده از مدل گداخت حجمی ۷۸

۴-۴- بهره‌های بهینه گداخت حجمی $H - {}^{11}B$ ۷۹

۴-۵- بیان و نتیجه ۸۰

۴-۶- نتیجه‌گیری و پیشنهاد ۸۵

منابع ۹۶

چکیده

چکیده :

به منظور رسیدن به انرژی مؤثر و تمیز مزیت‌های کاربرد سوخت‌های پیشرفته برای گداخت در چند سال اخیر شناخته شده‌اند.

ایمنی و حفظ محیط‌زیست دو مسئله مهم هستند. برای اجتناب از تریتیوم رادیواکتیو و رادیواکتیویتهٔ نامطلوب ایجادشده توسط نوترون‌های تولیدشده (بیشتر برای زایش تریتیوم در لیتیوم اطراف واکنش که نوترون جذب لیتیوم می‌شود به کار خواهد رفت) یک واکنش همجوشی هسته‌ای خیلی تمیز، $H - {}^{11}B$ می‌باشد.

از زمانی که گداخت لیزری DT با پالس‌های لیزری $10\ MJ$ و انرژی خروجی $10^{3}\ MJ$ به تحقق پیوست حالا راه‌حل‌های فیزیکی مناسبی برای یک نیروگاه اقتصادی انرژی همجوشی پیشنهاد می‌شود که واکنش گرما هسته‌ای $H - {}^{11}B$ می‌باشد. با این حال این واکنش خیلی مشکل است.

شرایط واکنش گداخت هسته‌ای خیلی تمیز $H - {}^{11}B$ بوسیلهٔ محصورسازی در میدان لختی برای نیروگاه‌ها با مدل احتراق حجمی فقط در تراکم‌هایی با 10^{5} الی 10^{6} برابر چگالی حالت جامد خواهد رسید. شرایط به دست آورده شده نشان می‌دهد که واکنش‌های ICF کنترل شده در آینده با به کار بردن سوخت گداخت هسته‌ای تمیز $H - {}^{11}B$ ممکن خواهد بود. اما امکان‌پذیر بودن سوختن $H - {}^{11}B$ محتمل است وقتی که دمای احتراق ساچمه $H - {}^{11}B$ بوسیلهٔ قرار دادن یک مغز کوچک شامل $D - T$ داخل لایه سوخت اصلی $H - {}^{11}B$ (ساچمه سوختی $H - {}^{11}B$ / احتراق‌دهنده DT) یا یک لایه نازک شامل $D - T$ اطراف سوخت اصلی $H - {}^{11}B$ و یا مخلوط یکنواخت H, B, D, T با نسبت‌های مساوی کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر به طور عددی مشاهده می‌شود که بهره با افزایش چگالی کاهش می‌یابد (رفتار افت). علت آن بررسی و آشکار شده است : مکانیزم توان توقف وابسته به مدل تجمعی گابور که مربوط به برد آن در حد طول‌های دبای کوچک در چگالی‌های زیاد است.

« فصل اول »

ساختار سوخت‌ها

فصل اوّل

ساختار سوخت‌ها

مقدمه :

از آنجائی که امروزه انرژی‌های تولید شده در جهان توسط منابع طبیعی مانند زغال و نفت و غیره برای نیازهای روزمره کافی نیست، بشر را وادار می‌کند که از طرق مختلف به این نیاز دست یابد. به عنوان مثال از طریق واکنش‌های شیمیایی گرمازا می‌توان انرژی فراهم نمود. در پی واکنش‌های شیمیایی واکنش‌های هسته‌ای مورد توجه قرار گرفت که انرژی آزاد شده از طریق واکنش‌های شیمیایی و یا به عبارتی انرژی شیمیایی که منابع طبیعی ذکر شده را هم در برمی‌گیرد هم باعث آلودگی محیط شده و هم کافی نمی‌باشد و با پیشرفت تکنولوژی و صنعت در حال حاضر و مخصوصا" در آینده نیاز خیلی بیشتری به انرژی وجود خواهد داشت. بنابراین واکنش‌های هسته‌ای انرژی قابل ملاحظه‌ای را تولید نموده که قرن‌ها نیاز انسان را برآورده می‌کند و همچنین باعث آلودگی محیط نمی‌شود. متأسفانه در جهت افزایش قدرت نظامی هم رقابت برای دستیابی به انرژی‌های هسته‌ای بیشتر شده است.

با مطالعاتی که انجام شده هم از طریق شکافت [1] و هم از طریق همجوشی می‌توان به انرژی

1- Fission

هسته‌ای دست یافت که انرژی شکافت هسته‌ای از شکافته شدن هسته‌های سنگین به هسته‌های سبک‌تر و انرژی جوش [۱] و گداخت از جوش خوردن هسته‌های سبک به وجود می‌آید. در واکنش‌های شکافت پاره‌های شکافت [۲] به شدت رادیواکتیو که جاذب نوترون‌ها نیز می‌باشند تولید می‌شود. برخی از این مواد نیمه عمر طولانی دارند و برای حفظ قدرت نیروگاه [۳] لازم است از چرخهٔ سوخت خارج شود. نگهداری این مواد که به پسماند مواد معروف است مستلزم صرف هزینه زیاد و ایجاد شرایط محیطی خاصی دارد، از طرفی چون انرژی حاصل از واکنش‌های گداخت و جوش نسبت به واکنش‌های شکافت خیلی بزرگ می‌باشد و مسئله آلودگی محیط زیست توسط واکنش‌های جانبی [۴] نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای در مقایسه با نیروگاه‌های شکافت قابل چشم پوشی است لذا اخیرا" به استفاده از نیروگاه‌های جوش توجه خاصی داده شده است.

۱-۱- معرفی سوخت‌های جوش هسته‌ای

جوش هسته‌ای را می‌توان به عنوان فرایند عکس شکافت هسته‌ای قلمداد کرد. در جوش هسته‌ای مانند شکافت مجموع جرم‌های هسته‌های جوش کننده از مجموع جرم‌های محصولات جوش کمی بیشتر است.

واکنش‌های جوش هسته‌ای ایزوتوپ‌های هیدروژن با آهنگی بیشتر نسبت به بقیه انجام می‌گیرد.

(۱-۱) : الف $${}^{2}_{1}D + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{3}_{1}T + {}^{1}_{1}H + 4.03\,Mev$$

(۱-۱) : ب $${}^{2}_{1}D + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{3}_{2}He + n + 3.27\,Mev$$

احتمال وقوع دو واکنش بالا تقریبا" باهم برابر است. امّا آهنگ واکنش دوتریم - تریتیوم که در

1- Fusion
2- By - Product
3- Reactor
4- Secondary

زیر آمده خیلی بیشتر از واکنش‌های بالا است.

$$^{2}_{1}D + ^{3}_{1}T \rightarrow ^{4}_{2}He + n + 17.6\,Mev \qquad (۱-۲)$$

همان طور که دیده می‌شود انرژی آزاد شده از واکنش همجوشی دوتریم - تریتیوم بیشتر از واکنش‌های دوتریم - دوتریم است (۵).

واکنش دیگر، جوش $D - ^{3}He$ می‌باشد علی رغم اینکه سطح مقطع [1] واکنش کوچک است انرژی حاصل از جوش نسبت به سوخت‌های دیگر بیشتر می‌باشد.

$$^{2}_{1}D + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{1}H + 18.4\,Mev \qquad (۱-۳)$$

۱-۱-۱- واکنش گرما هسته‌ای سوخت $D - T$

در واکنش $D - T$ انرژی حاصل از جوش همانند سایر واکنش‌ها بین محصولات جوش تقسیم می‌شود. با توجه به قوانین بقای اندازه حرکت و انرژی جنبشی، انرژی جنبشی نوترون و ذرهٔ آلفا را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$m_\alpha \vec{v}_\alpha + m_n \vec{v}_n = 0 \qquad (۱-۴)$$

$$\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^{\,2} + \frac{1}{2} m_n v_n^{\,2} = \frac{1}{2} m\, v^{\,2} = 17.6\,Mev \qquad (۱-۵)$$

با توجه به اینکه ذرات واکنش کننده دارای اندازه حرکت و انرژی جنبشی ناچیزی نسبت به مقدار انرژی آزاد شده هستند می‌توان نوشت :

$$E_n = \left(\frac{m_\alpha}{m_\alpha + m_n}\right) \times Q = 14.1\,Mev \qquad (۱-۶)$$

$$E_\alpha = \left(\frac{m_n}{m_\alpha + m_n}\right) \times Q = 3.5\,Mev \qquad (۱-۷)$$

Q انرژی حاصل از واکنش و در اینجا مساوی با $17.6\,Mev$ است (۲۴).

برای انجام واکنش باید دمای $D - T$ را به حدی رساند که بتوان بر سد کولنی آنها غلبه کرد، در

1- *Cross section*

این واکنش همان طوری که ملاحظه شد نوترون هایی با انرژی جنبشی $14.1\ Mev$ رها می‌شوند، این نوترون‌ها پس از خارج شدن از ساچمه‌های سوختی که همراه با کاهش انرژی می‌باشد، با سرد کننده و همچنین با ساختار اتاقک نیروگاه برهم کنش می‌کنند. این برهم کنش‌ها مشکلاتی را برای اجزاء نیروگاه جوش ایجاد می‌کند و در نهایت به آن صدمه می‌زند که با ساختن چند لایه‌ای سوخت‌ها و انتخاب درست مواد به گونه‌ای که اشاره خواهد شد نوترون‌های حاصل و در پی آن برهم کنش‌ها به حداقل کاهش می‌یابند (۷).

مسئله دیگر مشکل تریتیوم می‌باشد که باید برای شرکت دوباره در واکنش $D-T$ در نیروگاه توسط پوشش‌زایشی [1] لیتیوم تولید شود. امّا مشکلات ایمنی و زیست محیطی مطرح می‌شود و چون تریتیوم به صورت طبیعی یافت نمی‌شود و به علّت رادیواکتیویته بودن آن، در دماهای بالا به میزان زیاد پخش می‌شود بنابراین سعی می‌شود میزان نشت تریتیوم کاهش یابد (۷).

با توجه به موارد بالا مشکلات مربوطه را می‌توان با استفاده از سوخت $D-{}^3He$ برطرف نمود.

۱-۱-۲- واکنش گرما هسته‌ای سوخت $D-{}^3He$

$D-{}^3He$ یکی از سوخت‌هایی است که تقریباً" نوترون آزاد نمی‌کند و از آن به عنوان سوخت غیر نوترونی ذکر می‌شود، متأسفانه ده درصد انرژی گداخت را نوترون‌های حاصل از واکنش‌های جانبی $D-D$ که در مخلوط $D-{}^3He$ اتفاق می‌افتد حمل می‌کنند. می‌توان نوترون‌های حاصل را به روش قطبش اسپینی کاهش داد. بنابراین $D-{}^3He$ نظیر واکنش‌های غیر نوترونی است که یک درصد انرژی آزاد شده به نوترون‌ها منتقل می‌شود (۷).

برخلاف اینکه واکنش $D-{}^3He$ مزیت‌های زیادی دارد فقدان ${}^3He$ به صورت یک منبع

1- Blanket

طبیعی مشکل اساسی می‌باشد. یکی از منابع He^{3} اتمسفر زمین می‌باشد امّا فقط در هر میلیون اتم در حجم معینی از هوا فقط پنج اتم هلیوم وجود دارد و در هر میلیون اتم هلیوم فقط *1.4* آن اتم He^{3} می‌باشد. بمباران نوترونی دوتریم در یک راکتور منبع بهتری به نظر می‌رسد ولی آن هم مستلزم تکنولوژی پیچیده‌ای می‌باشد. واپاشی تریتیوم توسط تجهیزات هسته‌ای چند کیلوگرم در سال هلیوم تولید خواهد کرد که کافی نمی‌باشد. منابع خارج از زمین امیدوار کننده و فراوان هستند امّا بهره‌برداری از آنها مشکلات زیادی دارد. مطالعات مون راکس [۱] (*1987*) نشان داد که سطح ماه حجم زیادی از هلیوم دارا می‌باشد که نتیجه بمباران توسط بادهای [۲] خورشیدی به وجود می‌آید. پیشنهاد شده که اگر استخراج، تصفیه و مراحل جداسازی ایزوتوپ‌ها در ماه واقع شود و یک انتقال فضایی مجهز و بی‌عیبی انجام شود هلیوم به صورت کافی دریافت خواهد شد (۶).

به طور کلّی تولید He^{3} بسیار پیچیده خواهد بود و مانند یک منبع طبیعی روی زمین مقرون به صرفه نیست. تحقیقات برای تهیه اقتصادی He^{3} به مقدار مورد نیاز نیروگاه‌های جوش در حال انجام است. موفقیت در این امر باعث سرعت بخشیدن در ساخت نیروگاه‌های جوش هسته‌ای با استفاده از ساچمه‌های سوختی $D - He^{3}$ خواهد شد.

۱-۱-۳- واکنش گرما هسته‌ای سوخت $H - B^{11}$

به منظور اجتناب از تریتیوم رادیواکتیو و نوترون‌های واکنش‌زا (که اغلب نوترون‌ها جذب لیتیوم موجود در اطراف واکنش شده و باعث زایش تریتیوم می‌شود) یک واکنش مناسب بدون تشعشع‌زایی و عاری از آلودگی محیط توسط نوترون‌ها عبارتند از :

$$ {}_{1}^{1}H + {}_{5}^{11}B \rightarrow 3\,{}_{2}^{4}He + 8.7\,Mev \qquad (۸-۱) $$

1- *Moon rocks*

2- *Solar wind*

در این واکنش، واکنش‌های جانبی که در $D-T$ و $D-{}^{3}He$ اتفاق می‌افتد وجود ندارد.

رادیواکتیوتیهٔ آزاد شده در این واکنش خیلی کمتر از رادیواکتیوتیهٔ ایجاد شده به وسیلهٔ سوختن زغال می‌باشد (به علّت وجود اورانیوم در زغال) (۸).

اتلاف انرژی در این سوخت به شدت کاهش می‌یابد زیرا انرژی جنبشی ذرات آلفا به طور مستقیم به انرژی الکتریسیته تبدیل می‌شود. (۱۲).

با این حال جوش $B^{11}-H$ به علّت پایین بودن سطح مقطع نسبت به سایر سوخت‌ها خیلی مشکل می‌باشد و در پی آن تهیهٔ انرژی لازم برای جوش و گداخت $B^{11}-H$ با تکنولوژی حاضر غیرممکن است. ولی اگر در آینده بتوان مشکلات تکنولوژیکی جوش $B^{11}-H$ را حل نمود به یک منبع انرژی تمیز و مؤثری دست خواهیم یافت.

۱-۲- طراحی ساچمه‌های سوختی

برای ایجاد جوش روش‌های متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته که مهم‌ترین آنها روش محصورسازی مغناطیسی و جوش در میدان لختی می‌باشد. ارضاء معیار لوسن [1] در روش محصورسازی مغناطیسی به مراتب مشکل‌تر از دیگر روش‌ها می‌باشد (۱۷).

یکی از پارامترهای مهم در همجوشی لختی میزان واکنش می‌باشد و به صورت زیر بیان می‌شود و تعداد واکنش بر واحد حجم و زمان نامیده می‌شود (۳۴).

$$R = N_1 N_2 < \sigma V > \qquad (۹-۱)$$

دیمانسیون R، $m^{-3}s^{-1}$ می‌باشد.

اساس همجوشی لختی افزایش چگالی و از اینرو افزایش واکنش می‌باشد. بنابراین در ارضاء معیار لوسن زمان لازم برای فشردگی به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد که یکی از مشکلات

1- *Lawson criterion*