بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

(گرایش هسته ای)

بررسی پارامترهای طرح راه اندازی غیر مستقیم با استفاده از باریکه های یون سنگین در همجوشی محصورشدگی اینرسی

از

محبوبه معصومی

استاد راهنما

دکتر عباس قاسمی زاد

استاد مشاور

دکترلیلا غلامزاده

بهمن ۱۳۹۰

تقدیر و تشکر

خدواندا کسی در مسئله شکر به حدی نمی رسد مگر آنکه احسان تو او را به شکری دیگر ملزوم کند.

در اینجا وظیفه خود می دانم از تمام عزیزانی که به من در انجام پایان نامه کمک کردند و در تمامی مراحل از راهنمایی و تجربیاتشان بهره مند شده ام، تشکر و قدردانی نمایم؛ در ابتدا از زحمات استاد راهنمای بزرگوارم، جناب آقای دکتر عباس قاسمی زاد که راهنمائی ها و تشویقهای ایشان در مراحل انجام پایان نامه همواره باعث دلگرمی بوده و همچنین خانم دکتر لیلا غلامزاده، استاد مشاورم، که مرا یاری نمودند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

و همچنین با تقدیر و تشکر فراوان از تمامی اساتید محترم گروه فیزیک دانشکده علوم پایه که در طی سالهای تحصیلم، دانشجوی این عزیزان بوده ام.

تقدیم به عزیزانم که از تار و پود وجودشان برایم خانه ای ایمن ساخته اند.

چکیده

بررسی پارامترهای طرح راه اندازی غیرمستقیم با استفاده از باریکه های یون سنگین در همجوشی محصورشدگی اینرسی

محبوبه معصومی

از مهمترین راههای دستیابی به انرژی حاصل از همجوشی گرما هسته ای کنترل شده، همجوشی محصور سازی اینرسی (ICF) است. این روش، فرآیندی است که در آن واکنش های همجوشی هسته ای از طریق گرمایش و فشردگی ساچمه سوخت همجوشی به وقوع می پیوندند. همجوشی محصور سازی اینرسی به دو روش اصلی؛ راه اندازی مستقیم و راه اندازی غیر مستقیم در دسترس است. در روش راه اندازی مستقیم، ساچمه سوخت همجوشی، به طور مستقیم تحت تابش باریکه یونی و یا باریکه لیزری قرار می گیرد. در روش راه اندازی غیر مستقیم باریکه ها به طور مستقیم برروی کپسول سوخت تابیده نمی شوند، بلکه انرژی باریکه ابتدا تبدیل به پرتوی ایکس می شود ونهایتا پرتوهای حاصل، مسئولیت فرآیند قطع و راه اندازی ساچمه سوخت را برعهده دارند. امروزه شتاب دهنده های باریکه یون سنگین به دلیل بازدهی بالا، آهنگ تکرار عالی و اپتیک نهایی مناسب، به عنوان راه انداز انرژی راکتورهای همجوشی مورد توجه می باشند.ایده اساسی در همجوشی محصور سازی اینرسی با استفاده از طرح راه اندازی غیر مستقیم، حل مشکل تقارن می باشد. از نکات اساسی برای رسیدن به همجوشی گرما هسته ای کنترل شده در همجوشی محصور شدگی اینرسی، دستیابی به انفجار درونی متقارن است.

در این پایان نامه به بررسی پارامترهای فیزیکی طرح راه اندازی غیرمستقیم با استفاده از باریکه های یون سنگین پرداخته ایم. بازده بالای تبدیل انرژی راه انداز به تابش حرارتی، انتقال مناسب تابش حرارتی به سطح کپسول و درجه ی بالای تقارن تابش از اساسی ترین شرایط مورد نیاز برای اجرای موفقیت آمیز راه اندازی غیر مستقیم همجوشی محصورسازی اینرسی است. از این رو در این پایان نامه به بررسی عوامل موثر بر بازده تبدیل و بازده انتقال پرداخته ایم. با استفاده از تئوری و کد شبیه سازی هیدرودینامیکی MULTI نشان دادیم که بازده تبدیل تحت تأثیر جنس مبدل و توان باریکه ورودی می باشد و موادی با عدد اتمی بزرگ، مبدل های بهتری نسبت به موادی با عدد اتمی کوچک هستند. علاوه بر این دریافتیم که بازده انتقال به عدد اتمی ماده قطع کننده ساچمه سوخت، عدد اتمی مواد دیواره کاواک و هم چنین ابعاد کاواک و ساچمه وابسته می باشد.

کلیدواژه: همجوشی اینرسی، راه اندازی غیرمستقیم، باریکه یون سنگین، بازده تبدیل، بازده انتقال، کد شبیه سازی MULTI

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده فارسی ..... د

چکیده انگلیسی ..... ذ

پیشگفتار ۱

فصل اول: خورشید بر روی زمین

۱-۱- مقدمه..... ۳

۱-۲- شکافت وهمجوشی هسته ای ۳

۱-۳- فیزیک واکنش همجوشی ۵

۱-٤- آهنگ واکنش، سطح مقطع و واکنش پذیری ۱۰

۱-۵- معیار لاوسون ۱۲

۱-٦- راهکارهای محصورسازی پلاسما جهت دستیابی به همجوشی هسته ای ۱۳

۱-٦-۱- همجوشی مغناطیسی ۱٤

۱-٦-۲- همجوشی اینرسی ۱٦

۱-۷- روش های احتراق سوخت فشرده ICF ۱۸

۱-۸- انفجار درونی و سوختن کپسول ICF ۲۱

فصل دوم: طرح راه اندازی غیر مستقیم در همجوشی یون سنگین

۲-۱- مقدمه ۲۸

۲-۲- همجوشی اینرسی با استفاده از باریکه های یون سنگین ۲۸

۲-۳- سیستم نیروگاه **IFE** همجوشی یون سنگین ۳۱

۲-٤- بررسی راه اندازهای باریکه یون سنگین ۳۲

۲-۵- شتاب دهنده های رادیو فرکانسی ۳٤

۲-٦- شتاب دهنده القایی ۳۵

۲-۷- روش های راه اندازی در **ICF** ۳٦

۲-۷-۱- راه اندازی مستقیم ۳۷

۲-۷-۲- راه اندازی غیرمستقیم ۳۸

۲-۸- مزایا و معایب طرح راه اندازی غیرمستقیم ٤۰

۲-۹- طرح راه اندازی غیرمستقیم با استفاده از باریکه های لیزری ٤۰

۲-۱۰- طرح راه اندازی غیرمستقیم با استفاده از تنگش Z ٤۲

۲-۱۱- طرح راه اندازی غیرمستقیم با استفاده از باریکه های یون سنگین ٤۳

۲-۱۲- هدف های سوخت طرح راه اندازی غیرمستقیم در همجوشی یون سنگین ٤٤

فصل سوم: بررسی پارامترهای طرح راه اندازی غیر مستقیم با استفاده از باریکه های یون سنگین در همجوشی محصورشدگی اینرسی

۳-۱- مقدمه ۵۱
۳-۲- بازده تبدیل ۵۱
۳-۲-۱- بر هم کنش یون با ماده مبدل ۵۲
۳-۲-۲- ساختار مبدل و دینامیک آن ۵۳
۳-۲- ۳- عوامل مؤثر بر بازده تبدیل ۵۸
۳-۳-بازده انتقال ٦٤
۳-۳-۱- فاکتور بازگسیل ٦٤
۳-۳-۲- مدل محاسباتی بازده انتقال ٦۷
۳-٤- شبیه سازی های انجام شده ۷٤
۳-٤-۱- کد شبیه سازی هیدرودینامیکی MULTI ۷٤
۳-٤-۲- مدل شبیه سازی ۷۵
۳-٤-۳- نتایج شبیه سازی ۷٦
۳-۵- نتیجه گیری کلی ۸٦
۳-٦- پیشنهاد برای ادامه کار در آینده ۸۹

مراجع ۹۰

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول(۱-۱): واکنش های همجوشی ممکن ۱۰
جدول (۱-۲): مقایسه ی پارامترهای محصور سازی در دو روش MCF و ICF ۱٤
جدول (۳-۱): انرژی ویژه درونی مبدل $e(T)$ و پارامتر γ چند ماده مختلف ۵۸
جدول(۳-۲): پارامترهای N_*، α، β برای مواد مختلف ٦۷

پیشگفتار

چند صد میلیون سال قبل، نور خورشید سبب رشد درختان روی زمین شد و این درختان عاقبت در پوسته ی زمین به سوخت های فسیلی تبدیل شده اند. انرژی حاصل از سوخت های فسیلی، این امکان را برای بشر فراهم ساخت تا امکانات زندگی خود را گسترش دهد. انرژی خورشید اصلی ترین منبع انرژی است و در حدود ۹۰ درصد از انرژی مورد استفاده بشر را تأمین می کند. بخش اعظم این انرژی در قالب سوخت های فسیلی برای ما قابل دسترس می باشند اما این سوخت ها به سرعت رو به پایان هستند. از این رو برای حل مشکل انرژی باید به دنبال روش نوینی برای تولید انرژی مورد نیاز بشر باشیم. این رویای بشر بوده است که بتواند به همان طریقی که در ستارگان انرژی تولید می شود، انرژی مورد نیاز خود را تولید کند. فرآیند همجوشی هسته ای، چشمه ی تولید انرژی در خورشید و ستاره ها می باشد. در مرکز خورشید در دماهای ۱۵-۱۰ میلیون درجه کلوین، توسط فرآیند همجوشی، هیدروژن به هلیوم تبدیل می شود و این امر منجر به تولید انرژی می گردد. هم اکنون تکنولوژی همجوشی هسته ای، کامل نیست اما اگر به تکنولوژی همجوشی هسته ای دست یابیم، دریاچه ای کوچک، دارای سوخت همجوشی هیدروژنی، می تواند برای قرن ها انرژی مورد نیاز بشر را تأمین کند. از این رو است که امروزه در بیشتر کشورهای پیشرفته، پژوهش های گسترده ای در رابطه با این علم در دست انجام است.

در این پایان نامه، فصل بندی مطالب به صورت زیر انجام شده است:

در فصل اول، اصول اساسی و فیزیک دستیابی به همجوشی هسته ای را مورد بررسی قرار داده ایم. همجوشی محصورشدگی اینرسی از جمله راههای دستیابی به انرژی همجوشی است که در این فصل مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل دوم، به معرفی همجوشی هسته ای با استفاده از باریکه های یون سنگین و راه اندازهای باریکه یون سنگین پرداخته ایم. در این فصل روشهای راه اندازی در همجوشی محصورشدگی اینرسی و بخصوص روش راه اندازی غیر مستقیم را به تفصیل مورد بررسی قرارداده ایم.

در فصل سوم، با بهر ه گیر ی از روابط و مدل های تئوری، روابط مربوط به بازده تبدیل و بازده انتقال را بدست آورده ایم، که این دو پارامتر از جمله پارامترهای تاثیرگذار در اجرای موفقیت آمیز طرح راه اندازی غیر مستقیم با استفاده از باریکه های یون سنگین می باشند. سپس با استفاده از کد شبیه سازی هیدرو دینامیکی یک بعدی MULTI به بررسی و شبیه سازی رفتار مبدل پرداخته ایم و نهایتاً نتایج گرفته شده از کارهای انجام شده در این پایان نامه ارائه شده است.

۱-۱- مقدمه

در فرآیند همجوشی هسته ای دو هسته سبک باهم ترکیب می شوند و هسته جدیدی را به وجود می آورند، که در طی این فرآیند انرژی عظیمی آزاد می شود. همجوشی هسته ای بر روی زمین، این پتانسیل را دارد که منبع غنی و فراوان انرژی باشد. در این فصل روش دستیابی به انرژی هسته ای را مطرح نموده و مقدمات فیزیکی فرآیند همجوشی هسته ای را مورد بررسی قرار می دهیم.

۱-۲- شکافت[1] و همجوشی[2] هسته ای

انرژی هسته ای به دو روش شکافت و همجوشی هسته ای حاصل می شود. 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 دو یا تعداد بیشتری نوترون آزاد می کند.

مهمترین واکنش شکافتی که در نیروگاههای شکافت هسته ای صورت می گیرد، شکافت ایزوتوپ سبک اورانیوم از طریق تسخیر نوترون حرارتی($E < 1eV$) است. در طی این فرآیند، هسته مرکب اورانیوم– ۲۳۶ تولید می شود که در حالت برانگیخته قرار دارد و در مدت زمان کوتاهی طبق واکنش(۱-۱) به دو پاره شکافت[3] تبدیل می شود:

$$n_{(thermal)} + {}^{235}U \rightarrow {}^{236}U^{*} \rightarrow \textit{fission fragments} + \textit{neutrons} + 200\ MeV \qquad (۱-۱)$$

همجوشی هسته ای، چشمه ی تولید انرژی در خورشید و ستارگان است. در این روش، دو هسته سبک با هم برخورد کرده و ترکیب می شوند و هسته ی سنگین تری را ایجاد می کنند.

[1] - Fission
[2] - Fusion
[3] - Fission fragments

سؤال اساسی این است که چگونه می توان از به هم پیوستن دو هسته انرژی حاصل شود، در حالی که بطور عادی جهت حصول انرژی، هسته شکافته می شود؟

هسته ی اتم از Zپروتون و(A-Z) نوترون تشکیل شده است؛ پروتون ها ونوترون ها وزن تقریباً یکسانی دارند اما از لحاظ بار الکتریکی متفاوتند. پروتون دارای بار الکتریکی است ولی نوترون خنثی و بدون بار است. نیرویی که این نوکلئونها را در هسته کنار هم نگاه می دارد، انرژی بستگی[1] است:

$$B = \Delta m\, c^2 \qquad (۲-۱)$$

که مقدار Δm عبارت است از:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m \qquad (۳-۱)$$

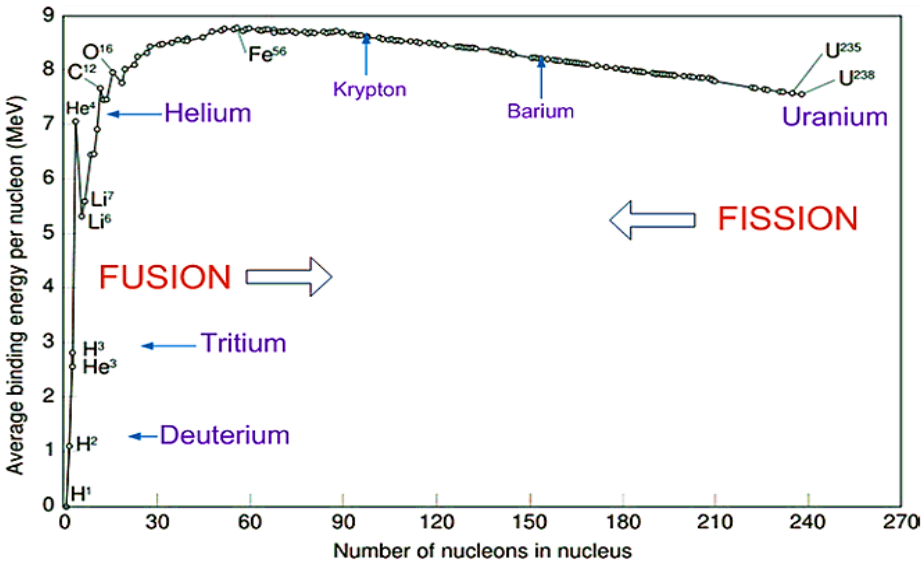
که m_p، m_n وm به ترتیب نشان دهنده جرم پروتون، نوترون و جرم هسته می باشند. برای یک هسته ی پایدار، Δm مقدار مثبتی است. مقدار انرژی آزاد شده از هر واکنش هسته ای را می توان بر اساس اختلاف انرژی بستگی هسته های ورودی و خروجی به صورت زیر بیان کرد:

$$Q = \sum_f B_f - \sum_i B_i \qquad (٤-۱)$$

برای داشتن یک واکنش هسته ای گرمازا باید مقدار انرژی بستگی هسته های اولیه از مقدار انرژی بستگی هسته های نهایی بزرگتر باشد.

شکل(۱-۱)، تغییرات متوسط انرژی بستگی به ازای یک نوکلئون بر حسب عدد جرمی، A را نشان می دهد. مقدار $\frac{B}{A}$ برای هیدروژن (A=1) صفر می باشد، به تدریج با افزایش مقدار A، $\frac{B}{A}$ افزایش می یابد و در ^{56}F به بیشترین مقدار خود یعنی ۸/۷ MeV می رسد و سپس به تدریج کاهش می یابد و به ازای سنگین ترین هسته به مقدار۷/۵ MeV= $\frac{B}{A}$ می رسد [۳].

[1] - Binding energy



شکل(۱-۱): تغییرات انرژی بستگی به ازای یک نوکلئون با عدد جرمی [۱]

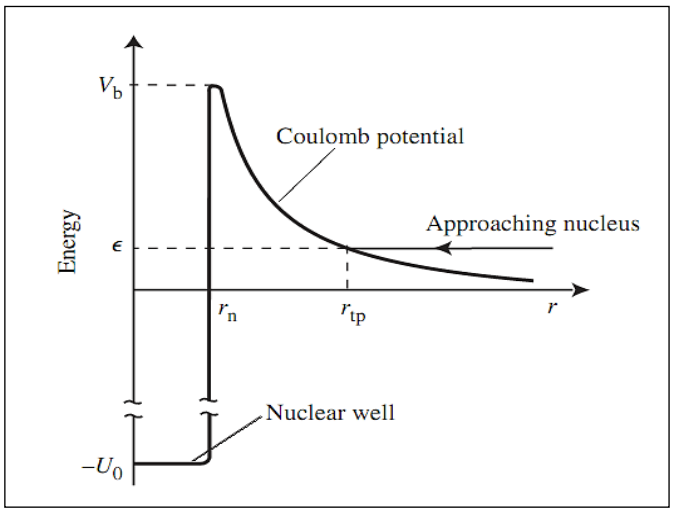
مقدار Q واکنش به ازای همجوشی هسته های سبک ($A \leq 56$) و شکافت هسته های سنگین ($A > 56$) مثبت است.

۱-۳- فیریک واکنش همجوشی

در بیشتر واکنش های همجوشی دو هسته ی(x_1, x_2) با هم ترکیب می شوند و هسته ی سنگین(x_3)و ذره ی سبک (x_4) را ایجاد می کنند:

$$x_1 + x_2 \rightarrow x_3 + x_4 \qquad (۱-۵)$$

به علت پایستگی انرژی و تکانه، انرژی آزاد شده از واکنش به نسبت عکس جرم های محصولات واکنش، بین محصولات توزیع می شود. برای وقوع فرآیند همجوشی، دو هسته ی (x_1, x_2) با بارهای الکتریکی مثبت باید به یکدیگر نزدیک شوند تا در مرز نیروهای جاذبه ای هسته ای قوی قرار گیرند، اما همانطورکه می‌دانیم دو ذره با بار مشابه به یکدیگرنیروی دافعه کولنی وارد می‌کنند که مانع اصلی در نزدیک شدن این هسته ها می باشد.



شکل(۱-۲): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای بین دو هسته [۳]

شکل(۱-۲) رفتار شعاعی انرژی پتانسیل کولنی و هسته ای دو هسته ی برخورد کننده را نشان می دهد. در فواصل بزرگتر از مجموع شعاع های دو هسته برخورد کننده:

$$r_n = 1.44 \times 10^{-13}\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right) \quad cm \qquad (۱-۶)$$

در این صورت انرژی پتانسیل به صورت زیر است:

$$V_c = \frac{Z_1 Z_2}{r} e^2 \qquad (۱-۷)$$

در معادلات یاد شده z_1, z_2 اعداد اتمی و A_1,A_2 جرم اتمی هسته های واکنش دهنده می باشند و e بارالکتریکی است. مطابق شکل (۱-۲) در فواصل کوچکتر از r_n، دو هسته تحت تأثیر نیروی جاذبه هسته ای قرار می گیرند. این دیواره پتانسیل عمقی در حدود U_0= ۳۰-۴۰ MeV دارد.

با استفاده از روابط (۱-۶) و (۱-۷) می توان ارتفاع سدکولنی را بدست آورد:

$$V_b \cong V_c(r_n) = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}}} \quad MeV \qquad (۱-۸)$$

بر اساس مکانیک کلاسیک، تنها هسته هایی با انرژی بیشتر از ارتفاع سدکولنی می توانند از این سد عبورکنند و بر نیروی دافعه کولنی غلبه کنند. درصورتی که دو هسته با انرژی نسبی $\epsilon < V_b$ تنها تا فاصله ی r_{tp}، نقطه ی عطف کلاسیکی به هم نزدیک می شوند:

$$r_{tp} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\epsilon} \qquad (۹-۱)$$

اگرچه بر اساس کوانتوم مکانیک، استثنایی وجود دارد، بطوریکه پدیده تونل زنی[1] این احتمال را برای هسته هایی با انرژی کمتر از ارتفاع سد کولنی به وجود می آورد که از این سد عبور کنند. تعداد این واکنشها دقیقاً تابعی از درجه حرارت خواهد بود.

فرآیند تولید انرژی در خورشید و ستارگان، کم و بیش بطور کامل درک شده است. اما مشکل این است که تولید انرژی در مقیاس عظیم نیاز به تعداد زیادی واکنش دارد که بطور همزمان رخ دهند. برای غلبه بر سد کولنی باید انرژی جنبشی ذرات برخورد کننده را افزایش داد. یکی از راههای بالا بردن انرژی برخوردی بین ذرات، افزایش دما است. با افزایش دما، تعداد برخوردهایی که می تواند منجر به انجام فرآیند همجوشی گردد، افزایش می یابد. اما برای انجام فرآیند همجوشی با آهنگ مناسب، علاوه بر افزایش دما، نیاز به چگالی های بسیار زیاد نیز است. هر اندازه چگالی ذرات همجوشی کننده افزایش یابد، احتمال برخورد بین آنها زیادتر می شود. بنابراین برای انجام واکنش همجوشی با آهنگ مناسب، به طور همزمان باید دو عامل دمای بسیار بالا و چگالی بالا ایجاد گردد. روشی که همزمان این دو عامل را برای دست یابی یه همجوشی تأمین می کند، به عنوان "همجوشی گرماهسته ای[2] " شناخته می شود. انرژی همجوشی ممکن است تحت شرایط کنترل شده ای از طریق راکتورهای همجوشی بهره برداری شود و یا در شرایط غیر کنترل شده ای از طریق بمب های گرما هسته ای (بمب هیدروژنی) رها گردد.

به دلیل نیاز به دما و چگالی بالای موردنیاز برای فرآیند همجوشی هسته ای، سوخت باید به صورت پلاسما[3] باشد(گازی با رسانش الکتریکی، بسیار یونیزه و داغ). زمانیکه دما تا حد مناسبی بالا باشد، سرعت حرارتی هسته ها افزایش می یابد و در این صورت هسته ها این امکان را دارند که به حد کافی به هم نزدیک شوند و بر سد کولنی غلبه یابند و در محدوده نیروی

[1] - Tunneling effect
[2] - Thermonuclear fusion
[3] - Plasma

گرانش هسته ای قوی قرار بگیرند. تحت این شرایط پلاسما ازهم پاشیده می شود مگر اینکه بطریقی آن را محصور کرد. در خورشید این امر بوسیله ی نیروی جاذبه کنترل می شود. اما بر روی زمین، گرانش نمی تواند گزینه جالبی باشد. محصور سازی پلاسما باید چنان باشد که شرایط دما و چگالی بالا را بطور همزمان در مدت زمانی به نام زمان محصور سازی[1] که با شرایط خاصی تعیین می گردد ایجاد شود. هرچه دما و چگالی بالاتری نیاز باشد شرایط محصور سازی نیز مشکل تر می شود. زمانیکه دو هسته خیلی سبک با هم همجوشی می کنند، انرژی زیادی از واکنش آنها آزاد می شود، به عنوان مثال برای هسته ی هیدروژن، سد کولنی برای دو هسته ی هیدروژن در حدود keV ۷۰۰ می باشد. این بدین معنی است که باید دمای هیدروژن را تا ۱۰[۹]× ۳/٦ درجه ی کلوین افزایش داد که در حال حاضر این امر امکان پذیر نیست.

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}\,m\bar{v}^2 \qquad (۱-۱۰-الف)$$

$$T = \frac{2V_b}{3k} = 3.6 \times 10^9\ K \qquad (۱-۱۰-ب)$$

که در روابط فوق m جرم هسته، $\bar{v}$ سرعت میانگین حرارتی و k ثابت بولتزمن است.

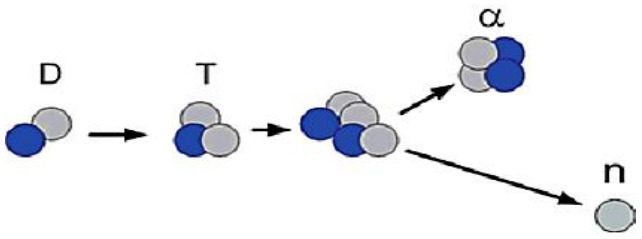
خوشبختانه ایزوتوپ های هیدروژن سد کولنی کوچکتری دارند؛ هرچند که بهره انرژی کمتری را دارا می باشند. از اینرو واکنش هسته ای دوتریوم[2] و تریتیوم[3] راحت ترین راه دست یابی به همجوشی هسته ای می باشد. برای انجام این واکنش نیاز به دمایی در حدود ده میلیون درجه کلوین است تا دو هسته همجوشی کننده بتوانند بر سد کولنی یکدیگر غلبه کنند [۲و۳و٤].

$$^2_1D + ^3_1T \rightarrow \alpha + n + 17.6\ MeV \qquad (۱-۱۱)$$

از همجوشی دوتریوم (D) و تریتیوم(T)، یک هسته ی مرکب تشکیل می شود که دارای دو پروتون و سه نوترون می باشد. این هسته ی مرکب به سرعت به دو پاره شکافت تقسیم می شود.پاره های شکافت حاصل، نوترون (n) که بیشترین انرژی آزاد شده از واکنش را با خود حمل می کند و یک هسته هلیوم(α) با انرژی MeV ۳/۵ می باشند. هسته هلیوم بسیار پایدار است و انرژی آن صرف ادامه واکنش های همجوشی می شود. نوترون در حالی که ۸۰٪ از انرژی کل واکنش را دارا می باشد، به راحتی می تواند از محیط واکنش خارج شود و در اثر برخورد با دیواره راکتور می تواند مواد رادیواکتیو تولید کند. مواد

[1] - Confinement time
[2] - Deuterium
[3] - Tritium

رادیو اکتیو حاصل از این فرآیند، همجوشی نیمه ی عمری هزار بار کوچکتر از مواد رادیواکتیو حاصل از شکافت دارند (شکل ۱-۳).



شکل(۱-۳): واکنش D-T [۱]

دوتریوم را می توان از دریاچه های آب شیرین ، رودخانه ها و اقیانوس ها استخراج کرد، از اینرو فراوانی این سوخت بسیار زیاد است. اما موجودی تریتیوم محدود می باشد و باید از طریق واکنش هسته ای تولید شود. منبع اصلی تریتیوم، تولید آن توسط تسخیر نوترونهای حاصل از همجوشی در پوششی حاوی لیتیوم که اطراف قلب راکتور همجوشی را مهار کرده است، می باشد:

$$^{6}Li + n \rightarrow \alpha + T + 4.8\,MeV \qquad \text{(۱-۱۲-الف)}$$

$$^{7}Li + n \rightarrow \alpha + T + n - 2.5\,MeV \qquad \text{(۱-۱۲-ب)}$$

واکنش (۱-۱۲-ب)، حائز اهمیت است، بدین دلیل که نوترون تولید شده می تواند زایشهای بعدی را در پی داشته باشد. در چنین سیستمی این امکان وجود دارد که بیش از یک تریتیوم در ازای یک نوترون حاصل از همجوشی D-T متولد شود. در استفاده از تریتیوم باید در نظر داشت که تریتیوم ماده ای رادیواکتیو و گسیلنده بتا با نیمه عمر ۱۲/۳سال است و دیگر اینکه لیتیوم ماده ای سمی می باشد [۱و۲] .

در جدول(۱-۱) واکنش های دیگری که دستیابی به همجوشی را ممکن می کنند؛ مشاهده می شوند.

جدول(۱-۱): واکنش های همجوشی ممکن

واکنش	
D+T	$\rightarrow \alpha$(3.52MeV) + n (14.06 MeV)
D+D	$\rightarrow T^4$(1.01MeV) + p (3.03 MeV) $\rightarrow He^3$(0.82MeV) + n (2.45 MeV)
D+He^3	$\rightarrow \alpha$(3.67 MeV) + p (14.67 MeV)
T+T	$\rightarrow He^4$+n + n (11.32 M)
He^3+T	$\rightarrow He^4$+ p + n (12.1 MeV) $\rightarrow He^4$(4.8 MeV) + D (9.5 MeV) $\rightarrow He^5$(2.4MeV) + p (11.9 MeV)
p+Li^6	$\rightarrow He^4$(1.7 MeV) + He^3(2.3MeV)
p+Li^7	$\rightarrow 2He^4$(22.4 MeV)
D+Li^6	$\rightarrow 2He^4$ (22.4 MeV)
p+B^{11}	$\rightarrow 3He^4$(8.682 MeV)
n+Li^6	$\rightarrow He^4$(2.1 MeV) + T (2.7 MeV)

۱-٤- آهنگ واکنش[1]، سطح مقطع[2]، واکنش پذیری[3]

پلاسمایی مخلوط از ذرات نوع ۱و۲ با چگالی های عددی n_1 و n_2 را در نظر می گیریم که با سرعت های یکسان و تک جهت با هم برخورد کنند و در محل تلاقی آنها، فرآیند همجوشی رخ می دهد. آهنگ واکنش همجوشی(R)، تعداد واکنشها در واحد زمان در واحد حجم از رابطه ی (۱-۱۳) حاصل می شود:

$$R_{12} = \frac{f_1 f_2}{1+\delta_{12}} n^2 < \sigma v > \qquad (۱-۱۳)$$

که در رابطه فوق n چگالی عددی کل می باشد و f_1و f_2 کسر اتمی ذرات ۱و۲ هستند. هم چنین δ_{12} دلتای کرونکر می باشد (اگرi=j، $\delta_{12} = 1$ در غیر این صورت $\delta_{12} = 0$).v سرعت نسبی هسته ها و σ سطح مقطع همجوشی است. سطح مقطع، کمیتی مهم در تجزیه وتحلیل واکنشهای هسته ای است و در واقع احتمال رخداد هر واکنش را برای ذرات واکنش دهنده انداز

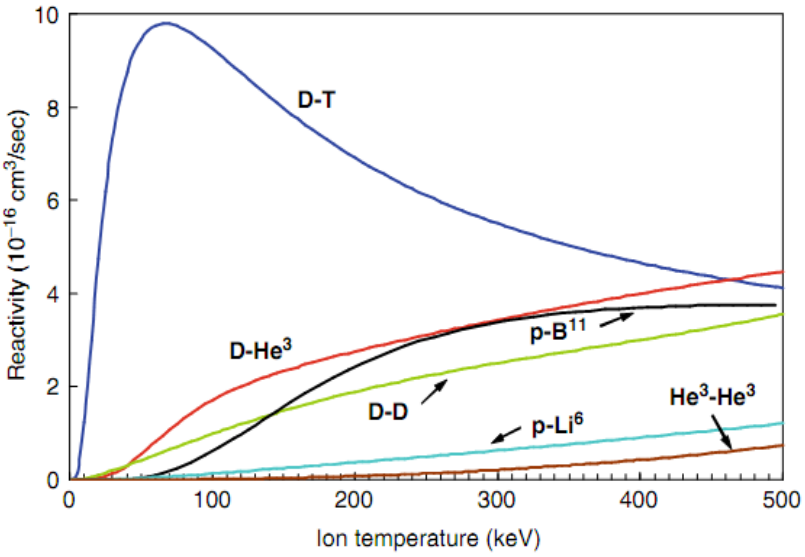
[1] - Reaction rate
[2]- Cross section
[3]- Reactivity

گیری می کند.

کمیت مهم دیگر، واکنش پذیری است. واکنش پذیری (σv) احتمال واکنش در واحد زمان در واحد چگالی هسته ی هدف می باشد. واکنش پذیری یا پارامتر سیگما_ وی پارامتر بسیار مهمی در تعیین آهنگ واکنش همجوشی است . این پارامتر علاوه بر اینکه تابع دما است، به نوع ذرات همجوشی کننده نیز بستگی دارد و وابستگی قوی به سرعت نسبی هسته های همجوشی کننده دارد . ازآنجایی که در حقیقت سرعت نسبی هسته ها باهم متفاوت است پارامتری به نام میانگین واکنش پذیری را معرفی می کنیم که از انتگرال گیری بر روی تمام سرعت های نسبی بدست می آید:

$$< \sigma v >= \int_0^\infty \sigma(v) v f(v)\, dv \qquad (۱-۱٤)$$

$f(v)$ تابع توزیع سرعت های نسبی می باشد و این تابع، تابع بهنجاری است $\int_0^\infty f(v)dv = 1$.



شکل(۱-٤): واکنش پذیری چند واکنش همجوشی بر حسب دما **[۱]**

پارامتر سیگما_ وی در شکل(۱-٤) به صورت نمودار تغییرات پارامتر سیگما_ وی بر حسب دما برای سوختهای همجوشی گوناگون نمایش داده شده است.

واکنش DT در گستره ی دمایی کمتر از۴۰۰keV در مقایسه با سایر واکنش ها، بیشترین واکنش پذیری را دارد. واکنش پذیری DT در دمایی حدود ٦٤ keV به بیشترین مقدار خود می رسد و واکنش پذیری آن در دمای ۲۰-۱۰ keV حدود ۱۰۰ مرتبه و در دمای ۵۰ keV در حدود ۱۰ مرتبه از واکنش پذیری هر واکنش دیگری بزرگتر است. دومین واکنش با احتمال بالا واکنش DD در محدوده ی دمایی کمتر از ۲۵ keV می باشد. واکنش D^3H **در محدوده ی دمای بین** ۲۵۰ keV- ۲۵ بیشترین میزان واکنش پذیری را دارد. هم چنین واکنش پذیری $p^{11}B$ با واکنش پذیری D^3H در دمای حدود ۲۵۰ keV و در حدود دمای ٤۰۰ keV با واکنش پذیری DT برابراست. در دماهای بالا واکنش پذیری واکنش هایی همچون T^3H، p^9Be و D^6Li با واکنش پذیری $p^{11}B$ قابل قیاس است. اما این واکنشها به جهت اینکه شامل ایزوتوپ های نادر و یا عموماً پرتوزا هستند، کمتر مورد توجه اند **[۳-۱]** .

۱-۵- معیار لاوسون[1]

فرض می کنیم که پلاسمایی متشکل از دوتریوم و تریتیوم با چگالی های عددی برابر($\frac{n}{2}$) در اختیار داریم، در این صورت با جایگذاری مقادیر چگالی عددی در رابطه ی (۱-۱۳) خواهیم داشت:

$$R_{12} = \frac{n^2}{4} < \sigma v > \qquad (۱-۱۵)$$

انرژی تولید شده در طی مدت زمان τ، به انرژی آزاد شده از واکنش همجوشی Q و آهنگ واکنش همجوشی R_{12} بستگی دارد، بطوریکه داریم:

$$E = R_{12}\tau Q = \frac{n^2}{4} < \sigma v > \tau Q \qquad (۱-۱٦)$$

هدف اساسی در تحقیقات همجوشی هسته ای، تولید راکتورهایی است که از لحاظ انرژی و اقتصاد باشند؛ بر این اساس انرژی یک راکتور همجوشی باید بیشتر از انرژی باشد که صرف گرمایش پلاسما و نگهداری واکنش های همجوشی می شود، به عبارتی داریم:

[1] - Lawson criterion

$$E_{out} > E_{int} \qquad (۱۷–۱)$$

این رابطه، اساس معیار توازن انرژی را برای سیستمهای همجوشی فراهم می سازد. درواقع برای برقراری توازن انرژی لازم است که انرژی حاصل از احتراق پلاسمایDT از انرژی جنبشی تمامی ذرات پلاسما بزرگتر باشد. بطوریکه داشته باشیم:

$$3nK_BT < \frac{n^2}{4} < \sigma v > \tau Q \qquad (۱۸–۱)$$

که انرژی جنبشی نوکلئون ها و الکترون ها برابر است با $E = 3nK_BT$.

در حقیقت واکنش همجوشی، انرژی بیش از آنچه که برای تولید پلاسما با دما و چگالی مورد نیاز برای وقوع همجوشی لازم است را تولید می کند.

از رابطه ی(۱–۱۸) خواهیم داشت،

$$n\tau > \frac{12K_BT}{<\sigma v>Q} \qquad (۱۹–۱)$$

این رابطه، معیار لاوسون است که از اساسی ترین روابط همجوشی هسته ای می باشد.

ذرات همجوشی کننده باید انرژی جنبشی کافی برای رخ دادن تعداد مناسب واکنش های همجوشی را داشته باشند. برای سوخت DT، این امر دلالت بر دمایی در حدودkeV ۵ دارد. برای واکنش همجوشی DT با انرژی آزاد شدهMeV ۱۷/٦ و در محدوده دمای عملیاتی یک راکتورkeV ۱۰–۵، معیار لاوسون عبارت است از[۲]:

$$n\tau \approx ۱۰^{۱٤} - ۱۰^{۱۵} \quad \text{s cm}^{-3} \qquad (۲۰–۱)$$

۱–٦– راهکارهای محصورسازی پلاسما جهت دستیابی به همجوشی هسته ای

همانطور که در بخش ۱–۲ اشاره شد، برای وقوع تعداد واکنش های همجوشی مناسب، سوخت باید به صورت پلاسمای محصور شده باشد بطوریکه شرایط دما و چگالی بالا به خوبی تأمین شود. بدین منظور دو راهکار جهت عملی کردن فرآیند همجوشی روی زمین با حفظ شرایط یاد شده(همجوشی گرما هسته ای) وجود دارد: