

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده علوم پایه ، گروه فیزیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش : فیزیک هسته ای

عنوان :

بررسی دینامیکی ناپایداری هیدرودینامیکی ریلی-تیلور

درهمجوشی محصورشدگی اینرسی

استاد راهنما :

دکتر عباس قاسمی زاد

استاد مشاور :

دکتر علیرضا درودی

پژوهشگر :

صفورا شیاری

تابستان ۹۰

تقدیم به

پدر و مادر مهربان خود و همسر
عزیزم که همواره در طول تحصیل
از حمایت بی دریغ آنها بهره برده‌ام
و تقدیم به همه راه و همراهم که
بی یاری او این مسیر طی
نمی‌شد، همسر عزیزم مهندس
سید یاسر فخر موسوی.

تشکر و قدردانی

برای نگارش این پایان نامه از حضور استاد دکترعباس قاسمی زاد بهره برده ام که این یادآوری، نمایانگر سپاس بی پایان من نسبت به کمک‌های بی دریغ ایشان است. همچنین از استاد دکتر علیرضادرودی که مشاور من در این پایان نامه بودند سپاس گزارم.

باسمه تعالی

در تاریخ:

دانشجوی کارشناسی ارشد آقای / خانم

و با نمره به حروف

مورد تصویب قرار گرفت.

از پایان نامه خود دفاع نموده

و با درجه

امضاء استاد راهنما

باسمه تعالی دانشکده: علوم پایه ***** (این چکیده به منظور چاپ در پژوهش نامه دانشگاه تهیه شده است.)	
نام واحد دانشگاهی: تهران مرکزی کد واحد: ۱۰۱	کد شناسایی پایان نامه: ۱۰۱۳۰۲۱۸۸۸۱۰۰۷
عنوان پایان نامه: بررسی دینامیکی ناپایداری هیدرودینامیکی ریلی-تیلور در همجوشی محصورشدگی اینرسی	
نام و نام خانوادگی دانشجو: صفورا شیاری شماره دانشجویی: ۸۷۰۰۰۲۴۸۸۰۰ رشته تحصیلی: فیزیک هسته‌ای	تاریخ شروع پایان نامه: نیمسال دوم ۸۹ - ۱۳۸۸ تاریخ اتمام پایان نامه: ۱۳۹۰/۶/۲۳
استاد/ استادان راهنما: دکتر عباس قاسمی زاد استاد/ استادان مشاور: دکتر علیرضا درودی	
آدرس و شماره تلفن: استان گیلان، شهرستان رشت، ابتدای بولوار شهیدانصاری، کوچه مکتب نرجس ساختمان شهریار تلفن: ۰۹۱۱۱۴۹۸۵۷۱	
چکیده پایان نامه (شامل خلاصه، اهداف، روش‌های اجرا و نتایج به دست آمده): <p>پیشرفت جامعه بشری، نیاز روزافزون به انرژی را افزایش می دهد. یکی از راه های تولید انرژی موردنیاز، واکنش های هسته ای می باشند که انرژی فوق العاده زیادی تولید می کنند. از آن جا که عناصر اصلی سوخت های همجوشی به راحتی در طبیعت یافت می شوند و محصولات واکنش بر خلاف واکنش های شکافت، رادیواکتیو نیستند، تولید انرژی از این طریق حائز اهمیت است. یکی از روش های همجوشی هسته ای، محصورشدگی لختی (ICF) می باشد. در این نوع همجوشی باید تقارن کروی کاملی وجود داشته باشد تا فرآیندهای همجوشی به وقوع بپیوندد. اما انفجارات درونی ایجادشده در محفظه سوخت ICF تحت تاثیر انواع ناپایداری های هیدرودینامیکی مانند ریلی-تیلور و ریخت مایر-مشکوف می تواند تراکم سوخت را از حالت تقارن کروی خارج و باعث اغتشاش رو به رشدی در محفظه سوخت گردد. این ناپایداری ها که می توانند بر روی عملکرد فرآیند سوختن کامل، نقش منفی داشته باشند، بر اثر ایجاد عدم یکنواختی در شدت باریکه لیزر فرودی و ضخامت هدف تشکیل می شوند. در این پایان نامه، اثر چسبندگی و پارامتر عدد آتوود بر رشد ناپایداری ریلی-تیلور بررسی شده است. با توجه به معادلات اولر و درنظر گرفتن اختلالات حاکم، مجموعه معادلاتی که فاز خطی ناپایداری RT را توصیف می کنند، به دست آمده است. آهنگ رشد ناپایداری، محاسبه و نمودارهای مربوط به آن بررسی شده است و عدد موجی که در آن آهنگ رشد بیشینه ناپایداری رخ می دهد، محاسبه گردید. در پایان، اثر عدد آتوود بر رشد ناپایداری RT بررسی شده است.</p>	

نظر استاد راهنما برای چاپ در پژوهش نامه دانشگاه مناسب است / مناسب نیست. تاریخ و امضاء:

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
	فصل اول : همجوشی هسته ای
۲	۱-۱- مقدمه.....
۵	۲-۱- همجوشی هسته ای.....
۷	۳-۱- تئوری همجوشی هسته ای.....
۱۴	۴-۱- چرخه های مهم سوخت همجوشی هسته ای.....
۱۷	۵-۱- واکنش های همجوشی هسته ای پیشرفته.....
۱۹	۶-۱- معرفی روش های ارائه شده توسط فیزیک امروز برای همجوشی هسته ای.....
۱۹	۱-۶-۱- همجوشی داغ.....
۲۰	۲-۶-۱- همجوشی سرد.....
	فصل دوم: همجوشی محصورشدگی لختی
۲۳	۱-۲- ایده های اساسی در روش ICF.....
۲۶	۲-۲- مراحل همجوشی محصورشدگی لختی.....
۲۷	۱-۲-۲- گرم کردن ساچمه سوخت.....
۲۷	۲-۲-۲- بمباران ساچمه سوخت توسط باریکه های تابشی.....
۲۷	۳-۲-۲- تشکیل هاله.....
۲۸	۴-۲-۲- قطع و محصورسازی.....
۲۸	۵-۲-۲- انفجار کوچک در داخل ساچمه سوخت.....

۲۹	.....۳-۲- نکات قابل توجه و مهم در ICF
۲۹	.....۱-۳-۲- تابش متقارن
۳۰	.....۲-۳-۲- جفت شدگی موثر بین باریکه تابش و انتقال انرژی در ساچمه سوخت
۳۰	.....۳-۳-۲- الکترون داغ
۳۱	.....۴-۳-۲- مکانیزم واکنش های ICF کنترل شده
۳۴	.....۴-۲- موج شوک
۳۹	.....۵-۲- مدل راکت و انفجارات درونی قطع کننده

فصل سوم: ناپایداری های هیدرودینامیکی

۴۴	.....۱-۳- چگونگی ایجاد ناپایداری های هیدرودینامیکی در ICF
۴۷	.....۲-۳- اعداد مهم در ناپایداری های هیدرودینامیکی در ICF
۴۷	.....۱-۲-۳- عدد رینولد
۴۸	.....۲-۲-۳- عدد ماخ
۵۰	.....۳-۲-۳- عدد ریچاردسون
۵۲	.....۳-۳- ناپایداری کلوین - هلمهولتز
۵۴	.....۴-۳- ناپایداری ریلی - تیلور
۵۶	.....۱-۴-۳- خاصیت شناوری به عنوان یک نیروی محرکه در ناپایداری RT
۶۱	.....۲-۴-۳- بررسی رشد دامنه اختلالات در ناپایداری ریلی - تیلور

فصل چهارم: بررسی اثر چسبندگی و پارامتر عدد آتوود بر ناپایداری ریلی - تیلور

۷۷۱-۴- شرح اصول دینامیکی سیال
----	----------------------------------

- ۸۵ ۲-۴- بررسی ناپایداری ریلی-تیلور با دو سیال یکنواخت.....
- ۸۷ ۳-۴- بررسی اثرات چسبندگی بر ناپایداری ریلی - تیلور.....
- ۱۰۰ ۴-۴- بررسی اثر عدد آتوود بر رشد ناپایداری ریلی - تیلور.....

فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

- ۱۰۶ ۵- ۱- نتیجه گیری.....
- ۱۰۷ ۵- ۲- پیشنهادات.....
- ۱۰۸ فهرست منابع و ماخذ.....
- ۱۱۰ چکیده انگلیسی.....

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۱: انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای بین دو پروتون.....
۹	شکل ۲-۱: انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای بین دو هسته سنگین.....
۱۰	شکل ۳-۱: سد کولنی برای مخلوط دوتریوم - تریتیوم.....
۱۱	شکل ۴-۱: نمودار انرژی بستگی نسبت به عدد جرمی.....
۱۲	شکل ۵-۱: نمودار تابع توزیع ذرات همجوشی کننده در یک محیط پلاسمای سوخت همجوشی.....
۱۳	شکل ۶-۱: نمودار تابع توزیع سرعت ذرات همجوشی کننده در یک محیط پلاسمای سوخت همجوشی.....
۱۴	شکل ۷-۱: نمودار طرح وار پدیده تونل زنی.....
۱۵	شکل ۸-۱: نمودار طرح وار هر سیستم تولید انرژی.....
۲۹	شکل ۱-۲: مراحل انجام واکنش همجوشی محصورشدگی لختی.....
۳۳	شکل ۲-۲: نمودار نسبت رشد اختلالات در زمان t به اختلال اولیه بر حسب مقادیر متفاوت پارامتر IFAR.....
۳۷	شکل ۳-۲: نمودار رانکین - هوگونیوت برای $\gamma = \frac{5}{3}$
۴۱	شکل ۴-۲: نمودار بازده هیدرودینامیکی بهنجار ($\frac{\eta_h}{\eta_0}$) به صورت تابعی از ϵ
۴۲	شکل ۵-۲: نمودار بازده هیدرودینامیکی (η_h) به صورت تابعی از ϵ
۴۶	شکل ۱-۳: نمودار تغییرات چگالی و دمای یون ها و الکترون ها در زمان تابش باریکه ۳۰ nsec.....
۴۷	شکل ۲-۳: نمودار تغییرات چگالی و دما در شرایط پیشینه فشردگی برای یک هدف با بهره بالا.....
۵۳	شکل ۳-۳: ناپایداری کلوین - هلمهولتز به وجود آمده در ابرها.....
۵۳	شکل ۴-۳: ناپایداری کلوین - هلمهولتز در سیاره زحل که در اثر اندرکنش دو باند اتمسفر سیاره زحل به وجود آمده است.....
۵۵	شکل ۵-۳: شبیه سازی هیدرودینامیکی ناپایداری ریلی - تیلور.....
۵۵	شکل ۶-۳: ناپایداری ریلی - تیلور در سحابی خرچنگ.....

- شکل ۳-۷: گرادیان فشاری که درخلاف جهت گرادیان چگالی است، درحضورشتاب گرانشی ناپایداری RT را ایجاد می کند..... ۵۶
- شکل ۳-۸: تصویر، نتایج شبیه سازی یک انفجاردرونی رانشان می دهد..... ۶۰
- شکل ۳-۹: نتایج شبیه سازی یک انفجار ابرنواختر..... ۶۰
- شکل ۳-۱۰: نمودار رشد دامنه اختلالات در ناپایداری ریلی- تیلور برای حالت $A > 0$ ۶۲
- شکل ۳-۱۱: نمودار رشد دامنه اختلالات در ناپایداری ریلی- تیلور برای $A < 0$ ۶۳
- شکل ۳-۱۲: نمایش شبیه سازی شده رشد ناپایداری RTI بر حسب زمان..... ۶۴
- شکل ۳-۱۳: تصویر مراحل رشد ناپایداری RT رانشان می دهد. (a) اختلال اولیه، (b) مرحله رشدخطی ناپایداری، (c) مرحله رشدحباب هاومیخه ها..... ۶۴
- شکل ۳-۱۴: ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در فصل مشترک دو سیال با چگالی های مختلف ۸۷
- شکل ۴-۱: جریان نیروی برشی توسط RT..... ۸۷
- شکل ۴-۲: آهنگ واپاشی فضایی بهنجار شده برحسب عدد موج بهنجار شده در ناپایداری ریلی- تیلور درحالتی که چسبندگی وجود داشته باشد، برای $A_n = 0.5$ ۹۴
- شکل ۴-۳: حل قسمت های موهومی آهنگ واپاشی فضایی بهنجار شده برحسب عدد موج بهنجار شده و $A_n = 0.5$ ۹۵
- شکل ۴-۴: نمودار وابستگی آهنگ رشد بهنجار شده نسبت به عدد موج بهنجار شده..... ۹۶
- شکل ۴-۵: نمودار تغییرات عدد موج مربوط به آهنگ رشد بیشینه نسبت به تغییرات چسبندگی..... ۱۰۰
- شکل ۴-۶: نمودار چگونگی تغییر آهنگ رشد ناپایداری ریلی- تیلور برای $A_n = 0.001$ ۱۰۱
- شکل ۴-۷: نمودار چگونگی تغییر آهنگ رشد ناپایداری ریلی- تیلور برای $A_n = 0.01$ ۱۰۱
- شکل ۴-۸: نمودار چگونگی تغییر آهنگ رشد ناپایداری ریلی- تیلور برای $A_n = 0.2$ ۱۰۲
- شکل ۴-۹: نمودار چگونگی تغییر آهنگ رشد ناپایداری ریلی- تیلور برای $A_n = 1$ ۱۰۲
- شکل ۴-۱۰: نمودار چگونگی تغییرات آهنگ رشد ناپایداری RT بیشینه بر حسب عدد آتوود..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات عدد موجی که به ازای آن رشد بیشینه ناپایداری اتفاق می افتد برحسب تغییرات A_n ۱۰۴

فصل اول

همجوشی هسته ای

۱-۱- مقدمه

پیشرفت جامعه بشری و توسعه تمدن به طور مستقیم متناسب با افزایش بازدهی و بهره کار و در نتیجه بالا رفتن استانداردهای زندگی اجتماعی است و پیشرفت اجتماعی و تکنولوژی، موجب افزایش استفاده از انرژی و همچنین لزوم دستیابی به منابع جدید و بابت بهره بیشتر انرژی می شود. برآوردهای اخیر نشان می دهد که مقدار انرژی استفاده شده در سی سال اخیر، دوسوم کل انرژی مصرف شده توسط بشر در طول تاریخ است. این مطلب نشان دهنده غیریکنواختی مصرف انرژی و مصرف زیاد آن در سالهای اخیر است. مصرف توان الکتریکی هر فرد نیز در کشورهای مختلف توزیع غیریکنواختی دارد به طوری که برای مثال مصرف انرژی هرنفر در کشور نروژ حدود 14000 kwh و در کشور هندوستان این مقدار فقط 100 kwh است.

افزایش دانش بشر از دنیای اطرافش، افزایش روزافزون مصرف انرژی راهمراه دارد. چراکه با رشد هوش و قابلیت های ذهنی بشر، او از وسایل ساخته شده خود بهتراستفاده کرده، نیروی خود را بهتر به کار برده و می فهمد که چگونه طبیعت را تغییر دهد. در تلاش به منظور درک رموز طبیعت، بشر امروزی سعی در استفاده معقولانه و به جا از منابع انرژی یافت شده می کند و بدین ترتیب است که با کاوش و دقت بیشتر در این منابع، درک عمیق تری از پدیده های طبیعی مانند نور، گرمای خورشید، جزر و مد و بسیاری دیگر از نیروهای طبیعی به دست می آورد. بشر خیلی زود فهمید که خورشید، تقریباً حد نهایی تمام انرژی هایی است که توسط او استفاده می شود و یکی از اصلی ترین

چشمه های حیات وزندگی است. تاسالهای ۱۸۵۰ میلادی، مصرف انرژی در دنیا در حدود $Q/0.04$ برآورد شده است. یک واحد انرژی یعنی $1Q$ برابر است با :

$$1Q = 1.05 \times 10^{21} j$$

در این دوره انرژی به روشهای مختلف مانند استفاده از شاخه های خشک درختان، تهیه زغال چوب و ... به دست می آمده است. انرژی هایی از این نوع تجدید پذیرند، چرا که می توان چوب و زغال چوب را هر ساله با رشد مجدد گیاهان تأمین نمود. البته بعدها منابع انرژی تجدید پذیر دیگری مثل باد و آب نیز به مجموعه قبلی اضافه شدند. اگر انسان، فقط به انرژی های تجدید پذیر اکتفا می کرد و نیازی به انرژی های غیر آن نداشت، شاید مشکلی به نام مشکل انرژی برای او به وجود نمی آمد. اما امروزه در دنیای علم و تکنولوژی، نیاز بشر به انرژی خیلی افزایش یافته است.

در سال ۱۷۸۱ میلادی، جیمز وات ماشین بخار را با استفاده از زغال سنگ به عنوان سوخت و تبدیل حرکت انتقالی پیستون به حرکت چرخشی تکمیل کرد. استفاده از این سوخت جدید باعث شد که زمان استفاده از انرژی های تجدید پذیر به عنوان منابع انرژی با بهره بالا به پایان برسد. چرا که سوختهایی مانند زغال سنگ و نفت قابل تجدید نبودند. این منابع محدود بوده و از انرژی ذخیره شده خورشید در بقایای مواد آلی که با جذب نور خورشید رشد می کنند، سرچشمه گرفته اند. از زمانیکه بشر طرز استفاده از سوخت های تجدیدناپذیر را شناخت، مصرف انرژی جهان در سال به طور متوسط از سال ۱۸۵۰ تا ۱۹۵۰ میلادی، $Q/0.4$ افزایش یافت که این افزایش به طور متوسط در طی صد سال به میزان ده برابر بوده است. برآوردهای علمی نشان می دهد که از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۵۰ میلادی، متوسط مصرف سالانه انرژی بیش از ده برابر دیگر افزایش یابد.

در قرن بیستم نفت جانشین زغال سنگ شد. این جایگزینی به این علت بود که نفت و یا گاز طبیعی سوختهایی به مراتب تمیزتر و مناسب تر از زغال سنگ هستند. هم اکنون مصرف سالانه انرژی حدود $Q/3$ و کل انرژی مورد نیازی در طی صد سال آینده، $70Q$ تخمین زده می شود. امروزه قسمت اعظم انرژی تولید شده، در کشورهای پیشرفته مورد استفاده قرار می گیرد. اما با توجه به گرایش ذاتی بشر در جهت زندگی راحت تر و مطلوب تر، مصرف انرژی در کشورهای در حال توسعه نیز افزایش

یافته است. حتی اگر کشورهای پیشرفته نیز در صرفه جویی انرژی موفق شوند، انرژی لازم در طی صد سال آینده فقط با مصرف منابع فسیلی تأمین نخواهد شد. البته در قرن بیستم انسان توانسته است که به انرژی حاصل از سوختهای فسیلی و انرژی های محدود دیگر اکتفا کند. اما نتیجه ادامه این وضعیت، با توجه به محدود بودن ذخایر انرژی سوختهای فسیلی، عدم توازن اجتماعی در آینده خواهد بود. بنابراین در راستای پایداری زندگی متمدن، انسان باید در طی صد سال آینده به منابع جدید انرژی دسترسی پیدا کند.

اولین نیروگاه برق جهان در سال ۱۸۸۲ میلادی با قدرت ۷۵۰KW در شهر نیویورک آمریکا راه اندازی شد. از آن تاریخ تاکنون صنعت تولید برق رشد فوق العاده ای داشته است، به طوری که در حال حاضر مصرف برق در جهان بیش از ۳۰۰GW به طور روزانه می باشد.

عوامل گوناگونی در رشد سریع تقاضای برق در جهان موثرند، که از آن جمله می توان به عوامل زیر اشاره کرد:

- ۱- رشد سریع جمعیت جهان
- ۲- بالا رفتن سطح زندگی در اغلب نقاط دنیا
- ۳- صنعتی شدن روزافزون بیشتر کشورهای دنیا
- ۴- کاربردهای جدید و فزاینده ی برق

در حال حاضر برق به طور عمده در سه نوع نیروگاه تولید می شود :

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

در نیروگاه های آبی از انرژی آبهای جاری استفاده می شود، نیروگاه های فسیلی از انرژی احتراق سوخت های فسیلی نظیر نفت، گاز و زغال سنگ استفاده می کنند و نیروگاه های هسته ای نیز در حال حاضر بر پایه شکافت هسته ای استوارند. البته چند روش دیگر تولید برق نیز وجود دارد که

در حال حاضر مورد استفاده و یا مورد مطالعه هستند اما هیچکدام در مقیاس بزرگ مورد بهره برداری قرار نگرفته اند.

تقاضای روز افزون برق لزوم ساختن تعداد زیادی نیروگاه از هر نوع را بر ما تحمیل می کند، اما استفاده از انرژی آبهای جاری بسیار محدود است و فقط در نواحی خاصی از جهان در دسترس می باشد. ذخائر سوختهای فسیلی نیز رو به اتمام است و روزه روز به دست آوردن آنها مشکل تر شده و همچنین امکان استفاده در مواردی غیر از سوزاندن آنها خیلی اساسی تر می شود. در نتیجه انتظار می رود کمبود ایجاد شده بین تقاضا و عرضه برق که روز به روز نیز رو به افزایش است تنها با نیروگاه های هسته ای تأمین شود و همین عامل اصلی است که کشورهای صنعتی را وادار می کند که بر تعداد نیروگاه های هسته ای خود بیفزایند.

انرژی هسته ای به دو صورت عمده بدست می آید :

۱- شکافت هسته ای

۲- همجوشی هسته ای

به علت اینکه تا به امروز روشهای کنترل شده، اقتصادی و مداوم برای استفاده از روش همجوشی هسته ای وجود ندارد، امروزه بیشتر از روش شکافت هسته ای استفاده می شود. اما پیش بینی می شود که تا چند سال آینده بتوان با استفاده از روشهایی به این فناوری دست پیدا کرد. هدف نهایی، دسترسی به انرژی هسته ای با استفاده از همجوشی هسته ای می باشد.

۱ - ۲ - همجوشی هسته ای

همجوشی هسته ای منشأ اصلی تولید انرژی در ستارگان است. خورشید نیز که کره عظیمی باشعاع حدود 7×10^8 m و جرم 2×10^{30} kg است، در هر ثانیه انرژی در حدود 4×10^{26} kcal از طریق واکنش های همجوشی هسته ای درون خود، در فضا منتشر می کند. واکنش خالص زیردریک چرخه پروتون-پروتون یا چرخه کربن، به طور مداوم در خورشید صورت می گیرد: [۱]



وزن اتمی 1H برابر $1/0.08$ است، درحالی که وزن اتمی 4He برابر $4/0.03$ می باشد. در این واکنش فقدان جرمی معادل $4/815 \times 10^{-29} \text{ kg}$ وجود خواهد داشت که معادل انرژی $27/05 \text{ MeV}$ خواهد بود. حال اگر بتوان این واکنش را در روی زمین انجام داد، می توان به منبع بسیار بزرگی از انرژی دست یافت. هیدروژن به اندازه کافی در زمین یافت می شود و محصول واکنش یعنی هلیم نیز گاز بی اثر و پایداری است که مفید بوده و زیان آور نیست. اما بدلیل پایین بودن آهنگ واکنش، در یک نیروگاه کوچک زمینی انرژی آزاد شده از رابطه (1-1) مقرون به صرفه نخواهد بود.

ایده استفاده از این منبع انرژی مجاز پایان ناپذیر در شرایط زمینی، ریشه هایش در برنامه های سلاح های هسته ای آمریکا و روسیه در اوایل سالهای ۱۹۵۰ می باشد، وقتی که انرژی فاجعه برانگیز آزاد شده از انفجار اولین بمب هیدروژنی نشان داد که همجوشی کنترل شده و مداوم باید به فضاهای پارامتری انرژی و زمانی بستگی داشته باشد. در همین هنگام اولین آزمایش ها برای محصورسازی پلاسما در میدان مغناطیسی درمحل هایی مانند Los Alamos و دانشگاه Princeton آغاز شد و فرآیندهای بسیار دقیق و کاملی در صحنه های مختلف علوم بین المللی انجام شد. در سال ۱۹۵۱ فیزیکدانان روسی به نام های آندره ساخارف^۱ و ایگورتام^۲، طرح توکامک^۳ را طراحی و پایه گذاری کردند. [۲] هدف از این کار محصورسازی مغناطیسی پلاسما بود. تا سال ۱۹۵۸ تلاشهای بسیاری در زمینه همجوشی هسته ای انجام شد، به طوریکه دانشمندان متوجه این مطلب شدند که دانش بسیار زیادی در مورد رفتار پلاسما مورد نیاز می باشد و این امر باعث شد که تا سال ۱۹۶۰ تلاشهای بسیار زیادی در این مورد صورت گیرد. بعدها در سال ۱۹۶۸ نوع دیگری از توکامک به نام (T^۳) توسط کورچاتف^۴ پایه گذاری شد که باعث گسترش مطالب در زمینه محصورسازی توکامک در طی دهه های بعدی شد. [۳] این تلاشها و مطالعات باعث به وجود آمدن نسل بعدی توکامک به نام ITER^۵ شد. این

^۱ Andrei Sakharov

^۲ Igor Tamm

^۳ TOKAMAK

^۴ Kurchatov

^۵ International Thermonuclear Experimental Reactor

وسیله برای نگهداری پلاسمای سوخت حرارتی هسته ای برای چندین دقیقه و تولید بهره انرژی خالص طراحی شده است. در اوایل سال ۱۹۶۰ اختراع لیزر باعث شروع کار همجوشی هسته ای از نوع همجوشی محصورشدگی لختی (ICF^۱) برای اولین بار شد. [۴]

۱-۳- تئوری همجوشی هسته ای

برای وقوع یک فرآیند همجوشی، هسته های همجوشی کننده باید آن قدر به یکدیگر نزدیک شده و در فاصله ای نسبت به یکدیگر قرارگیرند که در آن فاصله، نیروهای جاذبه هسته ای قوی بر نیروهای دافعه کولنی ناشی از هسته های اتم ها غلبه کند و به این ترتیب حالت هسته مرکب بوجود آمده و فرآیند همجوشی صورت بگیرد. در واقع یکی از مشکلات اساسی درانجام فرآیند همجوشی هسته ای، سد کولنی است. اگر دو هسته با بارهای Z_1e و Z_2e در فاصله r از هم در نظر گرفته شوند، در این صورت انرژی پتانسیل (سد کولنی) از رابطه زیر بدست می آید:

$$U = - \int_{\infty}^r \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (۲-۱)$$

انرژی جنبشی ذرات همجوشی کننده باید از این انرژی پتانسیل (سد کولنی) بیشتر باشد، تا واکنش همجوشی هسته ای انجام شود.

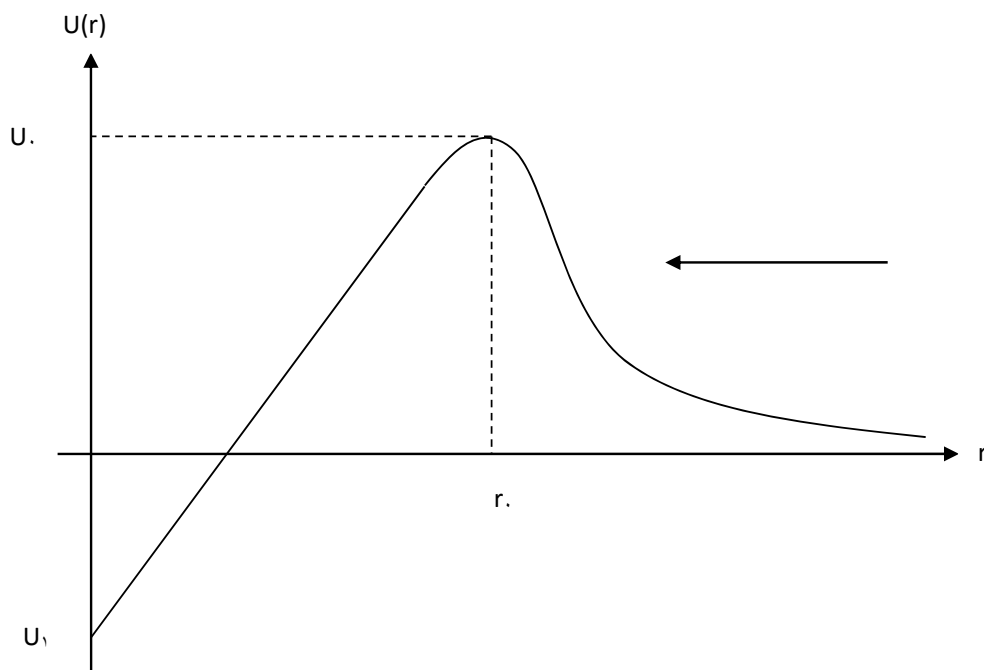
در حالت خاص برای دو پروتون که در فاصله پنج فرمی قرار دارند، می توان نوشت:

$$Z_1 = Z_2 = 1 \quad r = r_0 = 5 \text{ fm} \quad 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$U = U_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 (5 \times 10^{-15})} = 0.29 \text{ MeV} \quad (۳-۱)$$

هنگامی که فاصله مراکز دو هسته کمتر از 10^{-10} m شود، نیروی جاذبه هسته ای قوی بر نیروی دافعه کولنی غلبه می کند و همین نیروی جاذبه قوی است که پروتون ها و نوترون ها را در هسته کنار هم نگه می دارد. شکل (۱-۱) رابطه بین انرژی پتانسیل U و فاصله r بین دو پروتون را نشان می دهد.

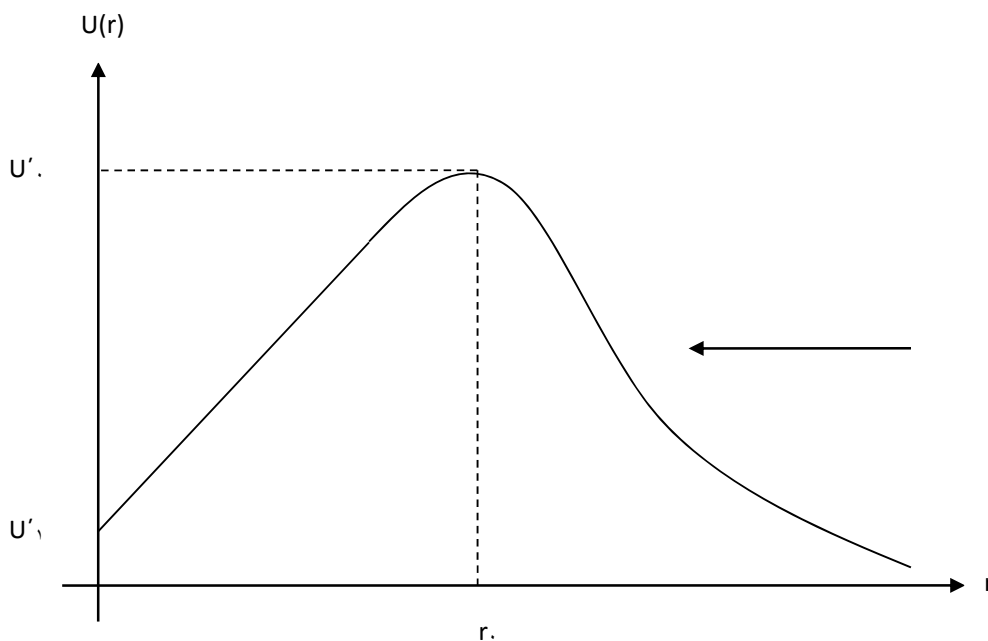
^۱ Inertial Confinement Fusion



شکل (۱-۱): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای بین دو پروتون

شکل (۱-۱) نشان دهنده انرژی پتانسیل ناشی از نیروی دافعه کولنی و همچنین نیروی جاذبه هسته ای قوی بین دو پروتون است. انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی با کاهش r از بی نهایت تا r_0 افزایش می یابد، تا اینکه در $r = r_0$ به مقدار بیشینه خود می رسد. در فواصل کمتر از r_0 ، نیروی جاذبه هسته ای قوی بر نیروی دافعه کولنی (سد کولنی) غلبه پیدا می کند و انرژی پتانسیل کولنی کاهش یافته و انرژی هسته ای حاکم می شود. در این حالت، احتمال وقوع همجوشی هسته ای وجود دارد. با پیشروی به سمت r های کمتر، احتمال وقوع همجوشی هسته ای افزایش می یابد. به طوریکه با توجه به شکل (۱-۱)، انرژی همجوشی هسته ای نامیده می شود. مشاهده می شود که مقدار آن برای دو پروتون منفی است، زیرا انرژی پتانسیل مربوط به نیروهای هسته ای بزرگتر از انرژی پتانسیل کولنی است. در حالت کلی برای هسته هایی غیر از پروتون که عدد اتمی بزرگتر از یک دارند، پتانسیل کولنی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U'_0 = Z_1 Z_2 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} = Z_1 Z_2 U_0 \quad (۴-۱)$$



شکل (۱-۲): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای بین دوهسته سنگین

شکل (۱-۲) انرژی پتانسیل ناشی از نیروی دافعه کولنی و همچنین نیروی جاذبه هسته ای قوی بین دوهسته سنگین را نشان می دهد. با توجه به شکل (۱-۱) و شکل (۱-۲) مشاهده می شود که اختلاف بین $U_1 - U_2$ و $U'_1 - U'_2$ زیاد نیست. در صورت بزرگ بودن Z_1 و Z_2 ، U'_1 می تواند مثبت باشد. یعنی پتانسیل کولنی برای هسته هایی با Z بزرگتر نسبت به هسته هایی با Z کوچکتر، بیشتر است. به عبارتی، دوهسته مجزا در فاصله بینهایت از یکدیگر پایداری بیشتری نسبت به یک هسته بزرگ (مركب از دو هسته کوچک) خواهند داشت. در نتیجه می توان گفت که یک هسته بزرگ هنگامی به پایداری می رسد که به دو قسمت مجزا شکافته شود، درحالی که دو هسته کوچک در صورت تشکیل هسته بزرگتر به پایداری خواهند رسید. بنابراین هسته های سنگین به دلیل بزرگتر بودن سد کولنی ممکن است که نتوانند فرآیند همجوشی هسته ای را انجام دهند. زیرا غلبه بر این سد کولنی خیلی مشکل می باشد.