

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۱۲۷۱۲

دانشگاه گیلان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک
(گرایش هسته‌ای)

بررسی دینامیکی ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در
همجوشی محصور شدگی لختی

از:

آرش مالک پور

استاد راهنما:

دکتر عباس قاسمی‌زاد

۳ / ۳ / ۱۳۸۸

انجمن حفاظت بزرگ سمنی بزرگ
کمیته بزرگ

بهمن ۸۷



۱۱۳۷۱۲

با کمال احترام:

تقدیم به خانواده‌ام

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند بزرگ را که همواره مرا مورد الطاف خود قرار داده و در راه کسب دانش به من گامی استوار و پشتوانه‌ای محکم همچون خانواده‌ام عطا فرمود.

لازم می‌دانم از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر قاسمی‌زاد که مرا با شیوه صحیح تحقیقات علمی آشنا نمود و ارزش والای سخت‌کوشی و نظم را به من نشان داد و همواره مرا در انجام این پایان‌نامه یاری رساند صمیمانه تشکر کنم.

همچنین از جناب آقای دکتر وهابی مقدم و جناب آقای دکتر صدرممتاز برای داوری این پایان‌نامه و جناب آقای دکتر مهدوی فر نماینده محترم تحصیلات تکمیلی صمیمانه سپاسگزارم و مراتب قدردانی خویش را به این اساتید بزرگوار ابراز می‌دارم.

صفحه	عنوان
د	چکیده فارسی
ذ	چکیده انگلیسی
۱	مقدمه
۲	فصل اول: همجوشی هسته ای
۳	۱-۱- مقدمه
۵	۱-۲- انرژی همجوشی هسته ای
۵	۱-۳- سد کولنی در همجوشی هسته ای
۹	۱-۴- راه های غلبه بر سد کولنی در فرآیندهای همجوشی هسته ای
۱۴	۱-۵- موارد مهم در واکنش همجوشی هسته ای
۱۵	۱-۶- واکنش های همجوشی هسته ای
۱۷	فصل دوم: همجوشی محصورشدگی لختی
۱۸	۲-۱- انواع واکنش های همجوشی هسته ای
۲۲	۲-۲- نکات دارای اهمیت در همجوشی محصورشدگی لختی
۲۳	۲-۳- مکانیزم واکنش های همجوشی محصورشدگی لختی (ICF) کنترل شده
۲۷	۲-۴- موج شوک (Shock Wave)
۳۲	۲-۵- مدل راکت و انفجارات درونی قطع کننده
۳۶	فصل سوم: ناپایداری های هیدرودینامیکی در همجوشی محصورشدگی لختی
۳۷	۳-۱- چگونگی ایجاد ناپایداری های هیدرودینامیکی در ICF
۳۹	۳-۲- اعداد مهم در ناپایداری های هیدرودینامیکی در همجوشی ICF
۳۹	۳-۲-۱- عدد رینولد (Reynold Number)
۴۰	۳-۲-۲- عدد ماخ (Mach Number)
۴۲	۳-۲-۳- عدد پرندتل (Prandtl Number)
۴۳	۳-۲-۴- عدد گراشف (Grashof Number)
۴۴	۳-۲-۵- عدد ریلی (Rayleigh Number)
۴۵	۳-۲-۶- عدد ریچاردسون (Richardson Number)
۴۷	۳-۳- انواع ناپایداری های هیدرودینامیکی
۴۷	۳-۳-۱- ناپایداری کلونین - هلمهولتز
۴۸	۳-۳-۲- ناپایداری ریلی - تیلور
۵۰	۳-۳-۳- تحلیل پایداری خطی
۵۱	۳-۳-۲- جزئیات تحلیل پایداری خطی

۵۵	۳-۲-۳- بررسی رشد دامنه اختلالات در RTI
۵۷	۳-۴- ناپایداری ریخت مایر - مشکوف
۶۰	۳-۵- تاثیر موج فشار بر ناپایداری های هیدرودینامیکی در ICF
۶۱	۳-۶- تاثیر ناپایداری های هیدرودینامیکی در دینامیک انفجارات درونی در ICF
۶۱	۳-۶-۱- انتقال شوک
۶۴	۳-۶-۲- پایداری انفجارات درونی در همجوشی محصورشدگی لختی
۶۵	فصل چهارم: بررسی دینامیکی ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در همجوشی محصورشدگی لختی (اینرسی)
۶۷	۴-۱- مکانیزم فیزیکی چگونگی رشد ناپایداری ریخت مایر - مشکوف نسبت به زمان
۶۹	۴-۲- ناپایداری ریخت مایر - مشکوف کروی برای شارش سیالاتی با تقارن محوری
۷۱	۴-۳- قانون قیاس (Scaling Law) در RMI
۷۳	۴-۴- بررسی دینامیکی ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در همجوشی محصورشدگی لختی
۸۸	۴-۵- رفتار مجانبی ناپایداری ریخت مایر - مشکوف
۸۸	۴-۵-۱- فروپاشی (Decay)
۸۹	۴-۵-۲- سرعت حباب (Bubble Velocity)
۹۳	۴-۵-۳- سرعت میخه (Spike Velocity)
۹۵	فصل پنجم: بحث، نتیجه گیری و پیشنهادها
۹۶	۵-۱- بحث و نتیجه گیری
۹۹	۵-۲- پیشنهادها برای ادامه کار در آینده
۱۰۰	مراجع

صفحه	عنوان
۶	شکل (۱-۱): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای دو پروتون.
۷	شکل (۱-۲): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای دو هسته سنگین.
۸	شکل (۱-۳) نمودار تغییرات انرژی بستگی بر نوکلئون هسته ها بر حسب عدد جرمی.
۹	شکل (۱-۴) نمودار تغییرات انرژی پتانسیل دو هسته دوتریوم - تریتیوم بر حسب فاصله نسبی آن‌ها.
۱۱	شکل (۱-۵): نمودار تابع توزیع انرژی ذرات همجوشی کننده در یک محیط پلاسمای سوخت همجوشی.
۱۲	شکل (۱-۶): نمودار تابع توزیع سرعت ذرات همجوشی کننده در یک محیط پلاسمای سوخت همجوشی.
۱۳	شکل (۱-۷) نمودار طرح وار پدیده تونل زنی.
۱۴	شکل (۱-۸): نمودار طرح وار هر سیستم تولید انرژی.
۲۲	شکل (۲-۱): مراحل انجام واکنش همجوشی محصورشدگی لختی (ICF).
۲۷	شکل (۲-۲): نمودار نسبت رشد اختلالات در زمان t به اختلال اولیه بر حسب مقادیر متفاوت پارامتر IFAR.
۳۰	شکل (۲-۳): نمودار رانکین - هوگونیوت برای $\gamma = \frac{5}{3}$.
۳۴	شکل (۲-۴) نمودار بازده هیدرودینامیکی بهنجار $(\frac{\eta_h}{\eta_0})$ به صورت تابعی از \mathcal{E} .
۳۵	شکل (۲-۵) نمودار بازده هیدرودینامیکی (η_h) به صورت تابعی از \mathcal{E} .
۳۸	شکل (۳-۱): نمودار تغییرات چگالی و دمای یون‌ها و الکترون‌ها در زمان تابش باریکه 30 nsec : این نمودار نشان دهنده یک ساختار نمونه از مرحله شتاب گرفتن می باشد.
۳۹	شکل (۳-۲): نمودار تغییرات چگالی و دما در شرایط بیشینه فشردگی برای یک هدف با بهره بالا.
۴۸	شکل (۳-۳): ناپایداری کلونین - هلمهولتز به وجود آمده در ابرها.
۴۸	شکل (۳-۴): ناپایداری کلونین - هلمهولتز در سیاره زحل که در اثر اندرکنش دو بانده اتمسفر سیاره زحل به وجود آمده است.
۴۹	شکل (۳-۵): شبیه سازی هیدرودینامیکی ناپایداری ریلی - تیلور.
۴۹	شکل (۳-۶): ناپایداری ریلی - تیلور در سحابی خرچنگ.
۵۰	شکل (۳-۷): حالت پایدار ناپایداری ریلی - تیلور (جهت نیروی جاذبه به طرف پایین می باشد).
۵۳	شکل (۳-۸): نمودار طرح وار از فصل مشترک اختلال یافته دو سیال با چگالی های متفاوت در میدان گرانشی.
۵۴	شکل (۳-۹): نمایش شبیه سازی شده رشد ناپایداری RTI بر حسب زمان.
۵۶	شکل (۳-۱۰): نمودار رشد دامنه اختلالات در ناپایداری ریلی - تیلور برای $A > 0$.
۵۷	شکل (۳-۱۱): نمودار رشد دامنه اختلالات در ناپایداری ریلی - تیلور برای $A < 0$.
۶۶	شکل (۴-۱): ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در فصل مشترک دو سیال با چگالی های مختلف.
۶۸	شکل (۴-۲): نشان دهنده اصول ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در اثر عبور یک موج فشار از فصل مشترک دو سیال با چگالی های مختلف.

- شکل (۳-۴): تصاویر سطح مقطعی از جبهه ناپایداری برای اعداد ماخ : $M = 10, 20, 50, 100, 200, 300$
- ۷۲ هنگامی که فصل مشترک کروی دو سیال به وسیله یک شوک فرودی از طرف سیال سنگین تر به سمت خارج رانده شود.
- شکل (۴-۴): نمودارهای نسبت رشد بدون بعد و دامنه بدون بعد (به ترتیب از چپ به راست) بر حسب زمان بدون بعد به صورت تجربی برای اعداد ماخ به صورت: $M = 10, 20, 50, 100, 200, 300$
- ۷۳
- شکل (۴-۵): پیکربندی ریخت مایر - مشکوف: (a) مورد تک - مد و (b) مورد چند - مد.
- ۷۵
- شکل (۴-۶): نمودار چگونگی وابستگی عامل کاهش رشد ناپایداری (Ψ) به پارامتر $(\frac{\delta}{\lambda})$ برای مقادیر A'
- ۷۷ متفاوت.
- شکل (۴-۷): تصویری از ادغام حباب ها و رقابت در زمتن های تاخیری ناپایداری ریخت مایر - مشکوف.
- ۸۳
- شکل (۴-۸): نفوذ تصادفی جبهه های حباب ها و میخه ها در ناپایداری ریخت مایر مشکوف بر حسب $t^{0.4}$.
- ۸۴
- شکل (۴-۹): تحول زمانی ضخامت ناحیه اغتشاش یافته برای یک فصل مشترک گسسته مسطح بین هوا و SF_6 .
- ۸۷
- شکل (۴-۱۰): چگونگی تغییرات دامنه اختلالات و نسبت رشد ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در زمان های طولانی، در شبیه سازی $air - SF_6$.
- ۸۹
- شکل (۴-۱۱): نمودار تغییرات سرعت حباب ها بر حسب زمان برای شبیه سازی طولانی مدت $air - SF_6$.
- ۹۰
- شکل (۴-۱۲): بهترین منحنی مار متناسب با داده ها در مورد تغییرات سرعت حباب ها بر حسب زمان برای شبیه سازی طولانی مدت $air - SF_6$.
- ۹۱
- شکل (۴-۱۳): مقایسه نمودار تغییرات سرعت حباب ها و بهترین نمودار مار متناسب با داده ها بر حسب زمان برای شبیه سازی طولانی مدت $air - SF_6$.
- ۹۲
- شکل (۴-۱۴): نمودار تغییرات سرعت میخه ها بر حسب زمان برای شبیه سازی طولانی مدت $air - SF_6$.
- ۹۳
- شکل (۴-۱۵): مقایسه نمودار تغییرات سرعت حباب ها و بهترین نمودار مار متناسب با داده ها در مورد حباب ها و میخه ها بر حسب زمان برای شبیه سازی طولانی مدت $air - SF_6$.
- ۹۴

بررسی دینامیکی ناپایداری ریخت مایر - مشکوف در همجوشی محصورشدگی لختی

آرش مالک پور

یکی از ایده های همجوشی، همجوشی از نوع محصورشدگی لختی است که در این نوع همجوشی، باید تقارن کروی کاملی وجود داشته باشد تا فرآیندهای همجوشی به وقوع بپیوندد. اما انفجارات داخلی ایجاد شده در محفظه سوخت ICF، تحت تاثیر انواع ناپایداری های هیدرودینامیکی مانند ریلی - تیلور (RT) و ریخت مایر - مشکوف (RM) می تواند تراکم سوخت در محفظه سوخت ICF را از حالت تقارن کروی خارج کند و باعث ایجاد اغتشاش رو به رشدی در محفظه سوخت ICF گردد. این ناپایداری ها که می توانند بر روی عملکرد فرآیند سوختن کامل محفظه سوخت نقش منفی داشته باشند بر اثر ایجاد عدم یکنواختی در شدت باریکه لیزر فرودی و همچنین عدم یکنواختی در ضخامت هدف تشکیل می شوند. در این پایان نامه بررسی فیزیکی ناپایداری ریخت مایر - مشکوف با استفاده از معادلات اولر انجام می شود. برای این منظور، ابتدا معادله دیفرانسیل حاکم بر دامنه اختلالات را بدست آورده و با استفاده از آن چگونگی تغییرات این دامنه را بر حسب زمان در حالت های مختلف بررسی می کنیم. سپس پارامترهای فیزیکی موثر بر این ناپایداری مانند قدرت موج فشار، عامل کاهش رشد ناپایداری و همچنین ضخامت، سرعت لایه های اختلالی و انرژی نهشت یافته در فصل مشترک را بررسی می کنیم. سپس رفتار مجانبی در ناپایداری ریخت مایر مشکوف و وجود پدیده فروپاشی و نیز تغییرات سرعت حباب ها و میخه های تشکیل شده در این ناپایداری را مورد بررسی قرار می دهیم و کارهای تجربی و شبیه سازی های انجام شده در این زمینه را بیان می نماییم. همچنین تاثیر و نقش موج فشار در به وجود آمدن این ناپایداری در یک حالت خاص، برای یک موج فشار کروی که در جهت شعاعی به فصل مشترک دو سیال برخورد می کند، را با استفاده از قوانین قیاس و معادلات اولر بررسی می کنیم و پارامترهای مهم را در این مورد، مانند چگونگی رشد دامنه اختلالات بدون بعد (دامنه اختلالات مقیاس) و آهنگ رشد بدون بعد (آهنگ رشد مقیاس) نسبت به زمان بدون بعد (زمان مقیاس)، بیان می نماییم.

واژه های کلیدی: همجوشی محصورشدگی لختی، ناپایداری ریخت مایر - مشکوف، موج فشار، دامنه اختلالات.

Abstract:

The Dynamical Investigation of Richtmyer – Meshkov Instability in Inertial Confinement Fusion

Arash Malekpour

One of the fusion ideas, is the Inertial Confinement Fusion in which there must be perfect spherical symmetry so that fusion reactions can occur. But the created implosions in the ICF fuel capsule are influenced by the types of hydrodynamic instabilities such as Rayleigh – Taylor (RT) and Richtmyer – Meshkov (RM) can eject fuel compression in the ICF fuel capsule from spherical symmetry and cause to create growing perturbations in the ICF fuel capsule. This instabilities which can have negative role on the efficiency of the perfect burning process of capsule, are formed due to creation of non – uniformity in the intensity of incident laser beam and also non – uniformity of target thickness. In this thesis, physical investigation of Richtmyer – Meshkov Instability is done by the use of the Euler equations. For this purpose, we first obtain the differential equations concerning the amplitude of perturbations and by the use of it, we investigate the variations of this amplitude with time in different states. Then we investigate effective physical parameters on this instability such as the strength of shock wave, the growth reduction factor of instability and also the thickness of interface, the velocity of turbulent layers in the interface and the energy deposition in the interface of fluids. Then we investigate asymptotic behavior in the Richtmyer – Meshkov Instability, presence of decay phenomenon and also variations of bubbles and spikes velocity formed in this instability and we explain experimental works and simulations done in this case. Also we investigate the effect of shock wave in the formation of this instability in a special state for a spherical shock wave collided in the radial direction to the interface of two fluids by the use of the scaling laws and the Euler equations and explain important parameters in this case such as growth of the dimensionless perturbation amplitude (the scaled perturbation amplitude) and the dimensionless growth rate (the scaled growth rate) with respect to the dimensionless time (scaled time).

Keywords : inertial confinement fusion, Richtmyer - Meshkov instability, shock wave, perturbation amplitude.

از دیرباز تا کنون، تولید انرژی به شیوه‌ای که در خورشید اتفاق می‌افتد، یکی از رؤیاهای بشر بوده است. از ابتدای قرن بیستم، مشخص شد که منبع انرژی در خورشید (مانند سایر ستاره‌ها) فرآیندی است که به آن همجوشی هسته‌ای می‌گویند، اما فعالیتهای تحقیقاتی در این زمینه تا دهه ۵۰ میلادی آغاز نشد. امروزه کشورهای زیادی که در تلاش برای رسیدن به منبع جدیدی برای تولید انرژی می‌باشند، از تحقیقات در زمینه همجوشی هسته‌ای حمایت می‌کنند. اهمیت انجام این گونه تحقیقات، هنگامی که با گذر زمان بحران انرژی حادتر می‌شود، بیشتر مشخص می‌گردد. استفاده از انرژی ناشی از فرآیند همجوشی هسته‌ای می‌تواند یکی از راههای کنار آمدن با این بحران محسوب گردد به ویژه که در مقایسه با سوزاندن زغال سنگ یا نفت و یا حتی نیروگاههای شکافت هسته‌ای برتریهای چشمگیری از نظر اکتولوژی و ایمنی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، جذابیت آن هنگامی دو چندان می‌شود که بدانیم سوخت مورد نیاز فرآیند همجوشی هسته‌ای را می‌توان از آب دریا تأمین کرد و این موضوع باعث می‌شود که جدا از مشکلات تکنولوژیک، همجوشی هسته‌ای بتواند مستقیماً در دسترس اکثر کشورهای جهان قرار گیرد. اگر چه پیشرفتهای چشمگیری در زمینه تکنولوژی همجوشی هسته‌ای بدست آمده است اما تا به حال هیچ راکتور همجوشی به صورت تجارتي شروع به کار نکرده است. بنابراین می‌توان گفت که در حال حاضر، تقریباً تمامی انرژی هسته‌ای در جهان از طریق نیروگاههای شکافت هسته‌ای تأمین می‌شود.

در فصل اول این پایان‌نامه، توضیحاتی در مورد مبانی همجوشی هسته‌ای که یکی از شیوه‌های تولید انرژی هسته‌ای می‌باشد، را بیان می‌نماییم. سپس در فصل دوم، به مبانی فیزیک همجوشی محصورشدگی لختی که یکی از روش‌های معمول و متداول در دستیابی به انرژی همجوشی هسته‌ای می‌باشد، اشاره می‌کنیم. در فصل سوم، در مورد انواع ناپایداری‌های هیدرودینامیکی بحث می‌کنیم و اصول فیزیکی حاکم بر هر یک از آن‌ها در روش همجوشی محصورشدگی لختی را بیان می‌کنیم و نیز کاربرد های آن‌ها در علوم و تکنولوژی‌های مختلف را ذکر می‌نماییم.

در فصل چهارم این پایان‌نامه، به بررسی دینامیکی ناپایداری ریخت‌مایر - مشکوف در همجوشی محصورشدگی لختی می‌پردازیم و عوامل موثر بر رشد این ناپایداری را بررسی می‌کنیم و در نهایت راه کارهایی جهت کاهش و کنترل این ناپایداری ارائه می‌نماییم.

در فصل پنجم، به بحث و بررسی نتایج حاصل شده از کارهای انجام شده می‌پردازیم و در پایان پیشنهادهایی را جهت ادامه کار در آینده عنوان می‌نماییم.

فصل اول:

همجوشی هسته ای

فرآیند همجوشی هسته ای در ستارگانی که در آنها پروتون های پر انرژی تحت یک فرآیندهای مقدماتی که تشکیل دهنده هسته های هلیوم می باشند و مقدار قابل توجهی انرژی هسته ای آزاد می کنند، اتفاق می افتد. در این حالت، نیروهای جاذبه عظیم بر خلاف فشار تابشی و حرارتی، برای اینکه پروتون های پر انرژی را محصور سازد و سپس آنها بتوانند با احتمال محدودی، به دلیل انرژی حرارتی ذخیره شده خود، بر سد کولنی غلبه پیدا کنند، عمل می کند. چگالی های زیاد عناصر ستاره ها برای ایجاد همجوشی در دماهای نسبتاً پایین (قابل مقایسه با محیط های ساخت دست بشر) مجاز و قابل قبول می باشد. در اوایل دهه ۱۹۲۰ میلادی این مکانیزم برای اولین بار توسط ادینگتون (Eddington) پیشنهاد شد و سپس در دهه ۱۹۴۰ به وسیله بت (Bethe) و دیگران بیشتر توسعه یافت.

این کار توصیف کننده دو مکانیزم عمده سوختن هیدروژن در ستاره ها بود:

۱- زنجیره پروتون - پروتون

۲- چرخه کربن - نیتروژن - اکسیژن (CNO)

هر دو این موارد با چهار پروتون شروع می شوند و با اتم ^4He به عنوان محصول نهایی ادامه می یابند. فکر ایده استفاده از این منبع (چشمه) انرژی مجاز پایان ناپذیر در شرایط زمینی را می توان در برنامه های سلاح های هسته ای آمریکا و روسیه در اوایل سال های ۱۹۵۰ یافت، یعنی هنگامی که انرژی آزاد شده از انفجار اولین بمب هیدروژنی نشان داد که آیا همجوشی کنترل شده و مداوم باید به فضاهای پارامتری انرژی و زمانی بستگی داشته باشد.

در همین هنگام اولین آزمایش ها برای محصورسازی پلازما در میدان مغناطیسی، برای انجام واکنش های همجوشی در آزمایشگاه های لوس آلاموس (Los Alamos) و دانشگاه پرینستون (Princeton) آغاز گردید. در سال ۱۹۵۱ فیزیکدانان روسی به نام های آندره ساخاروف (Andrei Sakharov) و ایگور تم (Igor Tamm) ماشینی تحت عنوان توکامک (TOKAMAK) را طراحی و پایه گذاری کردند [۱] که هدف آن محصورسازی مغناطیسی پلازما بود. تا سال ۱۹۵۸ تلاش های بسیار زیادی در زمینه انجام همجوشی هسته ای انجام شد، به طوری که دانشمندان متوجه این مطلب شدند که برای این منظور

دانش بسیار زیادی در مورد رفتار پلاسما مورد نیازی باشد و این امر باعث گردید که تا سال ۱۹۶۰ تلاش های بسیار زیادی در این مورد صورت گیرد. بعدها در سال ۱۹۶۸ نوع دیگری از سیستم توکامک به نام T3 که توسط انسیتو کورچاتوف (Kurchatov) پایه گذاری شد، باعث گسترش دانش در زمینه محصورسازی پلاسما از طریق توکامک در طی دهه های بعدی گردید. [۲] این تلاش ها و مطالعات، باعث به وجود آمدن نسل بعدی توکامک به نام ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) شد. این وسیله برای نگهداری پلاسماي سوخت حرارتی هسته ای به مدت چند دقیقه و تولید بهره انرژی خالص، طراحی شده بود.

در اوایل سال ۱۹۶۰ اختراع لیزر باعث شروع کار همجوشی هسته ای از نوع همجوشی محصورشدگی لختی ICF (Inertial Confinement Fusion) برای اولین بار گردید. [۳] مراحل اولیه انجام واکنش فشرده سازی و گرم کردن سوخت درون یک ساچمه، استفاده از اندازه حرکت (تکانه) اعمال شده به سوخت به وسیله ماده قطع به سمت خارج در مدت زمان ایجاد یک پالس لیزری می باشد (اثر راکت). در حال حاضر تلاش های بسیار زیادی در زمینه های تئوری و تجربی برای توسعه اصول و طرح های بدست آمده مختلف در روش همجوشی محصور شدگی لختی انجام می شود. این اصول عبارتند از:

۱) بدست آوردن احتراق موفقیت آمیز: یعنی واکنش های همجوشی هسته ای باید به علت انرژی آزاد شده از ذرات آلفای حاصل از واکنش که دارای برد کوتاهی در سوخت می باشند، خودنگهدار باشند. این امر با طراحی هدف (Target) و همچنین پیکربندی های انفجارات داخلی (درونی) مناسب، امکان پذیر شده است.

۲) افزایش بهره انرژی حرارتی - هسته ای (نسبت انرژی هسته ای - حرارتی خروجی به انرژی هسته ای - حرارتی داخلی) مورد نیاز برای فشرده سازی ذرات همجوشی کننده و گرم کردن و حرارت دادن آن ها برای انجام واکنش همجوشی هسته ای بهتر و مناسب تر برای این هدف ها، بدون اینکه به پایداری این انفجارات درونی لطمه ای وارد شود. اما متأسفانه هدف هایی که امروزه با طرح های مختلفی طراحی گردیده اند و می توانند بهره های انرژی بیشتری را ایجاد کنند، در معرض ناپایداری های هیدرودینامیکی نیز قرار می گیرند. این امر باعث می شود که مطالعه بیشتر در مورد رشد ناپایداری های هیدرودینامیکی در هدف های ICF و همچنین مکانیزم هایی که باعث افزایش پایداری هدف ها شده و در نتیجه ناپایداری های هیدرودینامیکی را به

عنوان فرآیندهای منفی در هر واکنش همجوشی هسته ای کاهش داده و به حداقل مقدار ممکن برسانند، مورد نیاز باشد. امروزه تحقیقات زیادی بر روی کاهش ناپایداری های هیدرودینامیکی از طریق طراحی طرح های جدید هدف های ICF و مفاهیم پیشرفته در دینامیک انفجارات درونی و کاهش دامنه رشد ناپایداری های هیدرودینامیکی انجام می شود. [۶,۵,۴]

۱-۲- انرژی همجوشی هسته ای

به عنوان ساده ترین و ابتدایی ترین تعریف در مورد فرآیند 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 البته در این فرآیند ممکن است مقداری انرژی آزاد و یا مقداری انرژی برای انجام واکنش همجوشی صرف شود. همانطور که اشاره کردیم، همجوشی هسته ای منشا اصلی تولید انرژی در ستارگان می باشد و خورشید از جمله ستارگانی است که واکنش های همجوشی هسته ای بسیار زیادی در آن انجام می شود. در واقع در خورشید دما و چگالی بسیار زیاد که برای انجام هر واکنش همجوشی هسته ای لازم است وجود دارد. مانع اصلی در انجام واکنش های همجوشی هسته ای، پدیده سد کولنی می باشد که در قسمت بعد در مورد آن توضیح خواهیم داد. البته بعضی از واکنش های همجوشی هسته ای نیز وجود دارند که فقط در ستارگان، به دلیل دما و چگالی بالا انجام می شوند و انجام آنها در روی زمین امکان پذیر نیست و یا به عبارت دیگر آهنگ انجام این واکنش ها در روی زمین بسیار پایین است.

۱-۳- سد کولنی در همجوشی هسته ای

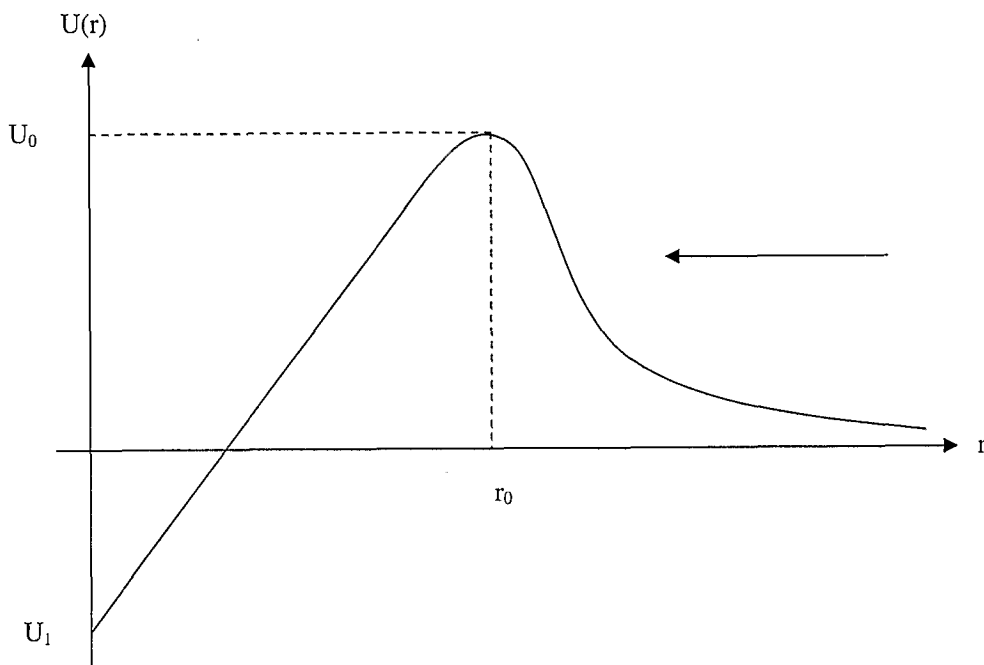
برای انجام واکنش های همجوشی هسته ای، اتم ها باید در فاصله ای از هم قرار بگیرند که نیروهای جاذبه هسته ای قوی بر نیروهای دافعه کولنی ناشی از هسته های اتم ها غلبه کند و واکنش همجوشی هسته ای انجام شود. اگر دو هسته را به عنوان مثال با بارهای Z_1e و Z_2e در نظر بگیریم، در این صورت انرژی پتانسیل کولنی این دو بار را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$U = - \int_{\infty}^r \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1-1)$$

بدیهی است که انرژی جنبشی ذرات همجوشی کننده باید از این انرژی پتانسیل بیشتر باشد تا واکنش همجوشی هسته ای انجام شود. به عنوان مثال برای دو پروتون با فاصله ۵ فرمی ($1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$) از یکدیگر، انرژی پتانسیل ناشی از نیروی دافعه کولنی بین آن ها، عبارت است از: ($r = r_0 = 5\text{fm}$)

$$U = U_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \times (5 \times 10^{-15})} = 0.29\text{Mev} \quad (2-1)$$

در این صورت، هنگامی که انرژی جنبشی نسبی این دو پروتون، بیش از 0.29Mev باشد، نیروی جاذبه هسته ای بر نیروی دافعه کولنی غلبه می یابد. در شکل (۱-۱)، نمودار انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای دو پروتون را در شرایط اشاره شده ارائه نموده ایم.



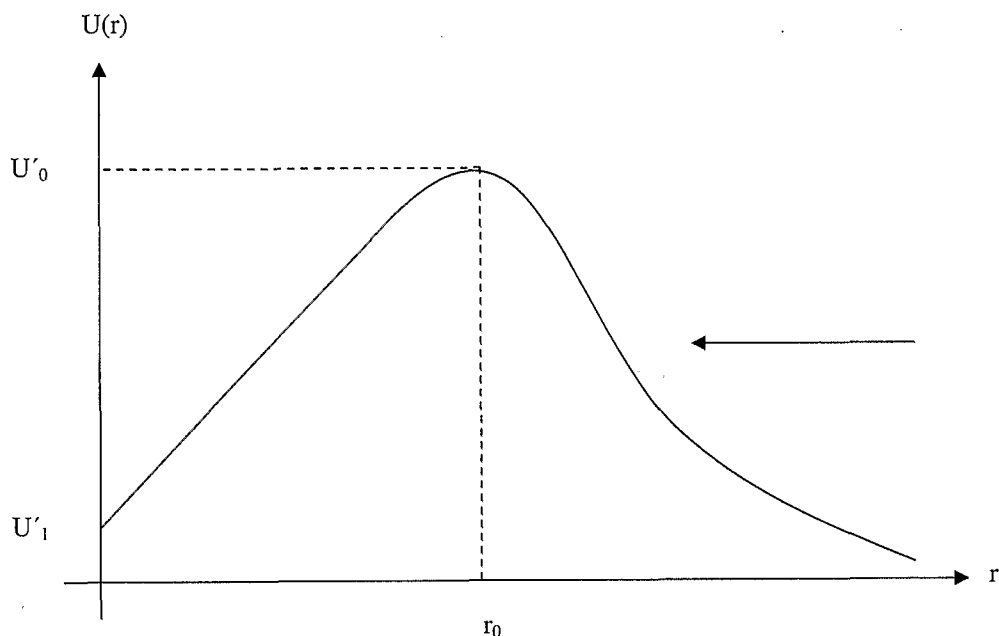
شکل (۱-۱): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای دو پروتون

همانطور که در شکل (۱-۱) مشخص است، اگر فاصله نسبی دو پروتون از بینهایت تا r_0 کاهش یابد، پتانسیل کولنی افزایش می یابد. تا اینکه در $r = r_0$ به بیشینه مقدار خود می رسد. حال اگر $r < r_0$ گردد، در این صورت نیروی جاذبه هسته ای قوی تر

نیروی دافعه کولنی غلبه پیدا می کند، انرژی پتانسیل کولنی کاهش یافته و انرژی هسته ای حاکم می شود. در این حالت احتمال وقوع واکنش همجوشی هسته ای وجود دارد. هر چقدر به سمت فواصل نسبی کمتر حرکت کنیم، احتمال وقوع واکنش همجوشی افزایش می یابد، به طوریکه با توجه به نمودار فوق، U_1 را انرژی همجوشی هسته ای می نامیم که همانطور که از نمودار مشخص است مقدار آن برای دو پروتون منفی است، زیرا انرژی پتانسیل مربوط به نیروی هسته ای بزرگتر از انرژی پتانسیل کولنی است. اما در حالت کلی برای هسته هایی غیر از پروتون که عدد اتمی آن ها بزرگتر از یک باشد، انرژی پتانسیل کولنی را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$U'_0 = Z_1 Z_2 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} = Z_1 Z_2 U_0 \quad (3-1)$$

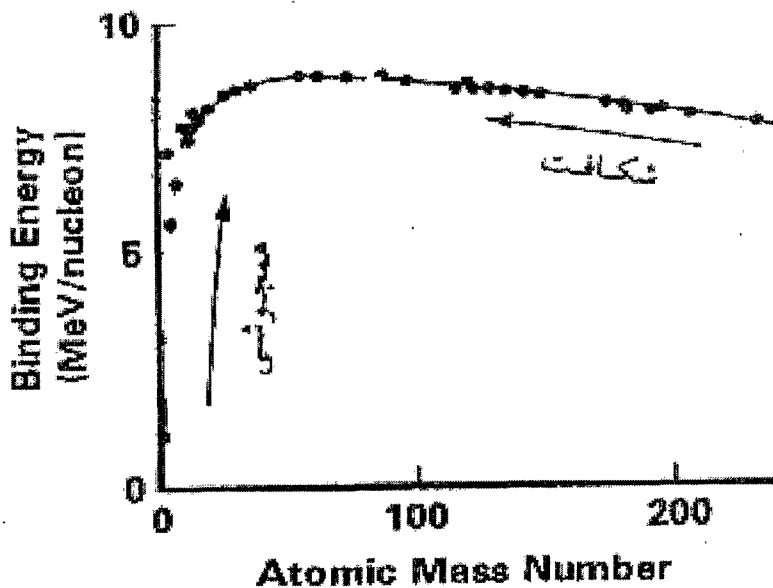
در شکل (۲-۱)، نمودار انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای دو هسته سنگین را ارائه نموده ایم.



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

همانطور که مشخص است، اختلاف بین U_0 و U_1 در شکل (۱-۱) و همچنین U'_0 و U_1 در شکل (۲-۱) زیاد نیست. بنابراین از این دو نمودار می توان دریافت که اگر Z_1 و Z_2 بزرگ باشند، U'_1 می تواند مثبت باشد. یعنی پتانسیل کولنی برای هسته هایی با

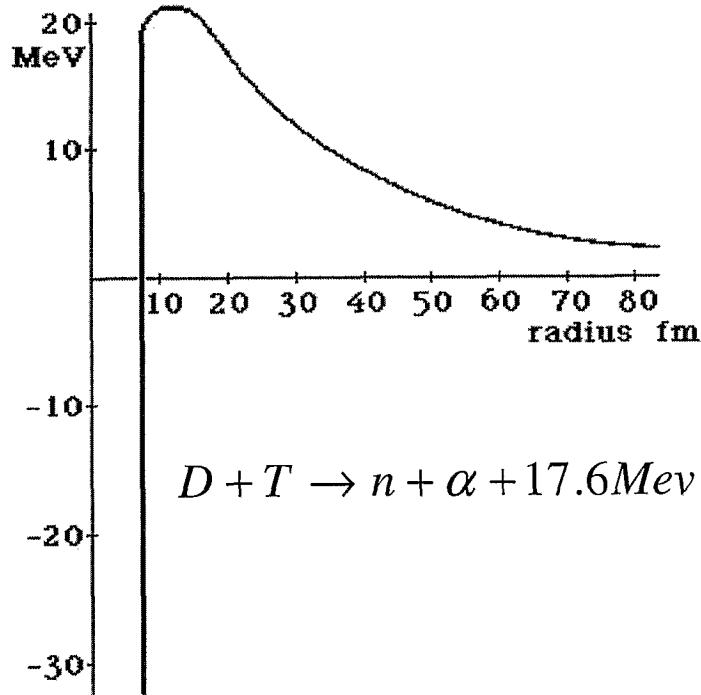
Z بزرگتر نسبت به هسته هایی با Z کوچکتر، بیشتر است. بنابراین در این حالت، نیروی جاذبه هسته ای قوی تبدیل به نیروی دافعه کولنی می شود. به عبارت دیگر سد کولنی برای هسته های سنگین، بزرگتر از هسته های سبک است. به علاوه پایداری دو هسته، هنگامی که در فاصله دوری از هم قرار دارند، خیلی بیشتر از هنگامی است که به هم نزدیک می شوند. بنابراین با توجه به این دلایل، هسته های سنگین ممکن است نتوانند فرآیند همجوشی هسته ای را انجام دهند. زیرا داری سد کولنی بسیار بزرگتری می باشند و غلبه بر این سد کولنی بسیار مشکل می باشد. به طور کلی هرچه انرژی جنبشی ذرات همجوشی کننده بیشتر باشد، احتمال انجام واکنش همجوشی هسته ای افزایش می یابد. در شکل (۱-۳)، نمودار تغییرات انرژی بستگی بر نوکلئون هسته ها بر حسب عدد جرمی ارائه شده است. همانطوری که از این شکل مشخص است، امکان وقوع فرآیند شکافت هسته ای برای هسته های سنگین و امکان وقوع فرآیند همجوشی هسته ای برای هسته های سبک وجود دارد.



شکل (۱-۳): نمودار تغییرات انرژی بستگی بر نوکلئون هسته ها بر حسب عدد جرمی. [۷]

بدیهی است که هر چقدر انرژی جنبشی ذرات همجوشی کننده بیشتر باشد، ضخامت سد کولنی باریک تر می شود و بنابراین احتمال انجام واکنش همجوشی هسته ای بیشتر می گردد. به طوریکه در انرژی های خیلی زیاد این ضخامت خیلی کم شده و به فاصله نیروهای جاذبه هسته ای قوی می رسد. به عنوان مثال در مورد سوخت دوتریوم - تریتوم (DT) در انرژی ۱ keV ضخامت

سد کولنی تقریباً ۱۵۰۰ fm و در انرژی ۱۰ keV این فاصله برابر ۵ fm می باشد، که این فاصله تقریباً همان فاصله انجام واکنش همجوشی هسته ای می باشد. در شکل (۱-۴) نمودار تغییرات انرژی پتانسیل دو هسته D-T بر حسب فاصله نسبی آن ها ارائه شده است.



شکل (۱-۴): نمودار تغییرات انرژی پتانسیل دو هسته دوتریوم - تریتیوم بر حسب فاصله نسبی آن ها. [۷]

۱-۴- راه های غلبه بر سد کولنی در فرآیندهای همجوشی هسته ای

به طور کلی شرایط ایجاد واکنش همجوشی هسته ای با آهنگ مناسب عبارت است از:

۱- دمای بالا ۲- چگالی بالا

به طوری که هر چه دمای محیط همجوشی بیشتر و همچنین چگالی محیط همجوشی بیشتر باشد، احتمال وقوع واکنش همجوشی هسته ای بیشتر خواهد بود.