

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

(گرایش هسته ای)

بررسی پارامترهای ساختار هدف طرح راه اندازی مستقیم در همجوشی  
محصورشدگی اینرسی

از:

معصومه احمدی

استاد راهنما :

دکتر عباس قاسمی زاد

استاد مشاور:

لیلا غلام زاده

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادر مهربان و بزرگوارم

## تشکر و قدردانی

پیش از هر چیز خداوند مهربان را شاکرم که در تمام لحظات زندگی یاریم نمود.

از جناب آقای دکتر عباس قاسمی زاد، استاد راهنمای دلسوز و بزرگووارم که راهنمایی ها و تشویق های ایشان همواره باعث دلگرمی اینجانب بوده و در طی مراحل انجام این پروژه از هیچ کوششی دریغ ننمودند، کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر مسعود وهابی مقدم و جناب آقای دکتر حمیدرضا مشایخی که داوری جلسه دفاعیه اینجانب را بر عهده گرفتند و از جناب آقای دکتر سعید مهدوی فر که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه حضور یافتند، صمیمانه ممنون و سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر سعید سهیلی، استاد مهربانم در دانشگاه بوعلی سینا همدان به خاطر همه آنچه از ایشان آموخته ام، بسیار سپاسگزارم.

از استاد مشاور و دوست عزیزم، خانم دکتر لیلا غلام زاده که همراهی ایشان در طول انجام این پروژه موجب دلگرمی اینجانب بوده، ممنونم.

بر خود لازم می دانم که از تمامی اساتید محترم گروه فیزیک، که اینجانب در طی سال های تحصیلم، دانشجوی این عزیزان بوده ام، تشکر و قدردانی نمایم.

در پایان از دوستان عزیزم که لحظات خوبی را با ایشان تجربه نمودم، بسیار سپاسگزارم.

معصومه احمدی

شهریور ۹۰

بررسی پارامترهای ساختار هدف طرح راه اندازی مستقیم در همجوشی محصورشدگی اینرسی  
معصومه احمدی

فرآیند همجوشی محصورشدگی اینرسی (لختی)، به طور کلی به دوروش راه اندازی مستقیم و غیرمستقیم قابل دستیابی می باشد. در هر کدام از ایده ها تلاش می شود تا حد ممکن بازده انرژی حاصل از همجوشی را به روشهایی افزایش دهیم. انتخاب نوع راه انداز و ساختار هدف می تواند نقش مهمی را ایفا کند. با توجه به قابلیت بالای انتقال انرژی باریکه های یون سنگین به هدف، این راه انداز می تواند گزینه خوبی برای همجوشی محصور شدگی لختی باشد. هدف های کروی و استوانه ای دو طرح مهم در ساختار هدف ها می باشد. با توجه به این که نهشت ذرات پرنرژی باریکه یونی در ماده طبیعتاً به صورت استوانه ای است، این نوع هدف ها می تواند ایده مناسبی برای هدف های همجوشی یون سنگین باشد. استفاده از میدان مغناطیسی محوری در این هدف ها می تواند تا حد خوبی در افزایش بازده انرژی موثر باشد. هدف اصلی استفاده از میدان های مغناطیسی، افزایش نهشت انرژی ذرات آلفا و کاهش هدر رفت حرارتی از پلاسمای همجوشی می باشد. لذا در این پایان نامه به بررسی ساختار هدف در همجوشی یون سنگین و همچنین مزیت استفاده از میدان مغناطیسی در کاهش توان راه انداز پرداخته ایم. نتایج بدست آمده در این پایان نامه نشان داده است که استفاده از میدان مغناطیسی محوری در هدف های استوانه ای تا حد مطلوبی موجب کاهش هدر رفت رسانش حرارتی می شود. همان طور که می دانیم یکی از محصولات واکنش همجوشی DT، ذرات آلفا می باشد که با استفاده از میدان مغناطیسی محوری می توانیم تعداد بیشتری از آنها را در پلاسمای همجوشی محصور کنیم تا انرژی شان را به نهشت بگذارند. این موضوع در کاهش شرایط آستانه احتراق می تواند بسیار موثر باشد.

کلیدواژه: همجوشی یون سنگین ، هدف کروی، هدف استوانه ای، میدان مغناطیسی، نهشت انرژی ذرات

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د	چکیده فارسی .....
ذ	چکیده انگلیسی .....
۱	مقدمه .....
<b>فصل اول: همجوشی هسته ای</b>	
۳	۱-۱- شکافت هسته ای .....
۵	۲-۱- همجوشی هسته ای .....
۱۱	۱-۲-۱- پارامتر سیگما-وی .....
۱۴	۲-۲-۱- پارامتر بر حسب توزیع ماکسولی .....
۱۵	۳-۱- روش های دستیابی به همجوشی هسته ای .....
۱۵	۱-۳-۱- همجوشی داغ .....
۱۸	۲-۳-۱- همجوشی کاتالیزور میونی ( $\mu\text{CF}$ ) .....
۱۹	۴-۱- معیار لاوسون .....
<b>فصل دوم: پارامترهای همجوشی هسته ای</b>	
۲۴	۱-۲- اصول همجوشی محصورشدگی لختی .....
۲۴	۱-۱-۲- زمان محصورشدگی لختی .....
۲۵	۲-۱-۲- کسر مصرف سوخت .....
۲۱	۲-۱-۲- کسر مصرف سوخت .....
۲۷	۳-۱-۲- پارامتر محصورسازی .....
۳۰	۲-۲- فیزیک ایده راه اندازی مستقیم .....
۳۱	۳-۲- فیزیک ایده راه اندازی غیر مستقیم .....
۳۳	۴-۲- بررسی مزایا و مشکلات ایده راه اندازی مستقیم .....
۳۴	۱-۴-۲- ناپایداریهای رایلی - تیلور کلاسیک .....
۳۶	۲-۴-۲- ناپایداری ریخت مایر- مشکوف .....
۳۹	۵-۲- هدف ها در روش راه اندازی مستقیم .....
۴۱	۶-۲- بررسی مزایا و مشکلات روش راه اندازی غیرمستقیم .....
۴۴	۷-۲- پرتوهای محرک .....
۴۵	۱-۷-۲- لیزرها .....
۴۵	۲-۷-۲- پرتوهای الکترون نسبیتی (REB) .....
۴۵	۳-۷-۲- باریکه های یونی .....

## فصل سوم: بررسی پارامترهای ساختار هدف طرح راه اندازی مستقیم در همجوشی محصورشدگی اینرسی

۴۸	..... ۱-۳ شتاب دهنده های یون سنگین
۴۹	..... ۱-۳-الف - شتاب دهنده های فرکانس رادیویی
۵۰	..... ۱-۳-ب - شتاب دهنده های القایی
۵۱	..... ۱-۳-پ - شتاب دهنده های سینکروترونی
۵۲	..... ۲-۳ - ساختار هدف در روش راه اندازی مستقیم
۵۲	..... ۱-۲-۳ ساختار هدف در همجوشی لیزری
۵۳	..... ۲-۲-۳ ساختار هدف در همجوشی یون سنگین
۵۵	..... ۲-۲-۳-الف - توان توقف
۵۸	..... ۲-۲-۳-ب برهم کنش های هسته ای در لایه ها
۵۹	..... ۳-۳ هدف های استوانه ای (Cylindrical Targets)
۶۰	..... ۱-۳-۳ نهشت انرژی ذرات آلفا
۶۴	..... ۲-۳-۳ تعادل توان حرارتی در حجم سوخت
۷۰	..... ۴-۳ کاهش توان راه انداز
۷۱	..... ۵-۳ ساختار هدف های استوانه ای در راه انداز یون سنگین
۷۴	..... ۱-۵-۳ مکانیسم زمانی هدر رفت انرژی در انفجارهای شبه آدیاباتیک (Quasi- Adiabatic)

## فصل چهارم: نتایج و پیشنهادات

۸۰	..... ۱-۴ نتیجه گیری
۸۶	..... ۲-۴ پیشنهاد برای ادامه کار در آینده
۸۷	..... مراجع

## فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۱-۱): مقایسه برخی پارامترهای ICF و MCF ..... ۱۸

جدول (۱-۳): تغییرات آهنگ واکنش همجوشی بر حسب درصدهای مختلف سوخت دو تریتم-تریتم ..... ۵۵

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۴	شکل (۱-۱): شکافت هسته ای اورانیم-۲۳۵.....
۵	شکل (۲-۱): نمونه ای شبیه سازی شده از موتور فضاپیما با استفاده از انرژی همجوشی هسته ای.....
۶	شکل (۳-۱): انرژی بستگی متوسط بر نوکلئون هسته های پایدار به صورت تابعی از عدد جرمی.....
۹	شکل (۴-۱): انرژی پتانسیل بر حسب فاصله دو هسته.....
۹	شکل (۵-۱): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته ای بین دو پروتون به طور نمایشی.....
۱۰	شکل (۶-۱): سد کولنی برای مخلوط دوتریوم-تریوم.....
۱۳	شکل (۷-۱): نمودار پارامتر سیگما - وی بر حسب دمای یونی محیط همجوشی برای تعدادی از واکنشهای همجوشی.....
۱۶	شکل (۸-۱): طرحی از محفظه توکامک.....
۱۷	شکل (۹-۱): روش های گرم کردن پلاسمای سوخت در روش <b>MCF</b> .....
۱۹	شکل (۱۰-۱): طرح شماتیک فرآیند همجوشی کاتالیزور میونی.....
۲۰	شکل (۱۱-۱): دیاگرام جریان برای یک راکتور همجوشی هسته ای.....
۲۳	شکل (۱-۲): مراحل همجوشی محصورشدگی لختی.....
۲۷	شکل (۲-۲): تغییرات دمایی.....
۳۰	شکل (۳-۲): مراحل همجوشی هسته ای در راه اندازی مستقیم.....
۳۲	شکل (۴-۲): نمایی از یک هوهرلام.....
۳۲	شکل (۵-۲): مراحل همجوشی هسته ای در راه اندازی غیرمستقیم.....
۳۴	شکل (۶-۲): ناپایداری رایلی - تیلور در میدان گرانشی.....
۳۵	شکل (۷-۲): نمایی از برخی عوامل ناپایداری در همجوشی محصورشدگی لختی.....
۳۶	شکل (۸-۲): طرحی از ناپایداری ریخت مایر - مشکوف که در اثر موج ضربه ای به وجود می آید.....
۳۹	شکل (۹-۲): نمایی از هدف طراحی شده در راه انداز مستقیم در موسسه <b>LLE</b> .....
۴۰	شکل (۱۰-۲): پالس لیزری مناسب برای همجوشی لختی.....
۴۱	شکل (۱۱-۲): نمونه ای از یک هوهرلام.....
۴۳	شکل (۱۲-۲): نهشت انرژی باریکه یونی در مبدل.....
۴۴	شکل (۱۳-۲): هدف های همجوشی با قطع کننده برلیوم در مقایسه با ساچمه پایه ای <b>NIF</b> .....
۴۹	شکل (۱-۳): نمایی از یک شتاب دهنده فرکانس رادیویی.....
۵۰	شکل (۲-۳): اصول عملکرد شتاب دهنده خطی القایی.....
۵۱	شکل (۳-۳): مراحل عبور یک باریکه یونی برای برخورد به هدف همجوشی محصورشدگی لختی.....
۵۳	شکل (۴-۳): قطاعی از یک هدف کروی با راه اندازی لیزری.....
۵۶	شکل (۵-۳): نمودار نهشت انرژی یک باریکه یونی هنگام نفوذ در هدف.....



- شکل(۳-۶): آهنگ کاهش انرژی یون در هدف که در پیک براگ بیشترین نهشت انرژی را خواهد داشت ..... ۵۶
- شکل(۳-۷): قطاعی از یک هدف کروی در راه اندازی یون سنگین ..... ۵۸
- شکل(۳-۸): طرح شماتیک یک هدف استوانه ای، تقریباً به شعاع (۳-۱) میلی متر و طول (۳۰-۱۰) میلی متر ..... ۵۹
- شکل(۳-۹): ذرات آلفای تولید شده در حضور میدان مغناطیسی ..... ۶۱
- شکل(۳-۱۰): کسر نهشت ذرات آلفا برحسب حضور در میدان مغناطیسی ..... ۶۲
- شکل(۳-۱۱): نمایی از چگونگی وقوع پدیده تابش ترمزی ..... ۶۵
- شکل(۳-۱۲): نمودار شرایط آستانه احتراق. در طول هر منحنی احتراق مقدار پارامتر  $BR$  ثابت فرض می شود ..... ۶۹
- شکل(۳-۱۳): نمایی از یک هدف استوانه ای مغناطیسی شده با استفاده از راه انداز یون سنگین ..... ۷۲
- شکل(۳-۱۴): نمایی از تبدیل انرژی در هدف های استوانه ای ..... ۷۲
- شکل(۳-۱۵): نمودار فشار وارد بر محور هدف استوانه ای بر حسب طول پالس یونی در سه هل دهنده متفاوت .... ۷۳
- شکل(۳-۱۶): نمایی از سیستم ووبلر و کانونی شدن نهایی باریکه یونی ..... ۷۸
- شکل(۴-۱): نمودار تغییرات کسر نهشت انرژی ذرات آلفا متناسب با افزایش میدان مغناطیسی ..... ۸۱
- شکل(۴-۲): نمودار تغییرات کسر نهشت انرژی ذرات آلفا بر حسب تغییرات میدان ..... ۸۲
- شکل(۴-۳): نمودار تغییرات رسانش حرارتی در حضور میدان مغناطیسی ..... ۸۳
- شکل(۴-۴): نمودار تغییرات عوامل سرمایشی سوخت ناشی از تابش ترمزی و رسانش حرارتی بر حسب پارامتر  $b$  ..... ۸۴
- شکل(۴-۵): نمودار تغییرات توان راه انداز با افزایش نسبت همگرایی سوخت ..... ۸۵
- شکل(۴-۶): نمودار تغییرات توان راه انداز بر حسب  $\rho R$  برای سه مقدار متفاوت  $C_p$  ..... ۸۵

پیشرفت جامعه بشری و توسعه تمدن مستقیماً متناسب با افزایش بازدهی و بهره کار و در نتیجه بالا رفتن استانداردهای زندگی اجتماعی است و لزوماً این پیشرفت اجتماعی و تکنولوژی، موجب افزایش استفاده از انرژی و همچنین لزوم دستیابی به منابع جدید و یا بهره بیشتر انرژی می‌گردد.

امروزه قسمت اعظم انرژی مورد نیاز بشر با استفاده از نیروگاههای آبی، فسیلی و هسته ای تامین می‌شود. با توجه به اینکه استفاده از انرژی آبهای جاری بسیار محدود است و فقط در نواحی خاصی از جهان در دسترس است و ذخائر سوختهای فسیلی نیز رو به اتمام است و روز به روز بدست آوردن آنها مشکلتر می‌شود، در نتیجه بدیهی است که برای تامین انرژی از نیروگاههای شکافت هسته ای استفاده گردد. البته راه دیگری برای دستیابی به انرژی هسته ای نیز وجود دارد که تحت عنوان همجوشی هسته ای نامیده می‌شود. اما از آنجایی که تحقیقات دانشمندان در تولید انرژی از طریق همجوشی هسته ای هنوز به مرحله بهره برداری نرسیده، لذا تقریباً تمامی انرژی هسته ای در جهان از طریق نیروگاههای شکافت هسته ای تولید می‌شود.

# فصل اول

همجوشی هسته ای

تلاش برای درک ماهیت اساسی ماده، ریشه در تفکرات فیلسوفان یونان باستان، بویژه دموکریتوس در سده چهارم دارد. با پیشرفت جامعه بشری و توسعه تمدن نیاز به بررسی روش های کسب انرژی بسیار ضروری به نظر می رسید. در تلاش به منظور درک رموز طبیعت، بشر امروزی سعی در استفاده معقولانه از منابع انرژی می کند و کاوش و دقت بیشتر در این منابع، به او درک عمیق تری از پدیده های طبیعی خواهد داد.

در این فصل به مفاهیم اولیه و اساسی همجوشی هسته ای و روش های دستیابی به آن پرداخته شده است.

### ۱-۱- شکافت هسته ای

جرم و انرژی کمیت های مهم فیزیکی و به ظاهر ساده هستند که جهان ما را تشکیل داده اند. اغلب در سطوح پایین، این دو مفهوم واقعیت یگانه ای از خود به عنوان جرم یا انرژی نشان می دهند که توسط رابطه مشهور انیشتین به هم مربوط می شوند:

$$E = \Delta mc^2 \quad (1-1)$$

تلاش برای درک ماهیت اساسی ماده، بشر را به فرآیندهای نخستین مراحل تکامل جهان که پس از مهبانگ اتفاق افتاده، رهنمون می سازد. فرایند تبدیل جرم به انرژی و عکس آن امکان پذیر است. نمونه ای از تبدیل جرم به انرژی، تولید زوج و آفرینش یک زوج الکترون و پوزیترون قابل مشاهده است. اما آنچه برای ما به لحاظ تولید انبوه انرژی دارای اهمیت می باشد، تبدیل جرم به انرژی و مصرف آن به اشکال گوناگون است.

در سطوح هسته ای به دو روش کلی می توان به این مهم دست یافت.

الف) شکافت هسته ای (Nuclear Fusion)

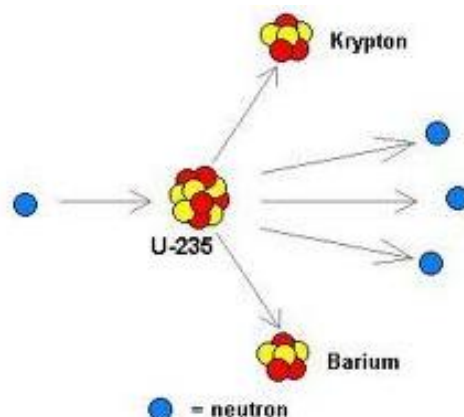
ب) همجوشی هسته ای (Nuclear Fusion)

شکافت هسته ای، فرآیند جداسازی هسته اتم سنگین به دو یا چند اتم سبکتر است به نحوی که وقتی هسته سنگین توسط نوترون ها بمباران می شود، تبدیل به چند هسته دیگر و تعدادی نوترون می شود. مجموع جرم محصولات واکنش از جرم

هسته سنگین کمتر است. این اختلاف جرم طبق فرمول انیشتین تبدیل به مقدار زیادی انرژی می گردد. البته میزان انرژی نوترون ها بسته به نوع انتخاب سوخت متفاوت خواهد بود.

واکنش شکافت، مدتهای مدیدی است که بطور کنترل شده، اقتصادی و مداوم در راکتورهای هسته ای حرارتی انجام می شود و تنها عامل محدود کننده در استفاده از نیروگاههای شکافت، میزان کل اورانیوم موجود در زمین است.

واکنش شکافت هسته ای برای اولین بار در سال ۱۳۱۸ توسط هان (Otto Hahn) و استراش مان (Fritz Strassman) صورت گرفت. برای مثال ایزوتوپ سبک اورانیم ( ${}_{92}^{235}U$ )، شکافت را با نوترون های حرارتی متحمل می شود (شکل ۱-۱). انرژی برانگیختگی که توسط هسته مرکب ( ${}_{92}^{236}U^*$ ) در گیراندازی یک نوترون حرارتی ( $E < 1eV$ ) کسب می کند، آنقدر بزرگ است که موجب شکافت می شود. ایزوتوپ سنگین تر و فراوان تر (۹۹/۳ درصد) اورانیوم-۲۳۸ در صورتی قابلیت شکافت را دارد که توسط نوترون های سریع، یعنی نوترون هایی با حداقل انرژی یک مگا الکترون ولت، بمباران شوند. در سال ۱۹۴۲ میلادی، اولین واکنش زنجیری خودنگه دار شکافت هسته ای توسط انریکو فرمی انجام شد. در این راکتور، اورانیم طبیعی (۰/۷ درصد  ${}^{235}U$  و ۹۹/۳ درصد  ${}^{238}U$ ) به عنوان سوخت و گرافیت به عنوان کندساز نوترون به کار رفت. عنصر دیگری که در راکتورهای هسته ای می تواند مورد استفاده قرار گیرد، توریم است که به دلیل داشتن سطح مقطع پایین، در مقایسه با اورانیوم، کم ارزش تر بوده و در رقابت سوخت های هسته ای تلاش کمتری برای استخراج آن انجام شده است.



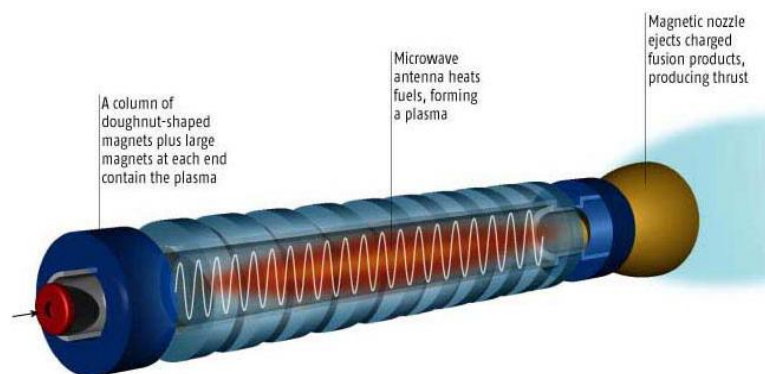
شکل (۱-۱): شکافت هسته ای اورانیم-۲۳۵ [۱].

در مقابل این عناصر طبیعی، پلوتونیوم-۲۳۹ و اورانیوم-۲۳۳، هسته های رادیواکتیو تولید شده ساختگی هستند که می

توانند با جذب نوترون حرارتی، فرآیند زایش را طی واکنش های زیر انجام دهند:



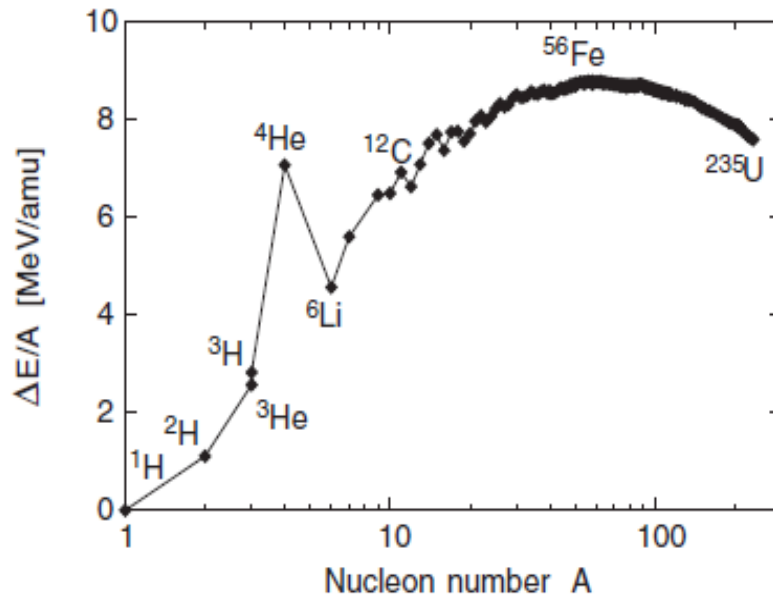
نیاز روز افزون به انرژی، در زمینه های مختلف به شدت در حال افزایش است. از انرژی مورد نیاز برای مصارف خانگی تا انرژی لازم برای حرکت فضاپیماها برای کشف اسرار کیهان، همگی مستلزم منابع عظیم انرژی می باشند. می دانیم که یک عامل بسیار مهم در پرتاب فضاپیماها، مساله سرعت است و دستیابی به آن نیازمند انرژی فوق العاده می باشد. اما سوخت های شیمیایی و حتی انرژی تولید شده از شکافت هسته ای با توجه به منابع محدود اورانیوم نمی توانند منابع دائمی و مطمئنی برای تولید انرژی مورد نیاز ما باشند. بنابراین کاملاً واضح می باشد که نسل جدیدی از فرآیندهای تولید انرژی مورد نیاز است (شکل ۲-۱).



(۲-۱): نمونه ای شبیه سازی شده از موتور فضاپیما با استفاده از انرژی همجوشی هسته ای [۱].

## ۲-۱- همجوشی هسته ای

از دیرباز خورشید برای بشر به عنوان منبع نور و گرما، حیات بخش بوده و توجه به نحوه تولید انرژی در آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. موضوع جالب توجه در اینجا نیز، تبدیل جرم به انرژی است. اما این بار نوع سوخت، متفاوت از هسته های سنگین شکافت هسته ای است. اگر به شکل (۳-۱) منحنی انرژی بستگی متوسط توجه کنیم، دو فرآیند کاملاً متفاوت را مشاهده می کنیم. البته هر دو روند در تبدیل جرم به انرژی و رسیدن به عناصر پایدارتر مشابه می باشند.



شکل (۱-۳): انرژی بستگی متوسط بر نوکلئون هسته‌های پایدار به صورت تابعی از عدد جرمی [۲].

همانطوریکه در شکل (۱-۳) مشخص است، این تابع نسبتاً یکنواخت، برای هسته‌های در ناحیه نزدیک به آهن، که پایدارترین هسته‌ها هستند، بیشینه پهنی را نشان می‌دهد. برای هسته‌هایی که بسیار سبکتر یا سنگینتر از آهن هستند، انرژی بستگی بر نوکلئون به شدت کوچکتر است. این اختلاف، پایه و اساس فرآیندهای همجوشی و شکافت هسته‌ای است. مبنای فیزیکی همجوشی هسته‌ای این است که اگر دو هسته بسیار سبک آن قدر به یکدیگر نزدیک شوند که در فاصله نیروی جاذبه هسته‌ای قوی قرار بگیرند، هسته‌ای با انرژی بستگی بیشتر (جرم کمتر) تشکیل می‌شود و در نتیجه طبق رابطه انیشتین، انرژی آزاد می‌گردد. همچنین هنگامی که تحت برخورد ذره‌ای مانند نوترون، یک هسته سنگین به دو هسته دیگر (تحت عنوان پاره‌های شکافت) شکافته شود، رهاسازی انرژی را خواهیم داشت:

$$n(\text{thermal}) + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{236}\text{U} \rightarrow \text{fission fragments} + 200 \text{ MeV} \quad (1-4)$$

همجوشی هسته‌ای، فرآیندی است که در خورشید و ستاره‌ها اتفاق می‌افتد. هسته‌های سبک مانند ایزوتوپ‌های هیدروژن تحت شرایط خاص مثل چگالی و دمای بالا با هم ترکیب می‌شوند و با توجه به اختلاف جرمی که در طرفین واکنش وجود دارد، انرژی آزاد می‌شود.

شاید به جرات بتوان گفت همجوئی هسته ای، اولین و قدیمی ترین اتفاق جهان پس مهبانگ (Bing Bang) می باشد. معادله مشهور انیشتین ( $E=MC^2$ ) که در سال ۱۹۰۵ ارائه شد، توانست به خوبی همجوئی را تبیین نماید. در سال ۱۹۲۹ میلادی تلاش راترفورد (Rutherford) برای به عینیت بخشیدن معادله توازن جرم - انرژی، اولین جرعه را برای توضیح تولید انرژی در ستاره ها به وجود آورد. در همین سال میلادی دو دانشمند به نامهای اتکینسون (R. Atkinson) و هاترمن (F.G. Houtermans) توانستند کشف کنند که عناصر سبک مانند ایزوتوپ های هیدروژن میتوانند با هم ترکیب شوند و یک هسته پایدارتر مانند هلیوم را به وجود آورند. هسته محصول، دارای جرم کمتری نسبت به هسته های واکنش دهنده خواهد بود.

این موضوع توسط دانشمندانی مانند ادوارد تلر (E. Teller) و جرج کامو (G. Comow) بسیار مورد توجه قرار گرفت تا در سال ۱۹۳۲ میلادی دانشمندی به نام مارک الیفن (M. Oliphant) توانست عناصر  ${}^3_1\text{He}$  و  ${}^4_2\text{He}$  را کشف نماید. و سر انجام در پایان تمام تلاشها برای درک ماهیت فیزیکی همجوئی هسته ای توسط دانشمندی به نام هنس بته (H. Bethe) در سال ۱۹۳۹ میلادی به نتیجه رسید. او توانست تئوری همجوئی هسته ای را به صورت کمی و کیفی تحلیل کند و این واکنش ها را منشا تولید انرژی در ستاره ها و خورشید معرفی نماید. وی به دلیل تلاش هایش در این زمینه، موفق به کسب جایزه نوبل در سال ۱۹۶۷ میلادی گردید.

فرآیندهای همجوئی هیدروژن می تواند طی این واکنش ها روی زمین انجام شود [۲]:



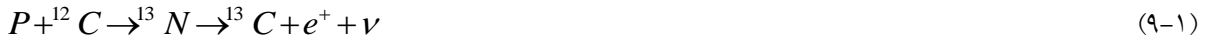
واکنش های فوق مناسب تر از واکنش های (P-P) پروتون- پروتون ستاره ها بر روی زمین است [۲]:



$\nu$  در این واکنش نوترینو می باشد که اولین بار توسط انریکو فرمی پیش بینی شد. واکنش فوق اولین مرحله هم جوئی هسته ای در ستاره هاست. زنجیره دوم واکنش های هسته ای، هیدروژن را به هلیوم تبدیل می کند که توسط بته کشف شد.

البته اکنون ثابت می شود که این واکنش در ستاره هایی که به لحاظ جرم، چگال تر و به لحاظ دما داغ تر هستند، انجام می شود. زنجیره واکنش به صورت زیر است [۲]:





اما نکته مهم و کاربردی، چگونگی انجام واکنش همجوشی در روی زمین است.

یکی از این واکنش های همجوشی قابل انجام، همجوشی دو تریتم- تریتم، به این صورت زیر می باشد:



که در این واکنش ۱۷/۶ مگا الکترون ولت انرژی آزاد می شود. برای انجام این واکنش، نیاز به دمایی در حدود چهل میلیون درجه کلون است تا دو هسته همجوشی کننده، بتوانند بر سد کولنی یکدیگر غلبه کرده و واکنش صورت پذیرد. سوخت دو تریتم فراوان است، اما تریتم محدود می باشد. بهترین روش برای تهیه آن، واکنش بین نوترون و لیتیوم است. از هر دو ایزوتوپ لیتیوم می توانیم به صورت زیر استفاده کنیم [۳]:



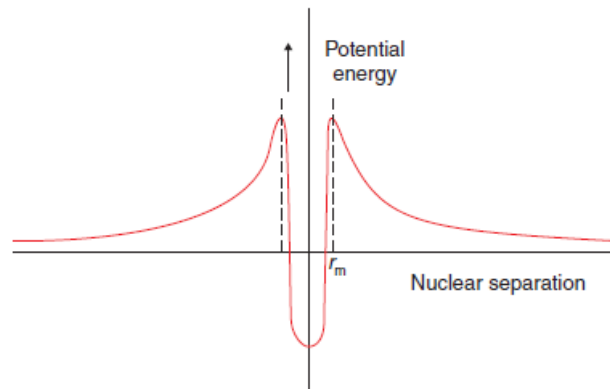
واکنش  $^6Li$  که اغلب توسط نوترون های حرارتی یا کند صورت می گیرد که زمانی اتفاق می افتد که لیتیوم به صورت خنک کننده یا کند کننده در محفظه واکنش همجوشی مورد استفاده قرار گیرد، اما واکنش  $^7Li$  توسط نوترون های سریع صورت می گیرد. لیتیوم طبیعی شامل ۹۲/۶٪  $^7Li$  و ۶/۴٪  $^6Li$  می باشد. یک کیلوگرم لیتیوم، انرژی در حدود ۱۰<sup>۹</sup> J تولید می کند.

به منظور انجام واکنش همجوشی، دو هسته باید به اندازه کافی به هم نزدیک شده و در فاصله مناسب نسبت به هم قرار گیرند تا نیروهای جاذبه ای هسته ای قوی بین آنها حاکم شوند. هسته ها دارای پروتون و در نتیجه دارای بار مثبت هستند. همان طور که می دانیم دو ذره با بار مشابه نیروی دافعه کولنی به هم وارد می کنند. فقط زمانی دو هسته می توانند به هم نزدیک شوند که نیروی جاذبه قوی هسته ای بر نیروی دافعه کولنی بین آنها غلبه کند.

انرژی پتانسیل ناشی از نیروی دافعه کولنی به صورت زیر است [۲]:

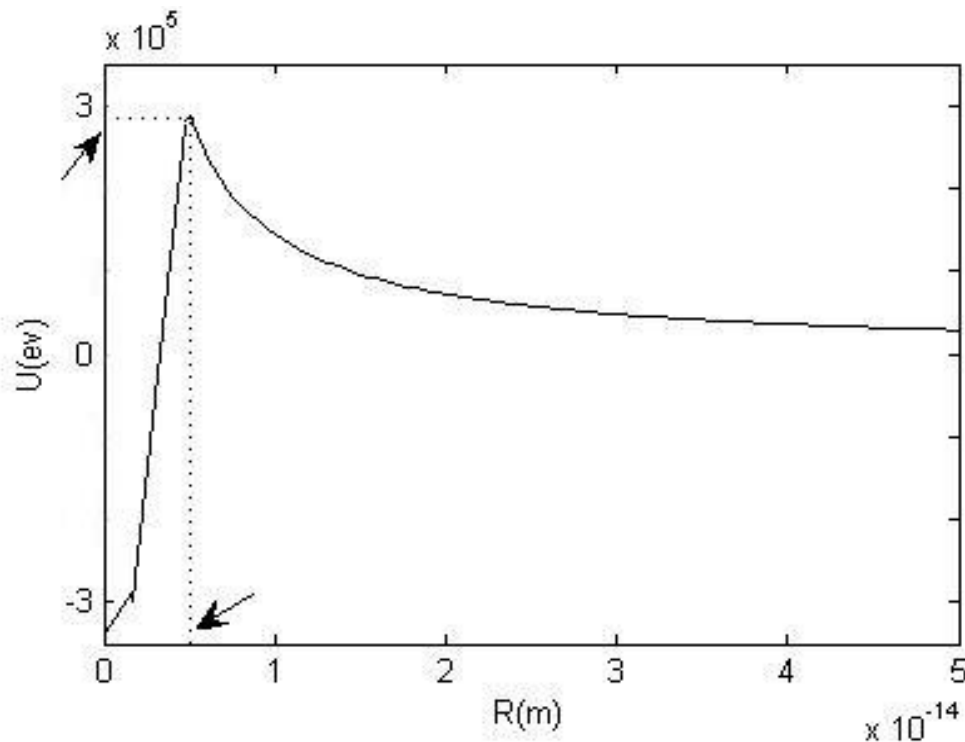
$$u = -\int_{\infty}^r \frac{z_1 z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{z_1 z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (16-1)$$

انرژی پتانسیل ناشی از نیروی دافعه کولنی، با کاهش فاصله افزایش می یابد. شکل (۴-۱) انرژی پتانسیل دو هسته که در فواصل مختلف از یکدیگر قرار دارد را نشان می دهد.



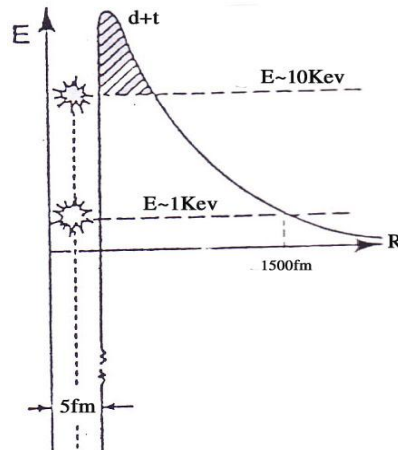
شکل (۴-۱): انرژی پتانسیل بر حسب فاصله دو هسته [۳]:

برای دو پروتون در فاصله‌ای حدود ۵ فمتومتر، مقدار انرژی پتانسیل ناشی از نیروی دافعه کولنی  $0.29$  مگا الکترون ولت است که آنرا با  $U_0$  نشان می دهیم. وقتی فاصله مراکز دو هسته از ۵ فمتومتر کمتر می شود، نیروی جاذبه قوی هسته‌ای به آنها وارد می شود. شکل (۵-۱) رابطه بین انرژی پتانسیل و فاصله بین دو پروتون را نشان می دهد.



شکل (۵-۱): انرژی پتانسیل ناشی از نیروی کولنی و نیروی هسته‌ای بین دو پروتون به طور نمایشی

در برخورد دو ذره برای اینکه واکنش همجوشی انجام شود باید انرژی جنبشی مربوط به سرعت نسبی دو ذره از انرژی پتانسیل  $U_0$  نیروی کولنی بیشتر باشد. زیرا در فواصل بیش از  $r_0$ ، دو ذره باید علی‌رغم نیروی کولنی، به هم نزدیک شوند و در فاصله کمتر از  $r_0$  است که نیروی هسته ای اعمال خواهد شد. ملاحظه شده است که هر چه ذرات با انرژی بیشتری به یکدیگر برخورد کنند ضخامت سد کولنی باریکتر می شود و در نتیجه احتمال همجوشی نیز افزایش می یابد. این موضوع در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.



شکل (۶-۱): سد کولنی برای مخلوط دو تریوم - تریتیوم [۳].

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. 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.

همجوشی هسته ای و شکافت هسته ای در مقایسه با یکدیگر دارای تفاوت های زیر هستند:

۱- شکافت هسته ای به صورت معمول در طبیعت اتفاق نمی افتد در حالی که ما شاهد پدیده همجوشی در ستاره ها و خورشید هستیم.

۲- در شکافت هسته ای اغلب پاره های شکافت، پرتوزایی بالایی دارند، در صورتی که در همجوشی هسته ای این موضوع کاملاً قابل کنترل است و محصولات واکنش عناصر پایدار و سبکی هستند.

۳- انرژی تولید شده در واحد جرم سوخت هسته ای چندین برابر شکافت هسته ای است.

- ۴- برخلاف راکتور شکافت، راکتور همجوشی دارای ایمنی ذاتی در برابر حوادث طبیعی است. برای انجام واکنش همجوشی در راکتور همجوشی باید روابط فیزیکی معینی بین پارامترهای مختلف همجوشی وجود داشته باشد. وقتی این روابط برقرار باشد راکتور بطور پایا عمل می کند. اما اگر این تعادل بین پارامترهای مختلف همجوشی بهم بخورد، راکتور خودبخود خاموش و واکنش همجوشی قطع می شود، در صورتیکه یک راکتور شکافت ذاتا خودایمن نیست.
- ۵- بازدهی کار یک راکتور همجوشی نوعی، بسیار بیشتر از یک راکتور شکافت نوعی است.

### ۱-۲-۱- پارامتر سیگما-وی

منبع توان در سیستم همجوشی، آهنگ واکنش همجوشی هسته ای است. اگر فقط یک نوع واکنش همجوشی انجام شود و

اگر این فرآیند با آهنگ  $R_{FU}$  صورت گرفته و  $Q_{FU}$  واحد انرژی آزاد شده باشد، در این صورت خواهیم داشت [۳]:

$$P_{FU} = R_{FU} Q_{FU} \quad (17-1)$$

اگر واحد  $R_{FU}$ ، تعداد واکنش بر متر مکعب ثانیه و  $Q_{FU}$  دارای واحد مگا الکترون ولت بر واکنش باشد، واحد چگالی توان همجوشی مگا الکترون ولت بر متر مکعب ثانیه خواهد شد.

انرژی رها شده در هر واکنش همجوشی براحتی قابل محاسبه است. اگر واکنش همجوشی بین ذرات نوع  $a$  و  $b$  انجام شود:

$$a + b \rightarrow c + d \quad (18-1)$$

در این صورت  $Q_{FU}$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$Q_{FU} = \left[ \sum_I M_I - \sum_F M_F \right] \cdot C^2 \quad (19-1)$$

در رابطه فوق  $M_I$  جرم مواد واکنش دهنده و  $M_F$  جرم محصولات واکنش می باشد.

در هر حال، تعیین شکل تابعی میزان واکنش  $R_{FU}$ ، بسیار دشوار است. اما اگر محاسبه توان همجوشی،  $P_{FU}$ ، لازم باشد، باید این پارامتر تعیین شود. برای این منظور، ابتدا حالتی را در نظر می گیریم که ذرات نوع  $a$  و  $b$  با چگالی های عددی  $N_a$  و  $N_b$ ، با سرعت های یکسان و تک جهت با هم برخورد کنند و در محل تلاقی یکدیگر، فرآیند همجوشی را انجام دهند. در واحد حجمی که ذرات همدیگر را قطع می کنند، تعداد رویدادهای همجوشی بین دو نوع ذره، با رابطه تناسبی زیر ارائه می شود: