

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

گرایش فیزیک هسته ای

بررسی میزان نهشت انرژی باریکه های یون سنگین

با استفاده از کد شبیه سازی OK2

از:

شیوا قاسمی نژاد

استاد راهنما:

دکتر عباس قاسمی زاد

استاد مشاور:

لیلا غلامزاده کلیشمی

۱۳۸۹

تقديم به همسر عزيزه

تقدیر و تشکر

ابتدا لازم می دانم که از زحمات استاد گرامی آقای دکتر عباس قاسمی زاد که در طول مدت تحصیلم در دانشگاه گیلان برای این جانب کشیده اند تشکر و قدردانی کنم. همچنین از سرکار خانم لیلا غلام زاده که قبول زحمت فرموده و استاد مشاور بنده بوده اند و در انجام این کار بسیار به این جانب کمک نموده اند نیز بسیار ممنونم. به خاطر حمایت های بی دریغ پدر و مادر دلسوز و مهربانم، از آنها نیز کمال تشکر را دارم و دستشان را می بوسم. اما بیش از همه مدیون همراه و همسرخوب و مهربانم حمید هستم که در تمامی مراحل با حمایت های خود و تشویق من در تمام لحظات به من دلگرمی و اعتماد به نفس بخشید. همچنین از تمامی دوستان خود که در مراحل مختلف از کمک های ایشان بهره مند شده ام نیز کمال تشکر را دارم.

فهرست مطالب

پیشگفتار..... ۱

فصل ۱:

اصول کلی همجوشی هسته ای..... ۳

۱-۱ در خورشید چه اتفاقی می افتد؟..... ۴

۲-۱ آیا می توان در روی زمین هم فرایند تولید انرژی مانند خورشید را انجام داد؟..... ۵

۳-۱ انواع واکنش های همجوشی..... ۶

۴-۱ معیار لاوسون..... ۹

۵-۱ روش های محصورسازی پلاسما برای انجام واکنش همجوشی..... ۹

۱-۵-۱ همجوشی مغناطیسی..... ۱۰

۲-۵-۱ همجوشی اینرسی..... ۱۲

۶-۱ مراحل انجام واکنش همجوشی محصور سازی لختی..... ۱۵

۷-۱ روش های راه اندازی همجوشی محصورسازی اینرسی..... ۱۶

۸-۱ روش های احتراق در همجوشی اینرسی..... ۱۸

۹-۱ تکنولوژی باریکه ها..... ۲۰

۱۰-۱ ناپایداری های هیدرودینامیکی در همجوشی اینرسی..... ۲۳

۱۱-۱ راکتور های همجوشی اینرسی..... ۲۵

۱۲-۱ طراحی هدف در همجوشی اینرسی..... ۲۶

۱-۱۲-۱ طراحی هدف های مربوط به باریکه های یونی..... ۳۱

فصل ۲:

همجوشی محصور سازی لختی با روش راه اندازی باریکه های یون سنگین..... ۳۳

۱-۲ راه انداز های یون سنگین برای انجام همجوشی اینرسی..... ۳۴

۱-۱-۲ شتاب دهی یون های سنگین و رسیدن به انرژی کامل..... ۳۸

۲-۲ طراحی هدف برای روش راه اندازی یون سنگین..... ۴۱

۱-۲-۲ نکات اساسی در طراحی هدف برای باریکه های یون سنگین..... ۴۳

۲-۲-۲ انتقال انرژی در هدف..... ۴۴

- ۳-۲ نهشت انرژی باریکه های یون سنگین ۴۴
- ۱-۳-۲ ملزومات برد یون ۴۶
- ۲-۳-۲ برد در ماده سرد ۴۸
- ۳-۳-۲ توان توقف و نهشت انرژی یون های سنگین ۵۰
- ۴-۳-۲ برد و نهشت انرژی باریکه های یون سنگین سریع در ماده داغ چگال ۵۸
- ۴-۲ اثرات اضافی در بر هم کنش باریکه با هدف ۶۰
- ۱-۴-۲ اثرات جمعی پلاسما ۶۱
- ۲-۴-۲ دینامیک تشکیل حفره ۶۱
- ۳-۴-۲ اشعه ایکس و پیش گرمایش هسته ای ۶۱
- ۵-۲ انتخاب نوع باریکه یونی ۶۲

فصل ۳ :

- استفاده از باریکه های یون سنگین در پرتو درمانی ۶۳
- ۱-۳ کاربرد باریکه های یون سنگین در پرتو درمانی ۶۴
- ۲-۳ اصول فیزیکی نهشت انرژی باریکه ها بر روی بافت ۶۹

فصل ۴ :

- معرفی روش های شبیه سازی با استفاده از کد OK2 ۷۳
- ۱-۴ مقدمه ۷۴
- ۲-۴ توصیف الگوریتم کد شبیه سازی OK2 ۷۴
- ۳-۴ فصل مشترک باریکه - هدف ۷۵
- ۴-۴ انتشار باریکه درون ساختار هدف ۷۶
- ۵-۴ وارد کردن داده های مربوط به شکل و ساختار هدف ۷۸
- ۶-۴ مراحل محاسبات فیزیکی موجود در کد شبیه سازی OK2 ۷۸
- ۷-۴ مدل های مورد استفاده در محاسبه توان توقف و نهشت انرژی در کد OK2 ۷۹
- ۸-۴ معرفی قابلیت های کد شبیه سازی OK2 ۸۰

فصل ۵ :

- نتایج شبیه سازی ها ۸۱
- ۱-۵ نتایج اجرای تست های کد شبیه سازی OK2 ۸۲

۲-۵ شکل های حاصل از ترسیم سه بعدی داده ها..... ۸۴

۱-۲-۵ هدف کره:..... ۸۴

۲-۲-۵ هدف استوانه:..... ۹۱

۳-۲-۵ هدف حلزونی:..... ۹۳

۴-۲-۵ هدف قارچ:..... ۹۵

۳-۵ نتایج:..... ۹۷

۴-۵ پیشنهادات برای ادامه کار در آینده:..... ۹۸

فهرست مراجع:..... ۹۹

فهرست شکل ها

فصل ۱

- شکل ۱-۱: انرژی بستگی متوسط به ازای هر نوکلئون بر حسب عدد جرمی A ۵
- شکل ۱-۲: نمودار انرژی پتانسیل کولنی برای دو ذره باردار بر حسب تغییر فاصله ۶
- شکل ۱-۳: واکنش همجوشی DT ۷
- شکل ۱-۴: آهنگ انجام واکنش بر حسب دما برای واکنش های همجوشی مختلف با فرض توزیع ماکسولی ۸
- شکل ۱-۵: حرکت مداری الکترون ها و یون ها در راستای خطوط میدان مغناطیسی ۱۱
- شکل ۱-۶: نمایی از سیستم محصور سازی توکامک ۱۱
- شکل ۱-۷: مراحل انجام همجوشی محصور سازی اینرسی ۱۳
- شکل ۱-۸: روش های (a) راه اندازی مستقیم (b) راه اندازی غیر مستقیم ۱۷
- شکل ۱-۹: نمایی از روش احتراق لکه داغ ۱۹
- شکل ۱-۱۰: مراحل انجام همجوشی در ایده احتراق سریع ۲۰
- شکل ۱-۱۱: تشکیل چگالی بحرانی در برهم کنش لیزر با هدف ۲۱
- شکل ۱-۱۲: تصویری از گسترش زمانی ناپایداری ریلی - تیلور ۲۵
- شکل ۱-۱۳: نمایی از یک نیروگاه همجوشی اینرسی ۲۶
- شکل ۱-۱۴: یک طراحی هدف همجوشی اینرسی نوعی که شامل ناحیه احتراق مرکزی و لایه سوخت بیرونی است ۲۸
- شکل ۱-۱۵: یک ساختار هدف نوعی برای راه انداز باریکه یونی ۳۲

فصل ۲

- شکل ۲-۱: طرز کار یک (الف) شتاب دهنده رادیو فرکانسی (ب) شتاب دهنده القایی ۳۵
- شکل ۲-۲: طراحی های مختلف برای شتاب دهی باریکه های یون سنگین با استفاده از اصل رادیو فرکانسی ۳۶
- شکل ۲-۳: نمایی از مراحل کار شتاب دهنده القایی برای شتاب دادن یون های سنگین ۳۷
- شکل ۲-۴: تصویری از راه انداز غیر مستقیم با راه انداز باریکه های یون سنگین ۴۲
- شکل ۲-۵: نهشت انرژی یک باریکه یونی در هنگام عبور از ماده ۴۶
- شکل ۲-۶: مقایسه برد یون ها در ماده سرد بر حسب جرم و انرژی ۴۷
- شکل ۲-۷: انرژی یون بر حسب تابعی از فاصله توقف در سرب ۴۸
- شکل ۲-۸: تخمین تئوری برد یون های سنگین مختلف در هدف های جامد سرد. منحنی های بالایی مربوط به هدف Al و منحنی های پایینی مربوط به Au می باشند ۴۹
- شکل ۲-۹: یونش هدف Al بر حسب دما و چگالی تعداد ذرات ۵۴
- شکل ۲-۱۰: یونش هدف Al بر حسب دما در چگالی $0.1/g/cm^3$ که در آن خط منحنی نشان دهنده مدل TF و نقاط، نتیجه درون یابی هستند. ۵۴
- شکل ۲-۱۱: توان توقف یون های سرب در هدف آلومینیوم در گستره دمایی $1eV-1KeV$ ۵۶
- شکل ۲-۱۲: نمودار مربوط به دمای هدف در انتهای فرایند نهشت انرژی بر حسب تعداد باریکه های برخوردی ۵۷
- شکل ۲-۱۳: منحنی نهشت انرژی پروتون های $2MeV$ در هدف طلا بر حسب دما ۵۹

فصل ۳

- شکل ۳-۱: نمایی از چگونگی استفاده از یون های کربن در تخریب بافت سرطانی ۶۴
- شکل ۳-۲: (a) منحنی براگ یک باریکه یونی (b) منحنی پیک براگ پهن شده ۶۵
- شکل ۳-۳: دوز زیستی نسبی پیک براگ ژهن شده مربوط به یون های هلیوم، کربن و نئون بر حسب تابعی از عمق نفوذ در آب ۶۶
- شکل ۳-۴: توزیع دوز مربوط به تابش فوتون ها، اشعه های ایکس و گاما و توزیع دوز مربوط به باریکه های کربن تک انرژی | ۶۷
- شکل ۳-۵: طرحی شماتیک از یک تأسیسات مربوط به درمان با باریکه های یون سنگین که شامل شتاب دهنده خطی اولیه و سینکروترون است ۶۸

فصل ۴

- شکل ۴-۱: نمایی از محل تقاطع زیر باریکه با هدف ۷۶
- شکل ۴-۲: نمایی از انتشار زیر باریکه ها ۷۷
- شکل ۴-۳: نمایی از الگوریتم کد شبیه سازی OK2 ۷۷

فصل ۵

- شکل ۵-۱: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای هدف کروی از جنس AL با ضخامت ۱ mm و باریکه سرب با انرژی ۸ GeV ۸۵
- شکل ۵-۲: تصویر مقطع عرضی دو بعدی از نهشت انرژی باریکه سرب در کره ای از جنس آلومینیوم در حین اجرای کد ۸۵
- شکل ۵-۳: تصویر پنجره مربوط به تعریف نوار رنگی انرژی در نرم افزار MATLAB ۸۶
- شکل ۵-۴: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای هدف کروی از جنس Al با ضخامت ۱ mm و باریکه اورانیوم با انرژی ۸ GeV ۸۷
- شکل ۵-۵: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای هدف کروی از جنس Pb با ضخامت ۱ mm و باریکه اورانیوم با انرژی ۸ GeV ۸۸
- شکل ۵-۶: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای هدف کروی از جنس Pb با ضخامت ۱ mm و باریکه سزیم با انرژی ۸ GeV ۸۹
- شکل ۵-۷: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای هدف کروی از جنس Al با ضخامت ۱ mm و باریکه سزیم با انرژی ۸ GeV ۹۰
- شکل ۵-۸: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای هدف استوانه ای از جنس آب که تحت تابش باریکه های کربن با انرژی ۱۵۰ MeV قرار گرفته است ۹۱
- شکل ۵-۹: تصویر سه بعدی استوانه ای از جنس آب که تحت تابش باریکه کربن قرار می گیرد ۹۲
- شکل ۵-۱۰: تصویر مقطع عرضی دو بعدی نهشت انرژی باریکه کربن بر روی هدف استوانه ای از جنس آب بعد از اجرای برنامه ترسیم سه بعدی داده ها ۹۲

- شکل ۵-۱۱: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 برای هدف حلزونی شکل از جنس آب که تحت تابش باریکه های کربن با انرژی ۱KeV قرار گرفته است..... ۹۳
- شکل ۵-۱۲: تصویر سه بعدی از نهشت انرژی باریکه کربن در هدف حلزونی شکل از جنس آب در حین اجرای کد..... ۹۴
- شکل ۵-۱۳: تصویر مقطع عرضی دو بعدی از نهشت انرژی باریکه کربن در هدف حلزونی شکل از جنس آب قبل از اتمام اجرای کد..... ۹۴
- شکل ۵-۱۴: تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای هدفی به شکل قارچ از جنس آب که تحت تابش باریکه های کربن با انرژی ۸۰MeV قرار گرفته است..... ۹۵
- شکل ۵-۱۵: تصویر سه بعدی از نهشت انرژی باریکه کربن در هدف قارچ از جنس آب در حین اجرای کد..... ۹۶

فهرست جداول

جدول ۱-۱: برخی از انواع واکنش های همجوشی مهم ۷

جدول ۱-۲: مقایسه پارامتر های مهم محصور سازی در ICF و MCF ۱۰

جدول ۲-۱: یون های با برد 100 mg/cm^2 ۴۷

جدول ۳-۱: برد یون های مختلف در هدف آب بر حسب cm در انرژی های منتخب ۷۲

جدول ۵-۱: قسمتی از فایل متنی خروجی از اجرای تست کد شبیه سازی OK2 ۸۳

بررسی میزان نهشت انرژی باریکه های یون سنگین با استفاده از کد شبیه سازی OK2

شیوا قاسمی نژاد

به علت رفتار نهشت انرژی مطلوب باریکه های یونی، این باریکه ها کاندیداهای مناسبی برای راه اندازی همجوشی هسته ای و پزشکی می باشند. به همین دلیل، در این کار تحقیقی نهشت انرژی باریکه های یون سنگین روی هدف های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. کد شبیه سازی OK2 امکان محاسبه نهشت انرژی سه بعدی باریکه های یونی را روی هدف هایی با شکل ها و ساختار های مختلف فراهم می کند. شبیه سازی ها شامل ۴ تست می باشد. اولین تست مربوط به شبیه سازی نهشت انرژی روی یک قرص کروی تک لایه ، دومین تست مربوط به یک هدف حلزونی شکل، سومین تست مربوط به یک استوانه و تست چهارم مربوط به یک ساختار پیچیده است که درون آن یک قطعه از جنس آلومینیوم وجود دارد. یون های پرتابی در این تست ها یون های متفاوتی بوده و جنس هدف هم از مواد مختلفی انتخاب شده است. جنس هدف در سه تست آخر آب می باشد که بسیار در طبیعت فراوان است و ساختار کاملا شناخته شده ای دارد. برای بررسی نتایج شبیه سازی از نرم افزار MATLAB2007 استفاده شده است. برای بررسی دقیق نتایج مربوط به کد باید به روشی بتوانیم این داده ها را تجزیه و تحلیل کنیم، به همین دلیل با نوشتن یک برنامه کامپیوتری، امکان ترسیم سه بعدی داده های مربوط به نهشت انرژی روی هدف ها که از اجرای کد OK2 حاصل شده، فراهم آمده است. شکل ها به طور واضح شکل سطح هدف را نشان می دهند و نقاطی را که تابش به آنها برخورد کرده را از نقاط دیگر جدا می کنند. همچنین به منظور مقایسه عملکرد یون های مختلف در هدف های گوناگون در کد OK2، شکل های نهشت انرژی باریکه های مختلف در هدف های جامد مختلف رسم شده است. این نتایج در بسیاری از شبیه سازی های علمی برای حل مسائل مهم نه فقط در همجوشی یون سنگین، بلکه در پزشکی هم کاربرد های زیادی دارد.

کلید واژه: نهشت انرژی، همجوشی هسته ای، باریکه های یون سنگین، کد OK2، ترسیم سه بعدی داده ها.

Abstract

Investigation of energy deposition value of heavy ion beams by OK2 code

Shiva Ghaseminejad

Due to a favorable energy deposition behavior of ions in matter it is expected that heavy ion beams would be one of preferable candidates in various fields including Heavy Ion Beam Inertial Fusion (HIF) and medical treatments. In this research, energy depositions of heavy ion beams by OK2 code have been studied. OK2 code provides computational capabilities of a three-dimensional ion beam energy deposition on a target with an arbitrary shape and structure. The simulations include 4 tests. The first one is an Al monolayer pellet, the second one illustrates the shell-type target surface illumination, the third one shows a cylindrical target illumination, and the fourth one is the energy deposition in a complicated target shape with an internal structure of Al. Projectile ions in these tests are Carbon and Lead ions and target material in last 3 tests is water which exists in nature more widely and is a well-known substance. We used MATLAB 2007 software and have written a program to 3D visualization of energy deposition on targets that resulted from testing the OK2 code. The figures clearly show region of maximum energy deposition and it is well seen that the concave areas and surface holes are not illuminated. Also the stopping powers profiles of various beams in solid materials and simulation of beam trajectories in multilayer targets have drawn with SRIM software to comparing with OK2 results. These results would be useful in a great number of scientific simulations for solving many important tasks not only for HIF but also in material sciences and medical treatments.

Key words: energy deposition, heavy ion beam fusion, OK2 code, 3D visualization.

پیشگفتار

توان توقف یون در ماده، یک پدیده طبیعی بسیار مهم است که اهمیت زیادی در کاربرد های علمی دارد. در پنجاه سال گذشته، توان توقف یون ها بسیار مورد توجه قرار گرفته و در مقالات مختلفی به این مطلب پرداخته شده است. استفاده از باریکه های یونی در همجوشی هسته ای وقتی شروع شد که دانشمندان فهمیدند می توان از یون های سبک با انرژی های MeV و یون های سنگین با انرژی های GeV برای احتراق سوخت همجوشی استفاده کرد. مزیت اصلی استفاده از باریکه های یون سنگین گستره انرژی مطلوب آن است که به یون های با انرژی جنبشی بالا اجازه می دهد در بیرونی ترین لایه هدف متوقف شوند. همچنین نهشت انرژی یون های سبک و سنگین، هر دو در ناحیه کلاسیکی است یعنی هیچ ذره فوق گرمی وجود ندارد تا باعث پدیده پیش گرمایش¹ شود و شامل ناپایداری های مجتمع یا تأثیرات غیر خطی نیز نمی باشد. دوم این که تکنولوژی شتاب دهنده های باریکه های یون سنگین² کاملاً پیشرفته و شناخته شده است و شتاب دهنده های مفیدی با بازده و آهنگ تکرار بالا قبلاً برای آزمایش های فیزیک انرژی بالا ساخته شده است. سوم این که هزینه لازم برای انرژی اولیه بسیار مناسب است. اما به علت جرم زیاد یون های سنگین در یک انرژی خاص، جریان کم است و شدت یون ها نیز کم می باشد. به همین دلیل باید باریکه ها را کانونی کنیم. از لحاظ فیزیکی انتخاب های زیادی در مورد نوع باریکه ها و نوع هدف ها داریم اما برای استفاده در یک راکتور خاص، محدودیت هایی مانند کسر مصرف³، انرژی خروجی، جرم و ضخامت لایه وجود دارد.

از طرف دیگر به دلیل خصوصیات مناسب نهشت انرژی یون های سنگینی مانند کربن، استفاده از آنها در پرتو پزشکی و به خصوص در درمان سرطان روز به روز به روز افزایش می یابد و تعداد مراکز درمانی که از باریکه های یون سنگین استفاده می کنند رو به افزایش است. باریکه های یونی هم مانند باریکه های پروتونی می توانند برای درمان طیف وسیعی از سرطان ها به کار روند و اثرات جانبی آنها نیز بسیار کم است. همچنین می توان از دز بالاتری از آنها استفاده کرد بدون این که باعث تخریب بافت سالم شود.

در استفاده از باریکه های یونی در همجوشی راه انداز یون سنگین و یا در پرتو پزشکی، لازم است که نهشت انرژی باریکه ها را تعیین کنیم و میزان بیشینه نهشت انرژی، محل دقیق برخورد باریکه ها در روی هدف، میزان دقیق عمق نفوذ باریکه ها در هدف و مکانیسم کامل نهشت انرژی باریکه ها در دما و چگالی های مختلف را به دقت محاسبه کنیم. به همین دلیل، در این کار تحقیقی، مکانیسم های اساسی نهشت انرژی باریکه ها و شبیه سازی دقیق نهشت انرژی باریکه ها در روی هدف های

¹ Pre-heating

² Heavy ion beam accelerator

³ Burn fraction

مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل اول راجع به اصول کلی همجوشی هسته ای، انواع مختلف واکنش های همجوشی، روش های گوناگون دستیابی به واکنش های مناسب، بهره انرژی و طراحی هدف ها برای همجوشی هسته ای صحبت شده است. فصل دوم راجع به فیزیک نهشت انرژی باریکه های یون سنگین می باشد و در آن به چگونگی نهشت انرژی باریکه های یون سنگین در ماده داغ چگال و انتخاب باریکه مناسب برای همجوشی پرداخته شده است. همچنین این فصل شامل فرمول های اساسی توان توقف در ماده سرد و بررسی چگونگی تغییرات آنها برای ماده داغ چگال که در همجوشی مورد استفاده قرار می گیرد، می باشد. فصل سوم راجع به استفاده از باریکه های یون سنگین در پرتو درمانی است و شامل معرفی معادلات مربوط به توان توقف و بررسی خصوصیات باریکه های یونی مناسب در پرتو درمانی می باشد. در فصل چهارم خصوصیات و روش محاسبات مورد استفاده در کد شبیه سازس OK2 که در این کار تحقیقی برای شبیه سازی نهشت انرژی باریکه های یون سنگین مورد استفاده قرار گرفته، معرفی شده است. فصل پنجم نیز مربوط به ارائه نتایج حاصل از اجرای کد OK2 و همچنین نتایج حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نرم افزار MATLAB برای باریکه های مختلف و هدف هایی با جنس و شکل های گوناگون می باشد.

فصل ۱

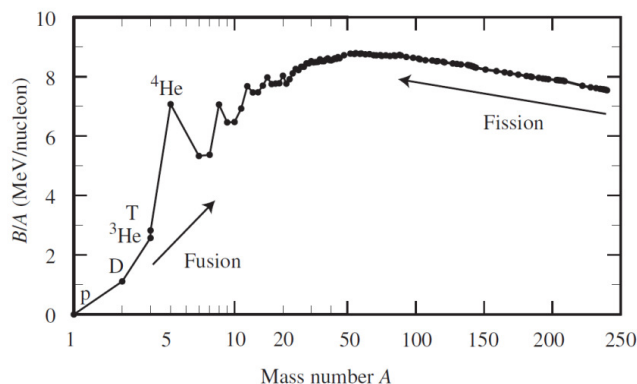
اصول کلی همجوشی هسته ای

در سال های اخیر تولید انرژی مانند آنچه که در خورشید اتفاق می افتد آرزوی بشر بوده است. می دانیم که منبع انرژی خورشید مانند دیگر ستارگان فرایندی است که همجوشی هسته ای^۱ نامیده می شود. امروزه بسیاری از کشور های جهان مطالعات همجوشی هسته ای را مورد حمایت مشترک قرار می دهند و آن را به عنوان منبع جدیدی برای تولید الکتریسیته تلقی می کنند. این گونه تحقیقات امروزه اهمیت روز افزونی پیدا کرده، زیرا بحران انرژی تبدیل به یکی از نگرانی های مهم دنیا شده است. یکی از راه حل های این مسئله می تواند همجوشی باشد، به خصوص که نسبت به سوخت های فسیلی و حتی نیروگاه های هسته ای^۲ می توان آن را بسیار ایمن تر و از نظر زیست محیطی بسیار تمیز تر دانست. با وجود اینکه تحقیقات زیادی راجع به همجوشی هسته ای صورت گرفته است، هنوز هیچ گونه راکتور همجوشی^۳ کاربردی ساخته نشده است. در گام اول باید بدانیم خورشید این انرژی را چگونه تولید می کند؟ [۱]

۱-۱ در خورشید چه اتفاقی می افتد؟

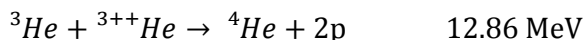
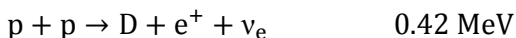
برای پاسخ به این سوال باید به فیزیک هسته ای مقدماتی برگردیم. کلید انجام واکنش همجوشی هسته ای و انرژی آزاد شده از آن، انرژی بستگی هسته است. شکل ۱-۱ انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون را بر حسب عدد جرمی نشان می دهد. این نمودار در ناحیه نزدیک هسته آهن بیشترین مقدار خود را دارد، که پایدار ترین هسته در طبیعت می باشد. برای هسته هایی بسیار سنگین تر یا سبک تر از آهن، انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون کوچکتر می شود. این پدیده اختلاف بین فرایند شکافت و همجوشی است. اصول همجوشی هسته ای این است که اگر دو هسته خیلی سبک با هم همجوشی کنند، هسته ای با انرژی بستگی بیشتر (یا جرم کمتر) ایجاد می کنند، بنابراین این اختلاف جرم باعث رها شدن انرژی خواهد شد. همچنین وقتی یک هسته سنگین به دو پاره سبک تر تقسیم می شود انرژی آزاد می شود که به این پدیده، شکافت^۴ می گویند [۲].

¹ Nuclear fusion
² Nuclear power plant
³ Fusion power plant
⁴ Fission



شکل ۱-۱: انرژی بستگی متوسط به ازای هر نوکلئون بر حسب عدد جرمی A [۳]

مسئله احتراق واکنش های همجوشی همیشه وجود دارد، زیرا هسته های سبک بار مثبت دارند و به شدت یکدیگر را دفع می کنند، تا اندازه ای که در شرایط عادی فاصله آنها آنقدر زیاد است که عملاً هیچ گونه همجوشی اتفاق نمی افتد. پس چگونه چنین انرژی قدرتمندی در خورشید آزاد می شود؟ به علت دمای بالا (10^4 K) و فشار بالا در مرکز خورشید، تعداد زیاد ذرات و گستره زمانی در دسترس نسبتاً زیاد، سطح مقطع^۱ انجام چنین واکنشی آنقدر زیاد است که انرژی عظیمی در خورشید تولید شود. در خورشید انرژی عموماً طبق چرخه واکنش های p-p بدست می آید. این واکنش ها و انرژی آزاد شده از آن ها به صورت زیرند [۱]:



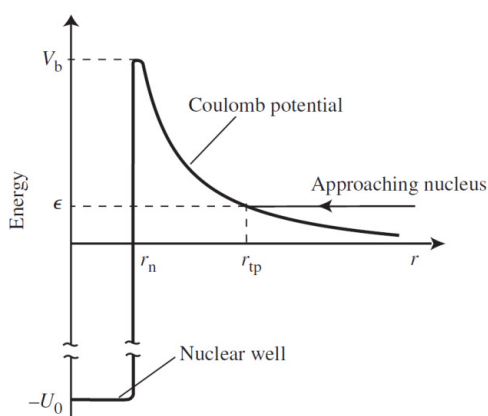
۱-۲ آیا می توان در روی زمین هم فرایند تولید انرژی مانند خورشید را انجام داد؟

در روی زمین، فضا و زمان کافی مانند خورشید برای تولید انرژی در دسترس نیست. برای انجام واکنش همجوشی باید هسته ها را کاملاً به هم نزدیک کنیم تا در محدوده جاذبه هسته ای^۲ (10^{-15} m) قرار گیرند. شکل ۱-۲ نمودار انرژی پتانسیل دو هسته را بر حسب تغییرات فاصله نشان می دهد. اما وقتی ذرات خیلی از هم دورند یکدیگر را دفع می کنند و دافعه الکترواستاتیکی آنها با کاهش فاصله افزایش می یابد. وقتی ذرات به حد کافی به هم نزدیک شدند، نیروی جاذبه هسته

¹ Cross section

² Nuclear attraction

ای بین آنها برقرار می شود و همجوشی هسته ای رخ می دهد. با دادن انرژی جنبشی بالا به ذرات، می توان آنها را وادار به همجوشی کرد، که این کار با دادن گرمای زیاد و بالا بردن دما امکان پذیر است. این فرایند را همجوشی گرما هسته ای^۱ می نامند. به دلیل گرما و چگالی بسیار زیاد لازم برای انجام واکنش همجوشی، سوخت باید در حالت پلازما باشد که گازی داغ با رسانندگی الکتریکی و یونش بالا است. اگر دما به حد کافی زیاد شود سرعت گرمایی هسته ها افزایش می یابد و ذرات به انرژی جنبشی لازم برای غلبه بر سد کولنی^۲ می رسند. تحت چنین شرایطی ذرات به سرعت به اطراف پرتاب می شوند مگر اینکه به روشی تحت فشار قرار گیرند. در خورشید، این کار با نیروی گرانشی انجام می گیرد اما در زمین چنین گرانشی نداریم، بنابراین باید به روشی این محصورسازی^۳ را انجام دهیم تا دما و فشار و چگالی را در مدت زمان کافی بالا نگه داریم [۱].



شکل ۱-۲: نمودار انرژی پتانسیل کولنی برای دو ذره باردار بر حسب تغییر فاصله [۲].

۳-۱ انواع واکنش های همجوشی

به نظر می رسد آسان ترین واکنش همجوشی قابل حصول مربوط به ایزوتوپ های هیدروژن یعنی دوتریم^۴ و تریتم^۵ باشد (معادله ۱-۱)، زیرا بیشترین سطح مقطع را دارد و کمترین انرژی آستانه^۶ را برای انجام واکنش گرما هسته ای دارا است. وقتی این دو هسته فرایند همجوشی هسته ای را انجام می دهند، هسته مرکبی شامل دو پروتون و سه نوترون ایجاد می شود. این هسته ها طبق واکنش زیر فوراً به یک نوترون و یک ذره α شکافته می شود (شکل ۱-۳):



¹ Thermonuclear fusion

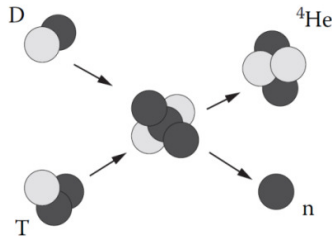
² Coulomb barrier

³ Confinement

⁴ Deuterium

⁵ Tritium

⁶ Threshold energy



شکل ۱-۳: واکنش همجوشی DT [۱]

دوتریم را می توان از آب دریا تهیه کرد و تریتم را نیز می توان مستقیماً درون یک راکتور شکافت هسته ای با واکنش لیتیوم و نوترون طبق واکنشی که در جدول ۱-۱ آمده است، تولید کرد. لیتیوم عنصر فراوانی است و منابع آن تا 10^4 سال کافی است. در استفاده از این واکنش به عنوان منبع سوخت همجوشی، دو مشکل وجود دارد: یکی اینکه تریتم یک گاز رادیو اکتیو است و دیگر اینکه لیتیوم یک ماده سمی است. این یعنی برای داشتن راکتوری کاملاً تمیز هنوز باید طراحی جدیدی را ارائه کنیم. مثلاً می توانیم از دیگر واکنش های موجود در جدول ۱-۱ استفاده کنیم که در آنها تریتم و لیتیوم وجود ندارد. البته این مسئله، هنوز در مقایسه با راکتورهای شکافت بسیار کمتر است زیرا نیمه عمر تریتم ۱۲/۵ سال است اما نیمه عمر پاره های شکافت هسته هایی مانند ^{236}U ، ^{238}Pu و ^{240}Pu بسیار زیاد تر می باشد [۱]. در واکنش DT، اگر فرض کنیم مقدار دوتریم و تریتم برابر باشد (۵۰٪-۵۰٪)، آهنگ انجام فرایند همجوشی W در پلاسمای چگال و داغ را با رابطه زیر نشان می دهند:

$$W = \frac{n^2}{4} \langle V\sigma \rangle \quad (3-1)$$

جدول ۱-۱: برخی از انواع واکنش های همجوشی مهم

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