

## فصل اول :

مفاهیم اساسی همجوشی محصور شدگی لختی

بررسی پارامترهای نهشت انرژی و غیریکنواختی تشعشع باریکه های یون سنگین در همجوشی محصور شدگی لختی با استفاده از کد شبیه سازی OK1  
لیلا غلامزاده

باریکه های یون سنگین، عملکرد نهشت انرژی قابل توجهی در ماده دارند و می توانند با اتلاف انرژی نسبتاً کمی به درون ماده نفوذ کنند. انتظار می رود که این باریکه ها یکی از گزینه های مناسب برای همجوشی یون سنگین باشند. در همجوشی یون سنگین، غیریکنواختی پرتودهی باید کمتر از چند درصد باشد تا سوخت به طور کامل متراکم شود و انرژی همجوشی را به طور موثر آزاد کند. باریکه های یون سنگین به سطح هدف برخورد می کنند و انرژی شان را در یک لایه نسبتاً عمیق و ناحیه پهن به نهشت می گذارند. بنابراین غیریکنواختی پرتودهی باریکه های یون سنگین باید در حجم ناحیه نهشت و در لایه جذب کننده تخمین زده شود. برای انجام این کار از کد شبیه سازی OK1 استفاده شده و بعضی اصلاحات روی آن انجام گرفته است. در این کد، نهشت انرژی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه های یون سنگین در هدف های متفاوت با استفاده از طرح های پرتودهی متفاوت 12، 20، 32، 60 و 120 باریکه محاسبه شده است. همچنین با استفاده از این کد، ترسیم سه بعدی نهشت انرژی روی هدف های کروی شبیه سازی شده است. محاسبه این مقادیر برای بهینه سازی پارامترهای باریکه و ساختار هدف به منظور طراحی آزمایش های بیشتر همجوشی یون سنگین ارزشمند خواهد بود.

نتایج شبیه سازی نشان می دهند که نهشت انرژی باریکه های اورانیوم دارای غیر یکنواختی پرتودهی کمتری نسبت به باریکه های سرب بوده، همچنین با افزایش تعداد باریکه ها، مقدار غیر یکنواختی ها کاهش می یابد. افزایش دمای اولیه هدف تاثیری روی غیر یکنواختی پرتودهی باریکه ها ندارد، اما افزایش شعاع اتاقک راکتور باعث کاهش گسیلندگی باریکه و افزایش غیر یکنواختی پرتودهی باریکه ها می شود. بنابراین، می توان محدوده شعاع اتاقک راکتور را بین 2-5m در نظر گرفت، در غیر این صورت، غیر یکنواختی ها افزایش می یابد.

کلیدواژه: همجوشی یون سنگین، هدف کروی، نهشت انرژی، غیر یکنواختی تشعشع باریکه، سیستم پرتودهی، کد شبیه سازی

OK1

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده فارسی .....	۳
چکیده انگلیسی .....	۳
مقدمه .....	۱
<b>فصل اول: مفاهیم اساسی همجوشی محصور شدگی لختی</b>	
1-1- همجوشی هسته ای .....	۵
2-1- پارامترسازی سطح مقطع واکنش .....	۷
1-2-1- آهنگ واکنش و سطح مقطع واکنش پذیری .....	۱۰
3-1- همجوشی گرما هسته ای .....	۱۶
4-1- معیار های واکنش همجوشی گرما هسته ای .....	۱۷
1-4-1- معیار لاوسون .....	۱۷
2-4-1- معیار $\rho R$ .....	۱۹
5-1- بهره مورد نیاز برای راکتور IFE .....	۲۱
6-1- پلاسما .....	۲۳
7-1- محصورسازی پلاسما .....	۲۷
1-7-1- همجوشی محصورشدگی مغناطیسی MCF .....	۲۸
2-7-1- همجوشی محصور شدگی لختی ICF .....	۳۲
8-1- مراحل اصلی در همجوشی محصور شدگی لختی .....	۳۶
1-8-1- فاز برهمکنش .....	۳۷
2-8-1- فاز فشردگی .....	۳۸
3-8-1- فاز کاهش شتاب یا شتاب معکوس .....	۳۹
4-8-1- فاز احتراق و سوختن .....	۳۹
9-1- ناپایداری هیدرودینامیکی در انفجار داخلی .....	۳۹
10-1- طرحهای مناسب برای همجوشی محصور شدگی لختی .....	۴۴
1-10-1- اصول فیزیکی طرح راه انداز مستقیم .....	۴۴
2-10-1- اصول فیزیکی راه انداز غیر مستقیم .....	۴۶
3-10-1- مزایا و مشکلات ایده راه انداز مستقیم .....	۴۷
4-10-1- مزایا و مشکلات ایده راه انداز غیرمستقیم .....	۴۸

## فصل دوم: اصول فیزیکی همجوئی یون سنگین

- 50 ..... 1-2-1- مقدمه
- 51 ..... 1-1-2- پیشرفت راه انداز مورد نیاز برای همجوئی محصور شدگی لختی
- 52 ..... 2-1-2- مقایسه باریکه های یون سبک و یون سنگین به عنوان راه انداز
- 54 ..... 2-2- راه اندازهای یون سنگین
- 55 ..... 3-2- انواع شتاب دهنده های یون سنگین
- 56 ..... 1-1-3-2- شتاب دهنده های فرکانس رادیویی
- 57 ..... 2-1-3-2- مزایا و معایب شتاب دهنده های فرکانس رادیویی
- 58 ..... 2-3-2- شتاب دهنده های القایی
- 60 ..... 3-3-2- شتاب دهنده های سینکروترون
- 61 ..... 1-1-4-2- نیازمندیهای منابع یونی HIF
- 63 ..... 2-1-4-2- استخراج باریکه و انتقال آن
- 64 ..... 3-1-4-2- قوانین تناسب برای استخراج باریکه و انتقال آن
- 64 ..... 4-1-4-2- مقیاس شکست ولتاژ زیاد
- 64 ..... 5-1-4-2- دایود استخراج باریکه
- 65 ..... 5-2- اجزا اصلی شتاب دهنده های یون سنگین
- 66 ..... 1-5-2- منابع یونی مورد استفاده در HIF
- 68 ..... 2-5-2- شتاب دهنده های بتا کم "Beta low"
- 68 ..... 3-5-2- شتاب دهنده های اصلی
- 68 ..... 4-5-2- حلقه های انبارشی
- 70 ..... 5-5-2- متراکم کننده های خطی
- 70 ..... 6-5-2- خطوط انتقال باریکه
- 70 ..... 7-5-2- سیستم کانونی کننده نهایی
- 71 ..... 6-2- محدودیتهای فیزیک باریکه
- 71 ..... 1-6-2- مکانیسم های اتلافی باریکه
- 71 ..... 2-6-2- محدودیتهای کانونی کردن باریکه
- 72 ..... 3-6-2- محدودیتهای فضای بار
- 72 ..... 7-2- انتقال نهایی باریکه در اتاقک واکنش
- 73 ..... 8-2- طراحی هدف در همجوئی محصور شدگی لختی
- 77 ..... 1-8-2- محدودیت های مهم در طراحی هدف
- 77 ..... 1-1-8-2- ناپایداری ریلی - تیلور
- 77 ..... 2-1-8-2- پیش گرمایش سوخت
- 78 ..... 3-1-8-2- ساخت هدف

- 78.....2-8-2- یک طراحی هدف خاص برای باریکه یونی با بهره زیاد.....
- 80.....3-8-2- ساختار هدف های کروی در راه اندازی مستقیم توسط یون سنگین.....
- 81.....4-8-2- فرآیند انتقال انرژی در هدف های ICF.....

### فصل سوم: تئوری توان توقف یون های سنگین

- 84.....1-3- سیر تاریخی محاسبه توان توقف.....
- 85.....2-3- نهشت انرژی باریکه های یونی.....
- 87.....3-3- نیازهای برد یون.....
- 89.....4-3- تئوری اتلاف انرژی باریکه یونی در پلاسما.....
- 89.....1-4-3- متوقف کردن یون های سریع با برخورد های دوتایی.....
- 91.....2-4-3- توان توقف یون در ماده سرد.....
- 95.....3-4-3- اثر دما بر روی توان توقف.....
- 97.....4-4-3- بار موثر  $Z_{eff}$  یون های سنگین.....
- 100.....5-4-3- وابستگی دمای یونش هدف  $Z_p(T)$ .....
- 102.....1-5-3- برد یون ها در ماده سرد.....
- 103.....2-5-3- برد یون ها در ماده داغ.....
- 103.....3-5-3- مثال هایی از توان توقف و برد در پلاسمای چگال.....
- 104.....6-3- اثرات مهم دیگر در برهمکنش باریکه و هدف.....
- 105.....1-6-3- اثرات تجمعی پلاسما.....
- 105.....2-6-3- حفر سوراخ هیدرودینامیکی.....
- 106.....3-6-3- اشعه ایکس و پیش گرمایش هسته ای.....

### فصل چهارم: بررسی کد شبیه سازی OK1 و کاربردهای آن

- 108.....1-4- کد شبیه سازی OK1.....
- 109.....1-2-4- روش محاسبه نهشت انرژی.....
- 110.....2-2-4- تخمین غیر یکنواختی باریکه روی هدف کروی.....
- 111.....3-4- طرح روشنایی باریکه.....
- 112.....4-4- گسیلندگی و واگرایی باریکه.....
- 114.....5-4- مدار ذره ای باریکه در هدف.....
- 115.....6-4- توزیع چگالی ذرات باریکه.....
- 116.....7-4- سیستم مختصات های استفاده شده در کد OK1.....
- 117.....8-4- پارامترهای قابل تغییر در کد OK1.....

## فصل پنجم: نتایج شبیه سازی کد OK1

121	1-5- نتایج شبیه سازی.....
121	1-1-5- آزمون 1 کد OK1 : ترسیم سه بعدی نهشت انرژی باریکه های مختلف.....
125	2-1-5- آزمون 2 کد OK1 : محاسبه غیریکنواختی پرتودهی باریکه های یون سنگین و نهشت انرژی آنها.....
126	1-2-5- اثر تغییر نوع باریکه در هدف های مختلف.....
129	2-2-5- ترسیم نمودارهای حاصل از تغییر نوع باریکه.....
	3-2-5- ترسیم نمودارهای نهشت انرژی باریکه های یونی و غیریکنواختی پرتودهی آنها روی هدف دو لایه
131	سرب - آلومینیوم (Pb-Al).....
134	4-2-5- اثر افزایش تعداد باریکه روی مقدار $\sigma_{RMS}$ .....
136	5-2-5- بررسی اثر تغییر دمای باریکه بر روی مقدار $\sigma_{RMS}$ .....
138	6-2-5- بررسی اثر تغییر دمای هدف و گسیلندگی باریکه روی مقدار $\sigma_{RMS}$ .....
139	3-5- بررسی میزان نهشت انرژی و غیریکنواختی پرتودهی باریکه های اورانیومی با دمای باریکه 100MeV.....
142	4-5- استفاده از یک ساختار هدف جدید.....
149	5-5- بررسی میزان نهشت انرژی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه های سزیمی.....
151	6-5- نتیجه گیری کلی.....
152	7-5- پیشنهاد برای ادامه کار.....
154	مراجع.....
156	فهرست مقاله های چاپ شده.....
156	فهرست مقاله های پذیرفته شده در کنفرانس های داخلی وخارجی.....

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
13	جدول (1-1): چند واکنش همجوشی مهم .....
15	جدول (1-2): سطح مقطع های همجوشی در انرژی مرکز جرم 10keV و 100 keV و $\sigma_{\max}$ و $\epsilon_{\max}$ .....
21	جدول (1-3): گزینه های مطرح سوخت همجوشی محصورشدگی لختی .....
32	جدول (1-4): تسهیلات تحقیقاتی بزرگ MCF .....
63	جدول (1-2): مشخصات منبع یونی راه انداز HIF و تغذیه کننده .....
80	جدول (2-2): انرژی یون مطابق با یک برد $100\text{mg}/\text{cm}^2$ .....
89	جدول (1-3): یون های با برد $100\text{ mg}/\text{cm}^2$ .....
93	جدول (2-3): ضرایب تصحیحات لایه برای هدف ها .....
123	جدول (1-5): بخشی از فایل View3D().dat .....
126	جدول (2-5): مقادیر $\sigma_{\text{PTV}}$ و $\sigma_{\text{RMS}}$ برحسب تعداد باریکه ها برای یک ساختار هدف تک لایه با استفاده از باریکه فرودی سرب .....
127	جدول (3-5): مقادیر $\sigma_{\text{PTV}}$ و $\sigma_{\text{RMS}}$ برحسب تعداد باریکه ها برای یک ساختار هدف تک لایه با استفاده از باریکه فرودی اورانیوم .....
128	جدول (4-5): مقادیر $\sigma_{\text{PTV}}$ و $\sigma_{\text{RMS}}$ برحسب تعداد باریکه ها برای یک ساختارهدف دو لایه ای با استفاده از باریکه فرودی سرب .....
128	جدول (5-5): مقادیر $\sigma_{\text{PTV}}$ و $\sigma_{\text{RMS}}$ برحسب تعداد باریکه ها برای یک ساختار هدف دولایه ای با استفاده از باریکه فرودی اورانیوم .....

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
6	شکل (1-1): نمودار انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون بر حسب عددجرمی
8	شکل (2-1): انرژی پتانسیل بر حسب فاصله بین دو هسته باردار واکنش کننده با انرژی مرکز جرم E
12	شکل (3-1): نمودار سطح مقطع براساس دمای برای چند واکنش همجوشی کنترل شده
14	شکل (4-1): سطح مقطع های همجوشی بر حسب انرژی مرکز جرم برای واکنش های همجوشی مطرح
23	شکل (5-1): تعادل انرژی یک راکتور ICF
24	شکل (6-1): انواع متفاوتی از پلازما بصورت تابعی از دما و چگالی
25	شکل (7-1): اثر حفاظ دمای
26	شکل (8-1): توزیع پتانسیل یک ذره باردار درخلا و در پلازما
28	شکل (9-1): فشار بر حسب زمان محصور سازی برای دوطرح ICF و MCF
29	شکل (10-1): حرکت مارپیچی الکترونها و یونها در امتداد خطوط میدان مغناطیسی
31	شکل (11-1): طرحی از ساختار مغناطیسی یک توکامک
34	شکل (12-1): مقایسه دما و چگالی در ناحیه مرکزی کپسول قبل از احتراق (a) در ایده احتراق حجمی و (b) در ایده احتراق لکه داغ
35	شکل (13-1): سه فاز در ایده احتراق سریع (i) فشردگی، (ii) ایجاد حفره، (iii) احتراق
36	شکل (14-1): تصویر طرح وار از چگالی و دما بر حسب شعاع در (a) ایده لکه داغ، (b) ایده احتراق سریع
36	شکل (15-1): مراحل همجوشی محصور شدگی لختی (a) گرمایش هدف با نور لیزر (b) فاز فشردگی (c) هسته به دما و چگالی احتراق می رسد (d) فاز سوختن و احتراق
38	شکل (16-1): تشکیل چگالی بحرانی ناشی از برخورد نور لیزر به یک هدف
41	شکل (17-1): طرحی از ناپایداری رایلی - تیلور که در دو مرحله از انفجار داخلی اتفاق می افتد
41	شکل (18-1): سطح مشترک ناپایداری رایلی - تیلور شماره هایی با چگالی های متفاوت (a) یک شماره سنگین تر روی یک شماره سبک تر قرار دارد. (b) شماره سبک تر به لایه ای از شماره چگال تر شتاب می دهد
43	شکل (19-1): طرحی از ناپایداری ریخت مایر - مشکوف
43	شکل (20-1): طرحی از ناپایداری کلونین - هلمهولتز
45	شکل (21-1): طرح یک راه انداز مستقیم
46	شکل (22-1): طرح شماتیک هوهرام برای الف - باریکه لیزر و ب - باریکه یون سنگین
57	شکل (1-2): طرز کار یک شتاب دهنده فرکانس رادیویی
58	شکل (2-2): یک شتاب دهنده فرکانس رادیویی با حلقه های انبارشی
58	شکل (3-2): طرز کار یک شتاب دهنده القایی
59	شکل (4-2): طرح خطی شتاب دهنده القایی
59	شکل (5-2): طرح دایره ای شتاب دهنده القایی



- شکل (2-6) : طرحی از یک راه انداز یون سنگین برای همجوشی محصور شدگی لختی ..... 60
- شکل (2-7) : طرحی از شتاب دهنده سینکروترون ..... 61
- شکل (2-8) یک هدف راه اندازی شده با باریکه یونی بهره بالا ..... 79
- شکل (2-9) قطاعی از طرح هدف های کروی ..... 81
- شکل (3-1) : طرحی از همجوشی یون سنگین ..... 85
- شکل (3-2) : نهشت انرژی یک باریکه یونی ..... 86
- شکل (3-3) : نسبت های برد و انرژی درون ماده ..... 87
- شکل (3-4) : مقایسه برد یون ها در ماده سرد بر حسب تابعی از جرم و انرژی ..... 88
- شکل (3-5) : توان توقف برای یون پرتابی سرب (Pb) در یک هدف آلومینیومی (Al) ..... 97
- شکل (3-6) : انرژی یون بر حسب فاصله توقف در سرب ..... 100
- شکل (3-7) : یونش آلومینیوم بر حسب دما و چگالی تعداد ذرات ..... 101
- شکل (3-8) : وابستگی دمایی یونش آلومینیوم که در آن خط منحنی نشان دهنده مدل TF و نقاط نتیجه درون یابی هستند ..... 101
- شکل (3-9) : برد یون های پرتابی مختلف در آلومینیوم Al و طلا Au جامد به عنوان تابعی از انرژی پرتابه ..... 102
- شکل (3-10) : توان های توقف محاسبه شده در امتداد مسیر توقف الف) پروتونهای 2MeV در طلا با چگالی و دماهای 0-500eV ب) یونهای Bi, 30MeV/u در لیتیم برای ترکیبهای مختلف دما و چگالی ..... 104
- شکل (4-1) : تقسیم یک باریکه به تعدادی زیرشاخه ..... 109
- شکل (4-2) : نهشت انرژی در ساختار هر مش نشان داده شده است ..... 110
- شکل (4-3) : سیستم پرتودهی 12 باریکه ای ..... 111
- شکل (4-4) : سیستم پرتودهی 32 باریکه ای ..... 112
- شکل (4-5) : پرتودهی یک باریکه بر روی یک ساچمه با یک زاویه واگرایی ..... 114
- شکل (4-6) : نقطه کانونی باریکه و هدف ..... 115
- شکل (4-7) : طرح های سطح مقطع برای یک پرتودهی توزیع KV (a) و یک باریکه گوسی (b) روی یک ساچمه تک لایه آلومینیومی (Al) ..... 116
- شکل (4-8) : طرح مختصات زیر باریکه ها ..... 116
- شکل (4-9) توزیع انرژی باریکه های یون سنگین بر حسب انرژی ..... 118
- شکل (4-10) : هدف های مورد استفاده در کد OK1 ..... 119
- شکل (5-1) : تصویر سه بعدی نهشت انرژی تک باریکه سرب (Pb) با انرژی 8GeV بر روی هدف کروی آلومینیومی ..... 124
- شکل (5-2) : تصویر سه بعدی نهشت انرژی تک باریکه اورانیوم (U) با انرژی 8GeV بر روی هدف کروی آلومینیومی ..... 124
- شکل (5-3) : تصویر سه بعدی نهشت انرژی تک باریکه سزیم (Cs) با انرژی 8GeV بر روی هدف کروی آلومینیومی ..... 125
- شکل (5-4) : ساختار هدف به صورت تک لایه آلومینیومی ..... 126

- شکل (5-5): ساختار هدف دو لایه Pb-Al ..... 127
- شکل (6-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و انرژی نهشت یافته باریکه های سرب بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 12 باریکه در یک هدف تک لایه آلومینیومی (Al) ..... 127
- شکل (7-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و انرژی نهشت یافته باریکه های سرب بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 120 باریکه در یک هدف تک لایه آلومینیومی (Al) ..... 127
- شکل (8-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و نهشت انرژی باریکه های اورانیومی (U) بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 12 باریکه در یک هدف تک لایه آلومینیومی (Al) ..... 130
- شکل (9-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و انرژی نهشت یافته باریکه های اورانیومی (U) بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 120 باریکه در یک هدف تک لایه آلومینیومی (Al) ..... 130
- شکل (10-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و انرژی نهشت یافته باریکه های سرب بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 12 باریکه در یک هدف دو لایه سرب و آلومینیوم (Pb-Al) ..... 132
- شکل (11-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و انرژی نهشت یافته باریکه های سرب بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 120 باریکه در یک هدف دو لایه سرب و آلومینیوم (Pb-Al) ..... 132
- شکل (12-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و نهشت انرژی باریکه های اورانیومی (U) بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 12 باریکه در یک هدف دو لایه سرب و آلومینیوم (Pb-Al) ..... 133
- شکل (13-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و نهشت انرژی باریکه های اورانیومی (U) بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 120 باریکه در یک هدف دو لایه سرب و آلومینیوم (Pb-Al) ..... 133
- شکل (14-5): نمودار نهشت انرژی بر حسب شعاع ساچمه برای دو نوع هدف 1. تک لایه آلومینیومی 2. دو لایه سرب - آلومینیومی ..... 134
- شکل (15-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMS}$  بر اساس تعداد کل باریکه یون سنگین در یک ساختار هدف تک لایه Al ..... 134
- شکل (16-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMS}$  بر اساس تعداد کل باریکه یون سنگین در یک ساختار هدف دو لایه سرب و آلومینیوم (Pb-Al) ..... 135
- شکل (17-5): نمودار تغییرات نهشت انرژی باریکه های سرب و اورانیوم بر حسب شعاع ساچمه سوخت برای سیستم 12 باریکه ای در هدف دو لایه سرب و آلومینیوم (Pb-Al) ..... 135
- شکل (18-5): تغییرات  $\sigma_{RMSi}$  بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 12 باریکه ای با استفاده از یون های سرب و اورانیوم در هدف دو لایه سرب و آلومینیوم (Pb-Al) ..... 136
- شکل (19-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و انرژی نهشت یافته باریکه های سرب بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 12 - باریکه برای دمای باریکه 100MeV ..... 137
- شکل (20-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و انرژی نهشت یافته باریکه های سرب بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 120 - باریکه برای دمای باریکه 100MeV ..... 138
- شکل (21-5): نمودار  $\sigma_{RMSi}$  بر حسب تغییر دمای اولیه هدف برای باریکه اورانیومی ..... 138
- شکل (22-5): نمودار تغییر گسیلندگی و غیر یکنواختی پرتو دهی باریکه ها با شعاع اتاقک راکتور برای یک هدف تک لایه Al ..... 139
- شکل (23-5): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و میزان نهشت انرژی باریکه های اورانیوم بر حسب شعاع ساچمه ..... 140

- شکل (5-24): نمودار تغییر  $\sigma_{RMS}$  بر حسب تعداد کل باریکه ها..... 140
- شکل (5-25): تغییرات  $\sigma_{RMSi}$  بر حسب شعاع ساچمه سوخت با استفاده از سیستم های پرتودهی متفاوت..... 141
- شکل (5-26): نمودار غیریکنواختی پرتودهی باریکه یون سنگین اورانیوم بر حسب تغییر دمای هدف..... 141
- شکل (5-27): تغییر گسیلندگی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه ها با شعاع اتاقک راکتور برای یک هدف تک لایه Al..... 142
- شکل (5-28): یک ساختار هدف تک لایه کربنی، ضخامت لایه 1 mm با چگالی  $3/515 \text{ g/cm}^3$ ..... 143
- شکل (5-29): ساختار هدف دو لایه سرب و کربن. ضخامت لایه سرب 0/03mm و چگالی  $11/3 \text{ g/cm}^3$  و برای کربن، ضخامت 0/97 mm و چگالی  $3/515 \text{ g/cm}^3$  می باشد..... 143
- شکل (5-30): نمودار نهشت انرژی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه های یون سنگین سرب در هدف تک لایه کربنی با استفاده از سیستم 12 باریکه ای..... 144
- شکل (5-31): نمودار نهشت انرژی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه یون سنگین سرب در هدف دو لایه سرب و کربن با استفاده از سیستم 12 باریکه ای..... 144
- شکل (5-32): نمودار نهشت انرژی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه های یون سنگین سرب در هدف تک لایه کربنی با استفاده از سیستم 120 باریکه ای..... 145
- شکل (5-33): نمودار نهشت انرژی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه یون سنگین سرب در هدف دو لایه سرب و کربن با استفاده از سیستم 120 باریکه ای..... 145
- شکل (5-34): میزان انرژی نهشت یافته باریکه های سرب در دو ساختار تک لایه متفاوت..... 146
- شکل (5-35): میزان انرژی نهشت یافته باریکه های سرب در دو ساختار هدف. 1. تک لایه کربنی 2. دو لایه سرب - کربنی..... 147
- شکل (5-36): تغییرات  $\sigma_{RMS}$  بر حسب تعداد کل باریکه های یون سنگین سرب در دو ساختار تک لایه متفاوت..... 147
- شکل (5-37): نمودار تغییرات گسیلندگی و غیر یکنواختی پرتودهی باریکه های سرب بر حسب شعاع اتاقک راکتور برای یک هدف دو لایه سرب - کربنی در سیستم پرتودهی 32 باریکه..... 148
- شکل (5-38): مقایسه مقادیر  $\sigma_{RMS}$  بر حسب شعاع اتاقک راکتور برای دو طرح پرتودهی 32 و 60 باریکه..... 148
- شکل (5-39): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و نهشت انرژی باریکه های سزیمی (Cs) بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 12- باریکه..... 149
- شکل (5-40): نمودار مقادیر  $\sigma_{RMSi}$  و  $\sigma_{PTVi}$  و نهشت انرژی باریکه های سزیمی (Cs) بر حسب شعاع ساچمه برای سیستم 120- باریکه..... 150
- شکل (5-41): نمودار تغییرات  $\sigma_{RMS}$  بر حسب تعداد کل باریکه های یون سنگین سزیمی..... 150

یکی از راه های تامین انرژی بشر، همجوشی هسته ای است. در فرآیند همجوشی هسته ای، دو هسته سبک هیدروژن به هم جوش می خورند و انرژی آزاد می شود. همجوشی هسته ای به دو نوع داغ و سرد تقسیم بندی می شود. در همجوشی داغ لازم است که سوخت تا دمای  $10^8$  K گرم شود و به دو نوع همجوشی محصور شدگی لختی و همجوشی محصور شدگی مغناطیسی دسته بندی می شود. در همجوشی سرد فرآیند همجوشی در دمای اتاق اتفاق می افتد که به همجوشی کاتالیزور میونی معروف است. مفاهیم اساسی همجوشی محصور شدگی لختی در فصل اول بیان خواهند شد.

همجوشی محصور شدگی لختی با استفاده از باریکه های لیزری یا یونی راه اندازی می شود. باریکه های یونی به این دلیل که از تسهیلات شتاب دهنده استفاده می کنند، دارای مزایای بیشتری نسبت به باریکه های لیزری هستند. ویژگی برجسته همجوشی یون سنگین، جفت شدگی مستقیم انرژی باریکه با ساچمه سوخت و امکان گرمایش زیاد در حجم وسیعی از لایه قطع کننده است. همجوشی یون سنگین و همچنین برتری های آن نسبت به همجوشی راه اندازی شده با لیزرها، در فصل دوم به طور مفصل بحث می شوند.

یکی از موضوع های مهم در همجوشی یون سنگین، برهم کنش باریکه های یون سنگین با هدف است. در این ایده، پردازش مواد و نهشت دقیق انرژی باریکه یونی اهمیت فوق العاده ای دارد. در فصل سوم درمورد نظریه توان توقف یون های سنگین در هدف های همجوشی بحث می شود.

یکی از نکات کلیدی برای احتراق موفق در طرح راه اندازی شده مستقیم همجوشی یون سنگین، بحث نهشت انرژی همسانگرد و متقارن در لایه هل دهنده ساچمه است. به عبارت دیگر غیریکنواختی پرتودهی باریکه های یون سنگین باید کمینه باشد تا از ایجاد ناپایداری ها در هدف همجوشی جلوگیری کند. در همجوشی یون سنگین، غیریکنواختی پرتودهی باید کمتر از چند درصد باشد تا سوخت به طور کامل متراکم شود و انرژی همجوشی را به طور موثر آزاد کند. کدهای OK1 و OK2 برای شبیه سازی نهشت انرژی باریکه های یونی در هدف های کروی (OK1) و در هدف هایی با شکل دلخواه (OK2) گسترش داده شده اند. در این رساله، برای تخمین غیریکنواختی پرتودهی باریکه های یون سنگین و نهشت انرژی آنها از کد شبیه سازی OK1 استفاده کرده ایم که بر مبنای توان توقف یون ها در ماده پایه گذاری شده است. ویژگی های کد OK1 و فرآیند محاسبه نهشت انرژی و غیریکنواختی پرتودهی باریکه های یونی در فصل چهارم ارائه شده است.

در فصل پنجم نتایج حاصل از اجرای کد شبیه سازی OK1 برای باریکه های یونی و هدف های متفاوت ارائه شده است. هم چنین اثر عوامل گوناگونی مانند تغییر دمای هدف، تغییر تعداد باریکه ها، تغییر گسیلندگی و غیره را بر روی غیریکنواختی پرتودهی و نهشت انرژی بررسی کرده ایم. برای نهشت انرژی بیشینه، سعی شده است که مقدار غیریکنواختی نهشت انرژی باریکه های یونی کمتر از چند درصد باشد تا از وقوع ناپایدارهای هیدرودینامیکی جلوگیری کنیم. هدف تمام این شبیه سازی ها رسیدن به طراحی بهینه برای آزمایش های همجوشی یون سنگین است.

یکی از مسائلی که فکر بشر را در طی سالیان متمادی به خود مشغول کرده و برای حل آن در تکاپو بوده است، چگونگی تامین انرژی مورد نیاز خود است. در گذشته زغال سنگ به عنوان سوخت مورد استفاده قرار می گرفت و بعدها، نفت به دلیل آلاینده‌گی کمتر و مناسب تر بودن جانشین آن شد. از این رو با توجه به پیشرفت فناوری جامعه بشری و نیاز روز افزون به انرژی، پژوهش های زیادی در این راستا صورت گرفت.

امروزه، بخش وسیعی از انرژی با استفاده از نیروگاههای آبی، فسیلی و هسته ای تامین می شود. نظر به اینکه استفاده از انرژی آبهای جاری فقط در نواحی خاصی از جهان در دسترس بوده و ذخایر سوخت های فسیلی نیز رو به پایان است، بنابراین نیروگاههای هسته ای برای تامین انرژی بسیار مناسب هستند. در حال حاضر، تقریباً کل انرژی هسته ای جهان توسط نیروگاههای شکافت هسته ای<sup>1</sup> تولید می شود. ضمن اینکه پژوهش های زیادی نیز برای ساخت نیروگاههای همجوشی هسته ای صورت گرفته و این پژوهش ها به طور جدی ادامه دارد.

در طی قرنها، تولید انرژی در خورشید و ستارگان به صورت یک راز باقی مانده بود. دانشمندان در قرن بیستم، فرایند همجوشی و چگونگی تولید انرژی در ستارگان را کشف کردند. نظریه انیشتین، مبنی بر تبدیل جرم به انرژی، اساس مفهوم همجوشی است. ماده و انرژی، مولفه های بنیادین دنیای فیزیکی ما هستند. این مولفه ها، در شرایط فیزیکی مختلف، به هم تبدیل می شوند و نوعی از آنها که همجوشی هسته ای سبک است، اساس رها شدن انرژی در ستارگان است.

در این فصل روش دستیابی به انرژی هسته ای را از طریق فرایند همجوشی هسته ای مطرح می کنیم و مقدمات فیزیکی آن را مورد بررسی قرار می دهیم.

---

<sup>1</sup>Nuclear Fission Plants

## 1-1- همجوشی هسته ای<sup>1</sup>

در فیزیک هسته ای، شیمی هسته ای و اخترفیزیک، همجوشی هسته ای فرایندی است که در آن دو یا چند هسته با هم ترکیب می شوند و هسته سنگین تری را تشکیل می دهند. این فرایند معمولاً با رهاسازی یا جذب مقادیری از انرژی همراه می شود. فرایندهای همجوشی گرما هسته ای<sup>2</sup> در مقیاس بزرگ، شامل هسته های سبکی است که تحت شرایط دما و چگالی بالا می توانند با یکدیگر ترکیب شوند [2-1].

همجوشی دو هسته سبک، یک هسته برانگیخته مرکب را تشکیل می دهد که به محصولات واکنش، واپاشی می کند. با توجه به تبدیل جرم به انرژی جنبشی، این واکنش به طور طرح وار در رابطه (1-1) مشخص شده است [3]:



که در این واکنش تفاوت جرم دو طرف برابر است با [3]:

$$\Delta m = (m_a + m_b) - (m_c + m_d) \neq 0 \quad (2-1)$$

که طبق رابطه مشهور انیشتین (معادله 3-1) به انرژی جنبشی تبدیل می شود [3]:

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (3-1)$$

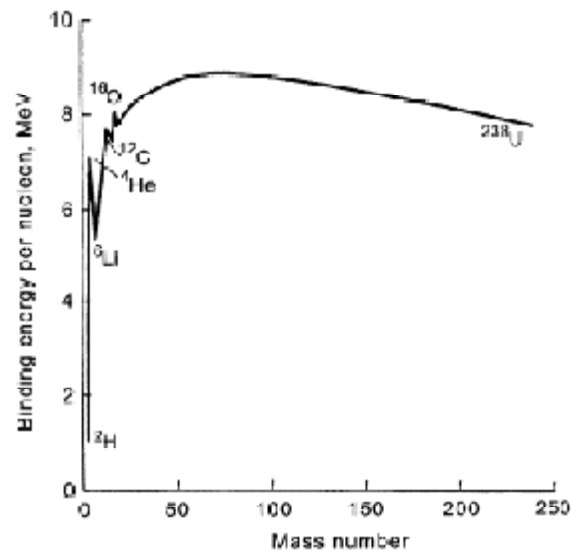
معمولاً همجوشی دو هسته با جرم های کمتر از آهن (آهن به همراه نیکل، بیشترین انرژی بستگی را به ازای هر نوکلئون دارا است.) انرژی آزاد می کند، در حالی که همجوشی هسته های سنگین تر از آهن انرژی جذب می کنند. این فرایند که کاملاً عکس فرایند اول است، شکافت هسته ای نامیده می شود. نکته مهم در واکنش های همجوشی هسته ای و رهاسازی انرژی، انرژی بستگی هسته است. شکل (1-1) انرژی بستگی را برای هر نوکلئون به صورت تابعی از عدد جرمی نشان می دهد. این شکل رابطه نسبتاً مستقیمی با یک مقدار بیشینه در ناحیه نزدیک هسته آهن نشان می دهد که پایدارترین هسته است. برای هسته های خیلی سبک تر

---

<sup>1</sup> Nuclear Fusion

<sup>2</sup> Thermonuclear

یا سنگین تر از هسته آهن، انرژی بستگی به طور قابل ملاحظه ای کوچک تر است. این تفاوت، پایه ای برای فرایندهای همجوشی و شکافت است که در آن هسته هایی با عدد جرمی کمتر از 56 فرایند همجوشی و هسته های با عدد جرمی بزرگ تر از 56 شکافت هسته ای انجام می دهند. در هر صورت، واکنش به طرف انرژی بستگی بیشتر (جرم کمتر) پیش می رود [3].



شکل (1-1): نمودار انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون بر حسب عددجرمی [3].

به طور طبیعی همجوشی هسته ای در همه ستارگان فعال روی می دهد. هم چنین همجوشی هسته ای مصنوعی نتیجه ای از فعالیت های بشر، برای تولید انرژی است. اگر چه این موضوع هنوز به طور کامل و کنترل شده روی نداده است، اما در آزمایشگاه ها، آزمایشهای فیزیک هسته ای موفقیت آمیزی انجام شده که شامل گستره مختلفی از هسته ها است. اما در این مطالعات، هنوز بهره و انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی بسیار ناچیز هستند [3].

همجوشی هسته ای کنترل نشده در آزمایشهای تسلیحات هسته ای در موارد زیادی به وقوع پیوسته که منجر به انفجارهای عمدی شده است. در این انفجارها همواره از ایزوتوپ های سنگین هیدروژن یعنی دوتریم و تریتم، استفاده کرده اند.

همجوشی هسته ای سبک (ایزوتوپ های هیدروژن) اولین بار توسط مارک الیفانت<sup>1</sup> در سال 1932 انجام گرفت. سپس برای اولین بار، مراحل چرخه اصلی همجوشی هسته ای در ستارگان، توسط هانس بته<sup>1</sup> مورد بررسی قرار گرفت [4].

<sup>1</sup> Mark Oliphant



پژوهش های همجوشی هسته ای برای اهداف نظامی در اوایل دهه 1940 میلادی، به عنوان پروژه منهتان<sup>2</sup> شروع شد و تا سال 1951 تکمیل نشده بود. اولین بار همجوشی هسته ای در مقیاس بزرگ با یک انفجار، در 1 نوامبر 1952 در آزمایش بمب هیدروژنی لوی مایک<sup>3</sup> انجام شد. اما پژوهش ها برای توسعه همجوشی گرما هسته ای کنترل شده برای اهداف غیر نظامی در دهه 1950 شروع شده و تا به امروز ادامه دارد. با وجود پیشرفتهای چشمگیر در این زمینه، این تحقیقات با مشکلات تکنولوژی و علمی فراوانی همراه است [4].

## 2-1- پارامترسازی سطح مقطع واکنش

مشکل اصلی در احتراق واکنش همجوشی این است که، هسته های همجوشی کننده دارای بار الکتریکی مثبت هستند (به دلیل وجود پروتون) و به شدت یکدیگر را دفع می کنند. بنابراین تحت شرایط عادی، فاصله بین هسته ها خیلی زیاد بوده و یک واکنش هسته ای کاملاً غیر محتمل است. شکل (2-1) نمودار انرژی پتانسیل هسته ها را بر حسب تغییر فاصله نشان می دهد. 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 ای بین آنها برقرار می شود و همجوشی رخ می دهد. رابطه (4-1) انرژی پتانسیل کولنی را نشان می دهد که در فواصل بیش از  $r_n$ ، (معادله (5-1)) مجموع شعاع دو هسته، از نوع دافعه است:

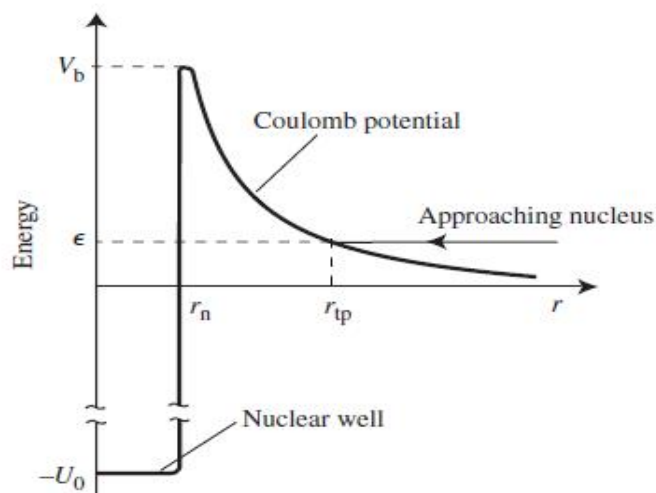
$$V_c(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (4-1)$$

$$r_n \cong 1.44 \times 10^{-13} (A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}}) \text{cm} \quad (5-1)$$

---

<sup>1</sup> Hans Bethe  
<sup>2</sup> Manhattan Project  
<sup>3</sup> Lvy Mike

که در رابطه های بالا  $Z_1$  و  $Z_2$  عدد اتمی،  $A_1$  و  $A_2$  عدد جرمی دو هسته همجوشی کننده و  $e$  بار الکترون است. در شعاع های کوچک تر از  $r_n$  دو هسته نیروی جاذبه هسته ای را احساس می کنند که با یک چاه پتانسیل با عمق  $30-40 \text{ MeV}$  مشخص می شود.



شکل (2-1): انرژی پتانسیل بر حسب فاصله بین دو هسته باردار واکنش کننده با انرژی مرکز جرم  $E$  [5].

با استفاده از روابط (4-1) و (5-1) ارتفاع سد کولنی مشخص می شود که از مرتبه  $1 \text{ MeV}$  است:

$$V_b \cong V_c(r_n) = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \quad (6-1)$$

طبق مکانیک کلاسیک، تنها هسته هایی با انرژی بیش از این مقدار می توانند بر سد کولنی غلبه کنند و با هم در تماس قرار بگیرند.

در عوض، دو هسته با انرژی نسبی  $E < V_b$  می توانند تا روی نقطه تبدیل<sup>1</sup> کلاسیکی  $r_{tp}$  به یکدیگر نزدیک شوند:

$$r_{tp} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{E} \quad (7-1)$$

که  $E$  انرژی مرکز جرم دو هسته برهمکنش کننده است که با رابطه (8-1) داده می شود:

<sup>1</sup> turning

$$E = \frac{1}{2} m_r V^2 \quad (8-1)$$

البته مکانیک کوانتومی، پدیده تونل زنی را با یک سد پتانسیل پهن اما محدود نیز اجازه می دهد، بنابراین ایجاد واکنش های همجوشی با انرژی کمتر از ارتفاع سد نیز امکان پذیر است.

یک پارامتر مورد استفاده مهم، سطح مقطع واکنش همجوشی است که با رابطه (9-1) داده می شود [5]:

$$\sigma \approx \sigma_{\text{geom}} \times \tau \times R \quad (9-1)$$

که  $\sigma_{\text{geom}}$  سطح مقطع هندسی،  $\tau$  گذردهی سد و  $R$  احتمال شرکت هسته در فرایند همجوشی است. اولین کمیت، متناسب با مربع طول موج دوبروی سیستم است [5]:

$$\sigma_{\text{geom}} \approx \lambda^2 = \left(\frac{h}{m_r v}\right)^2 \propto \frac{1}{E} \quad (10-1)$$

که  $m_r$  جرم کاهش یافته است و گذردهی سد با رابطه زیر داده می شود [5]:

$$\tau \approx \tau_G = \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right) \quad (11-1)$$

که این رابطه با فاکتور گاموف<sup>1</sup> شناخته شده است. انرژی گاموف با رابطه زیر داده می شود [5]:

$$E_G = (\pi\alpha_f Z_1 Z_2)^2 2m_r c^2 = 986.1 Z_1^2 Z_2^2 A_r \text{keV} \quad (12-1)$$

$$\alpha_f = \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137.04}$$

ثابت ساختار فوق ریز است که به طور رایج در مکانیک کوانتومی استفاده می شود و  $A_r = \frac{m_r}{m_p}$  است.

معادله (11-1) تا زمانی برقرار است که  $E \gg E_G$  باشد. این هیچ محدودیتی برای مسائل مورد نظر ما ایجاد نمی کند.

روابط (11-1) و (12-1) نشان می دهند که شانس تونل زنی، به سرعت با افزایش عدد اتمی و جرم اتمی کاهش پیدا می کند و اولین توضیح برای این حقیقت است که واکنش های همجوشی موردعلاقه برای تولید انرژی روی زمین، شامل سبک ترین هسته ها هستند.

<sup>1</sup> Gamow

برای بیشتر واکنش ها، تغییرات  $R(\epsilon)$  در مقایسه با تغییرات شدید فاکتور گاموف خیلی کوچک است. در نتیجه سطح مقطع به صورت زیر نوشته می شود [5]:

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right) \quad (13-1)$$

که تابع  $S(E)$  فاکتور S فیزیک نجومی نامیده می شود و برای بسیاری از واکنش های مهم، تابع متغیر خیلی ضعیفی از انرژی است [5].

### 1-2-1- آهنگ واکنش و سطح مقطع واکنش پذیری

در دماهای گرما هسته ای ( $10^8$  K تا  $10^9$  K) که با دمای درون خورشید قابل مقایسه است، اتمهای سبک به طور کامل از الکترونیهای مداری شان جدا می شوند. این گاز خنثای ماکروسکوپیکی، متشکل از هسته های اتمی سبک باردار مثبت و الکترونها، یک پلاسمای گرما هسته ای نامیده می شود.

آهنگی که در آن واکنش های همجوشی بین هسته های اتمی از نوع 1 و 2 در یک پلاسمای گرما هسته ای روی می دهد، برابر است با [3]:

$$R = n_1 n_2 \langle \sigma V \rangle_f = n_1 n_2 \iint f_1(V_1) f_2(V_2) |V_1 - V_2| \sigma_f(|V_1 - V_2|) d^3V_1 d^3V_2 \quad (14-1)$$

که  $n_1$  و  $n_2$  چگالی یونهای برهمکنش کننده،  $V_1$  و  $V_2$  سرعت آنها و  $f_1$  و  $f_2$  تابع توزیع سرعت هسته های برهمکنش است. هم چنین  $\langle \sigma V \rangle_f$  سطح مقطع همجوشی (یک مقدار تعیین اندازه احتمال برهم کنش (بر حسب سطح)) است. توزیع های سرعت یونها در یک پلاسمای در موارد با توزیع ماکسولوی (15-1) داده می شود [3]:

$$f_i(V_i) = \left(\frac{m_i}{2\pi k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m_i V_i^2}{2k_B T}\right) \quad (15-1)$$