

الله الزم محمد

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه اثر الکترون نسبیته در
پلاسمای چگال برای فرآیند
اشتعال سریع

استاد راهنما:

آقای دکتر محمد مهدوی

استاد مشاور:

خانم دکتر پروانه نظرزاده

دانشجو:

آمنه آهنگری

سپاسگزارى

با سپاس و تشكر فراوان از اساتيد گرانقدر جناب آقاى دكتور محمد مهدوي و سركار خانم دكتور پروانه نظرزاده كه از راهنمايي و ياري ايشان در اين مطالعه بهره مند گشته ام و از خداوند متعال برايشان آرزوي پيروزي دارم.

چکیده

مطالعه اثر الکترونیهای نسبیته در پلاسمای چگال برای فرآیند اشتعال سریع

توسط:

آمنه آهنگری

یکی از روشهای انجام واکنش گداخت هسته‌ای است روشی است که از (ICF) محصور سازی اینرسی خواص اینرسی خود سوخت جهت محصورسازی آن استفاده می شود. در این روش سوخت باید به چگالی و دمای بسیار بالا فشرده شود تا شرایط مورد نیاز برای انجام واکنش گداخت فراهم شود. به این منظور از ابزارهایی پیشنهاد شده که ICF نظیر لیزر برای فشرده سازی سوخت استفاده می شود. طرحهای مختلفی برای انجام فرآیند از بین آنها فرآیند اشتعال سریع بهترین گزینه برای تأمین بهره انرژی بالا شناخته شده است. در این روش تابش $10^{14} - 10^{15} \text{ W/cm}^2$ دهی به سوخت در دو فاز صورت می گیرد. ابتدا به وسیله لیزری با شدت حدود سوخت به چگالی بالایی فشرده می شود. در فاز دوم تابش دهی به وسیله لیزر دیگری با شدت بالای شتاب می MeV صورت می گیرد. در اثر این تابش دهی الکترونیهای محیط تا چندین $10^{18} - 10^{20} \text{ W/cm}^2$ گیرند. این الکترونیهای نسبیته از یک ناحیه مخروطی شکل در سوخت عبور کرده و به مرکز سوخت می رسند و (در نهایت منجر به اشتعال آن می hot spot باعث بالا رفتن دمای آن ناحیه و تشکیل یک نقطه داغ مرکزی) شوند. با انتشار موج اشتعالی از مرکز به سوخت سرد چگال اطراف آن، کل سوخت شروع به سوختن می کند و به این ترتیب انرژی گداخت آزاد می شود. در این تحقیق ابتدا به شرایط لیزرهای فشرده سازی و اشتعالی پرداخته می شود. سپس عوامل موثر بر تولید الکترونیهای نسبیته، انتقال موثر و ذخیره انرژی آنها را در نواحی مختلف سوخت بررسی می شود و نقش این عوامل را در به دست آوردن بهره انرژی مناسب مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

محصور سازی اینرسی، اشتعال سریع، الکترون نسبیته، نقطه داغ مرکزی، لیزر: واژه های کلیدی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
1	پیش گفتار
فصل اول: گداخت هسته‌ای	
2	1-1 مقدمه
3	2-1 کاتالیزور میونی
3	3-1 محصورسازی مغناطیسی
5	ICF 4-1 محصورسازی اینرسی،
5	1-4-1 فاز بر همکنش
7	2-4-1 فاز فشرده‌سازی
9	3-4-1 فاز کاهش سرعت
10	4-4-1 فاز اشتعال و سوختن
11	5-1 بهره انرژی
14	6-1 چرخه سوخت
فصل دوم: آشنایی با فیزیک پلاسما	
16	1-2 مقدمه
16	2-2 طول دبای
19	3-2 نوسان پلاسما
20	4-2 لگاریتم کلونی
21	5-2 توصیف ذره در پلاسما
23	6-2 جذب نور لیزر در پلاسما
24	1-6-2 جذب معکوس تابش ترمزی

7-2 ذخیره انرژی ذرات باردار و نوترونها در پلاسما	24
1-7-2 تصحیح معادله فوکر - پلانک	26
2-7-2 توان توقف	28
8-2 پراکندگی هسته‌ای	31
فصل سوم: اشتعال سریع	
1-3 مقدمه	33
2-3 اشتعال سریع	34
1-2-3 شرایط لیزر فشرده کننده	36
2-2-3 شرایط لیزر اشتعال دهنده	37
3-3 عوامل اتلاف انرژی از ناحیه مرکزوزی سوخت به اطراف	40
1-3-3 ذخیره انرژی محصولات گداخت	41
2-3-3 هدایت گرمایی الکترون	41
3-3-3 تابش ترمزی	42
4-3-3 کار مکانیکی	43
5-3-3 شرایط گرم کردن خود به خودی ناحیه داغ مرکزی	44
4-3 بهره انرژی	46
5-3 انتقال انرژی در پلاسمای چگال	49
فصل چهارم: عوامل مؤثر بر تولید الکترون نسبیتی و انتقال انرژی آن در پلاسما	
1-4 مقدمه	50
2-4 جفت شدگی لیزر به سوخت	50
1-2-4 تولید الکترون داغ (نسبیتی)	51
2-2-4 انتقال انرژی الکترون داغ و ذخیره انرژی آن به سوخت	52
3-4 مشخصات بیم الکترون سریع برای اشتعال سوخت	53

4-4 طراحی هدف	55
فصل پنجم: انتقال و ذخیره انرژی الکترون نسبیته در قسمت چگال سوخت	
1-5 مقدمه	57
2-5 توان توقف	57
3-5 پراکندگی	58
1-3-5 پراکندگی الکترون - یون	59
2-3-5 پراکندگی الکترون - الکترون	60
3-3-5 میانگین مربع انحراف	62
4-5 مدل مونت کارلو برای بررسی رفتار الکترون	63
1-4-5 برد، عمق نفوذ و ذخیره انرژی الکترون در پلاسمای یکنواخت	63
2-4-5 محاسبه تحلیلی برد و عمق نفوذ الکترون	65
3-4-5 ذخیره انرژی الکترون	69
5-5 شرایط اشتعال یک پلاسمای یکنواخت با یک بیم الکترونی	72
نتیجه گیری	76
مراجع	78

پیش گفتار

یکی از سه روش گداخت هسته ای می باشد که از اینرسی سوخت برای ICF محصورسازی اینرسی یا شامل چندین مرحله است که در فصل اول به آنها ICF محصورسازی آن استفاده می شود. به طور کلی فرآیند اشاره می شود.

که لیزر به سوخت تابانده می شود پلاسما تشکیل می گردد. در نتیجه همه مراحل این ICF در مرحله اول فرآیند از فشرده سازی تا اشتعال سوخت در یک محیط پلاسمایی انجام می شوند. بنابراین در فصل دوم در مورد فیزیک پلاسما و برهمکنش های لیزر با پلاسما بحث می شود.

پیشنهاد شده که از بین آنها اشتعال سریع بهترین روش برای رسیدن به ICF طرحهای مختلفی برای فرآیند بهره انرژی بالا شناخته شد. مزیت این روش این است که مراحل فشرده سازی و اشتعال سوخت به طور جداگانه صورت می پذیرد. در فصل سوم شرایط لیزرهای فشرده کننده و اشتعال دهنده سوخت مورد بررسی قرار می گیرد.

جذب انرژی لیزر توسط سوخت باعث می شود الکترونها محیط به حد نسبی برسند. این الکترونها پیر انرژی به سمت مرکز سوخت حرکت می کنند و منجر به گرم شدن و در نهایت اشتعال آن ناحیه می شوند. در فصل چهارم و پنجم عوامل موثر بر تولید این الکترونها نسبی، انتقال و ذخیره انرژی آنها به سوخت بررسی می شود.

فصل اول

گداخت هسته ای

1-1 مقدمه

سالیان دراز تولید انرژی در زمین همانند تولید انرژی در خورشید یکی از رویاهای بشر بود. در قرن بیستم گداخت های سبک عمدتاً هسته ای به عنوان منبع انرژی خورشید و سایر ستارگان شناخته شد. گداخت هسته ای از ترکیب هسته ایزوتوپهای هیدروژن مثل دوتریوم و تریتیوم و تشکیل یک هسته سنگین تر تولید انرژی می کند. انتخاب سوخت 10 می KeV و سطح مقطع برهمکنش بالا در انرژی KeV تریتیوم به دلیل انرژی آستانه نسبتاً پایین دوتریوم - باشد.

گداخت هسته ای این مزیت را نسبت به سوختهای فسیلی و همچنین منابع انرژی شکافت هسته ای دارد که از نظر ایمنی یک روش مطمئن است. چون هیچ گونه انتشار گازهای گلخانه ای نداریم و نیازی به واکنش های زنجیره ای نیست و نیز تولید انرژی بیشتری نسبت به منابع دیگر انرژی دارد. همچنین گداخت هسته ای منابع طبیعی غنی دارد. منابع عظیم دوتریوم در طبیعت (آب اقیانوسها) به میزان زیادی قابل دسترس است. تریتیوم نیز که از لیتیوم حاصل می شود منابع آن در زمین به فراوانی یافت می شود. این مزایا توان گداخت را به عنوان یک گزینه بسیار مناسب تولید انرژی الکتریسیته برای قرنهای آینده قرار داده است.

مسئله ای که پیش می آید این است که چرا ما همان روش گداخت در خورشید را در زمین انجام نمی دهیم. به دلیل اینکه تولید انرژی در خورشید در یک مقیاس عظیمی از فضا و زمان انجام می شود به طوری که تعداد زیادی واکنش همزمان روی می دهند. اما در زمین در فضا و زمان محدود باید این واکنش ها روی دهند. بزرگترین مانع در انجام واکنش های گداخت دافعه کلونی است، بنابراین هسته ها باید آنقدر به هم نزدیک شوند تا بر دافعه کلونی بینشان غلبه (5-10) گرم شود تا انرژی جنبشی یونهای واکنش کننده KeV کنند. در ابتدای کار لازم است که سوخت تا دمایی بتواند بر سد پتانسیل کلونی بینشان فزونی یابد. به دلیل نیاز به دما و چگالی بسیار بالا برای انجام گداخت باید پلاسمای داغ کاملاً یونیزه داشته باشیم و این شرایط، محصورسازی پلاسمای را برای ما ضروری می سازد. محصورسازی به سه روش زیر انجام می شود [1].

(1) کاتالیزور میونی¹ (2) محصورسازی مغناطیسی² (3) محصورسازی اینرسی³.

¹ - μ - Catalysed fusion

² - Magnetic confinement

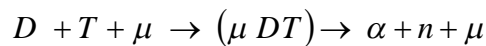
³ - Inertial confinement

2-1 کاتالیزور میونی

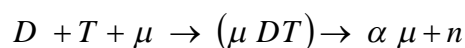
فرآیند گداخت به این روش به بی اثر کردن سد کلونی و نیروی دافعه کلونی استوار است. برای این منظور باید از ذره‌ای استفاده کرد که به جای الکترون اتمی بنشیند و شعاع مدار آن کوچکتر از شعاع مدار هیدروژن باشد تا هسته مورد نظر بدون بار شده و بتواند فاصله هسته‌ای خود را با هسته‌های دیگر کم کرده و احتمال گداخت را افزایش دهد.

از بین ذرات زیر هسته‌ای، میون باردار منفی اثر کاهش نیروی دافعه کلونی دارد و ایجاد واکنش‌های گداخت در دماهای پایین را ممکن می‌سازد که به همین دلیل به آن گداخت سرد گفته می‌شود. واکنش را می‌توان به شکل زیر نوشت:

(1-1)



(2-1)



(μ) آزاد است تا پدیده DT حالت میانی عمر کوتاهی دارد. در بیشتر واکنش‌ها میون فرو پاشیده شده از هسته میانی (μ) گداخت دیگری را به وجود آورد. گاهی نیز میون به آلفا متصل شده و به صورت آلفای میون دار از چرخه گداخت خارج می‌شود. در دو روش دیگر که به آنها گداخت داغ یا گداخت گرما هسته‌ای گفته می‌شود برای نزدیک کردن هسته‌ها به هم و کاهش اثر سد کلونی از شیوه‌های زیر استفاده می‌شود.

افزایش دما به منظور نفوذ در سد کلونی و افزایش احتمال وقوع واکنش گداخت و همچنین افزایش چگالی به منظور افزایش تعداد برخورد و افزایش احتمال گداخت که در این روش‌ها به نگهداری پلاسما در یک دوره زمانی در دما و چگالی معینی نیاز می‌باشد و اساس آن تزریق انرژی کافی به ذرات برای غلبه بر نیروهای الکترواستاتیکی است [1].

3-1 محصورسازی مغناطیسی

همان طور که می‌دانیم پلاسما از مجموعه‌ای از ذرات باردار تشکیل شده است. نیروی ناشی از میدانهای مغناطیسی به ذرات باردار آنها را وادار می‌کند که در مدارهای مارپیچی فقط در جهت خطوط میدان حرکت کنند و حرکت در جهت‌های دیگر منقطع می‌گردد. بنابراین با طراحی میدان‌های مغناطیسی مناسب می‌توانیم ذرات باردار پلاسما را محبوس سازیم.

می‌دانیم که چگالی انرژی مغناطیسی در میدان مغناطیسی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(3-1) \quad \frac{E}{V} = \frac{B^2}{2\mu}$$

B میدان مغناطیسی و μ ضریب نفوذپذیری محیط است. این چگالی انرژی را می توان به عنوان فشار مغناطیسی در نظر گرفت که به یک ذره باردار در ناحیه میدان مغناطیسی وارد می شود. با فرض اینکه دمای یون و الکترون در n یکسان و برابر با n_e و چگالی الکترونها، n_i داخل پلازما بر اساس توزیع ماکسول⁴ برابر با T باشد و چگالی یونها، باشد در این صورت با استفاده از قانون گازهای ایده‌ال برای فشار جنبشی ذاتی ذرات پلازما داریم:

$$(4-1) \quad P = (n_e + n_i)k_B T = 2nk_B T$$

ثابت بولتزمن⁵ است. شرط اساسی برای محبوس کردن مغناطیسی ذرات در داخل پلازما این است که فشار k_B مغناطیسی داده شده از فشار جنبشی ذاتی ذرات بیشتر باشد [1-2].

$$(5-1)$$

$$nk_B T \leq \frac{B^2}{4\mu}$$

به عبارتی می توان گفت محبوس کردن ذرات مستلزم اعمال یک فشار مغناطیسی است که بر فشار جنبشی ذاتی ذرات غلبه کند. در این صورت ذرات بارداری که توسط میدان مغناطیسی در پلازما محبوس شدند از طریق برخوردهای پی در پی انرژی خود را در داخل پلازما از دست می دهند. به طور کلی فرآیند گداخت به این روش با سه فرآیند یونیزاسیون، گرم کردن و فشردگی مشخص می شود. برای اینکه اشتعال صورت بگیرد پلازما باید به یک طریق خارجی گرم شود. سه مکانیزم مختلف برای گرم کردن پلازما به کار برده می شود؛ 1. گرم کردن اهمی 2. گرم کردن به وسیله امواج با فرکانس بالا 3. با تزریق ذرات خنثی.

گرم کردن اهمی به این صورت عمل می کند؛ ذرات داخل پلازما براساس مقاومت ویژه پلازما برخورد می کنند هنگامی که جریان در میان پلازما عبور داده می شود گرم کردن مطلوب از طریق این مقاومت حاصل می شود. با افزایش دما، مقاومت پلازما کاهش می یابد بنابراین این مکانیزم تنها می تواند در فاز اولیه گرم کردن به کار رود. پس از آن روش های دیگر گرم کردن به کار می رود. گرم کردن به وسیله امواج فرکانس بالا از این واقعیت ناشی می شود که در میدان مغناطیسی مدهای ویژه‌ای برای یونها و الکترونهای پلازما وجود دارد. ذرات پلازما انرژی را در اثر یک آهنگ

⁴ - Maxwell distribution

⁵ - Boltzmann constant

برخورد بالای هسته‌های هیدروژن از میدان موج جذب می‌کنند. سومین روش گرم کردن، گرم کردن پلاسما به وسیله تزریق ذرات خنثی با انرژی چند ده کیلو الکترون ولت است. چنانچه این ذرات وارد پلاسما شوند در اثر برخوردها یونیزه شده، این ذرات باردار سریع در میدانهای مغناطیسی گیر می‌افتند و انرژی‌شان را در اثر برهمکنش با پلاسما در یک زمان نسبتاً کوتاه از دست می‌دهند، هنگامی که پلاسما گرم شد و دمای آن به قدر کافی بالا رفت آنگاه اشتعال صورت می‌گیرد و گداخت اتفاق می‌افتد [1-2].

4-1 ICF محصورسازی اینرسی،

محصور می‌سازد 10^{14} cm^{-3} در مقابل محصورسازی مغناطیسی که پلاسما را در مدت چند ثانیه به چگالی تقریباً محصور می‌کند [1]. در 10^{25} cm^{-3} به چگالی بیش از 10^{-1} ns ذرات پلاسما را در زمان کمتر از ICF فرآیند تلاش بر این است که با استفاده از اینرسی خود سوخت برای محصورسازی آن استفاده شود. سوخت محصور شده ICF باید به دما و چگالی بسیار بالایی برسد تا بتواند به تعداد کافی واکنش گداخت انجام دهد و کل انرژی آزاد شده از محصولات گداخت بسیار بیشتر از انرژی مورد نیاز ورودی برای فشرده‌سازی سوخت شود. اشتعال سوخت به دو صورت اشتعال حجمی و اشتعال نقطه داغ⁶ انجام می‌شود. در اشتعال حجمی کل سوخت برای رسیدن به شرایط اشتعال باید فشرده شود و سوخت به طور یکنواخت گرم شود. در این صورت چون انرژی مورد نیاز ورودی خیلی زیاد می‌شود بهره بسیار پائینی را نتیجه می‌دهد. راه خارج شدن از این مشکل اشتعال تنها بخش کوچکی از سوخت در مرکز آن است که نقطه داغ نامیده می‌شود. سپس یک مخزن بزرگی از سوخت سرد بسیار چگال از طریق انتشار موج سوختن مشتعل می‌گردد. مسئله ای که مطرح است چگونگی ایجاد این نقطه داغ مرکزی است. بهترین وسیله برای این هدف لیزرها هستند. انرژی لیزر توسط الکترون‌های سطح خارجی سوخت جذب می‌شود، بنابراین دمای قسمت خارجی پوسته افزایش می‌یابد و یک سری از بخش‌های آن از سطح کنده می‌شود. به علت بقای اندازه حرکت، قسمت داخلی به سمت مرکز (که مربوط به پوسته PdV سوخت با فشار قطع⁷ رانده می‌شود و یک بخش کوچک از سوخت در مرکز به وسیله کار منفجر شده است) گرم می‌شود. بنابراین یک محیط مناسب برای بالا بردن واکنش پذیری سوخت فراهم می‌سازد. این نقطه داغ مرکزی که چگالی کمتری نسبت به سوخت چگال اطراف آن دارد و منبع موج سوختن گرما هسته ای است به سرعت به سمت خارج انتشار می‌یابد. در طرح اشتعال نقطه داغ، انرژی ورودی کمتری مورد نیاز است، چون ماده کمتری نیاز است که گرم شود. بنابراین بازده بیشتری نسبت به اشتعال حجمی می‌دهد.

دو روش برای دادن انرژی به سوخت وجود دارد. روش مستقیم⁸ و روش غیرمستقیم⁹. در روش مستقیم ساچمه‌های سوخت مستقیماً در معرض تابش پرتوهای محرک لیزر قرار می‌گیرند. در این روش عدم هماهنگی در تابش دهی موجب ایجاد ناپایداری و در نتیجه هدر رفتن سوخت می‌شود. در روش غیرمستقیم ساچمه‌های سوخت درون محفظه‌ای فلزی قرار داده می‌کند با این کار انرژی X می‌شوند. سپس پرتوی محرک را به محفظه می‌تابانند محفظه در اثر گرم شدن اشعه

⁶ - Hot spot

⁷ - Ablation

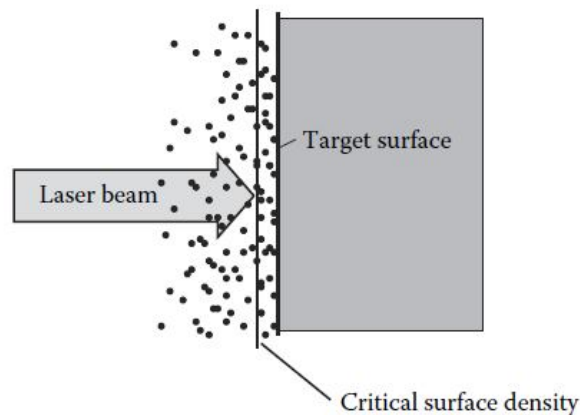
⁸ - Direct drive

⁹ - Indirect drive

[3ICF]. به طور کلی فرآیند -به طور یکنواخت به سوخت منتقل می شود و ناپایداری ها تا حد زیادی از بین می رود [4] در چندین فاز مختلف انجام می شود که به توضیح آنها می پردازیم.

1-4-1 فاز برهمکنش¹⁰

تزریق می شود. به طور DT فاز برهم کنش مرحله اولیه است که در آن انرژی به ساچمه های سوخت محتوی سوخت عمده دو گزینه برای دهنده های انرژی ورودی وجود دارد. یکی پرتوهای لیزر با پالس کوتاه و دیگری بیم ذرات پرانرژی است. فرآیند برهمکنش برای هر کدام از این دهنده ها متفاوت عمل می کند. پرتوهای لیزر با سطح ماده ای که به آن برخورد می کنند برهمکنش می کنند اما بیم ذرات تا مسافتی را در ماده بدون هیچ برهمکنشی طی می کنند. بنابراین جزئیات فرآیندهای این مرحله به نوع دهنده انرژی بستگی دارد. تحقیقات به عمل آمده نشان داده که پرتوهای لیزر مزیت های بیشتری نسبت به سایر محرک های انرژی دارند. بنابراین ما لیزر را به عنوان محرک انرژی در نظر می گیریم. در این حالت به محض اینکه پرتو لیزر به سطح خارجی کپسول سوخت برخورد می کند فوراً پلاسما تشکیل می شود و ذرات یونیزه شده از این سطح به خارج منبسط می شوند. همانطور که در شکل (1-1) نشان داده شده چگالی بیشتر در سطح کپسول محصور می شود. مسئله ای که وجود دارد چگالی بحرانی¹¹ است که نور لیزر را از نفوذ بیشتر باز می دارد. چون سطح چگالی بحرانی در یک فاصله دوری از سطح هدف جامد قرار دارد.



شکل 1-1. تصویری از چگالی بحرانی که در اثر برهمکنش لیزر با هدف تشکیل می شود. [2]

¹⁰ - Interaction phase

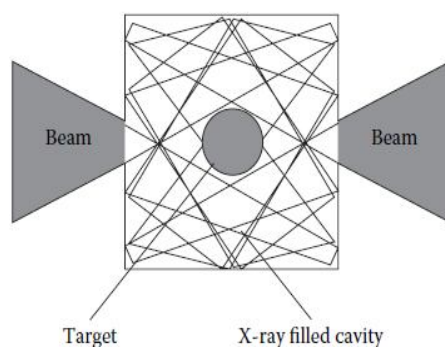
¹¹ - Critical density

انرژی لیزر به طور مستقیم به سطح کپسول نمی رسد. محل چگالی بحرانی بستگی به طول موج، شدت و طول پالس لیزر دارد. انتخاب این پارامترها برای جفت شدگی موثر انرژی لیزر به هدف یک مسئله اساسی است. این پارامترها نه تنها فاصله انرژی بین سطح بحرانی و سطح هدف را تعیین می کنند، بلکه تعداد ذرات کنده شده و نیز راندمان مرحله فشرده سازی را تعیین می کنند[2].

1-4-2 فاز فشرده‌سازی¹²

فاز برهمکنش تا حد زیادی چگونگی روند موفقیت آمیز فاز فشرده سازی را تعیین می کند. در فاز فشرده‌سازی خواسته ما فشرده سازی متقارن سوخت است. بزرگترین مانع برای رسیدن به این هدف ناپایداری های ریلی تیلور¹³ است. یک سری اختلالهایی وجود دارد که منجر به ایجاد این ناپایداری ها می شوند که عمدتاً از تابش غیریکنواخت انرژی لیزر سرچشمه می گیرند. تابش دهی غیریکنواخت در دو مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی صورت می گیرد. به عنوان مثالی از غیر یکنواختی ماکروسکوپی، ناکافی بودن پرتوها یا عدم هماهنگی در تابش دهی پرتوها می توان ذکر کرد. منشأ غیریکنواختی میکروسکوپی هم می تواند به علت وجود تغییرات فضایی در یک تک بیم باشد. دو راه برای کاهش ناپایداری های ماکروسکوپی وجود دارد. یکی تابش پرتوها به میزان زیاد است و این در طرح تابش دهی مستقیم به کار می رود. تهیه چنین سیستمی بسیار گران می شود. یک روش دیگر برای کاهش ناپایداری ها استفاده از تابش دهی غیرمستقیم است. در این طرح، انرژی لیزر ابتدا توسط یک جسم سیاه که اساساً محفظه‌ای در اطراف کپسول سوخت است جذب می شود.

در شکل (1-2) یک تصویر از این طرح نشان داده شده. در این طرح کپسول به طور مستقیم در معرض تابش لیزر قرار ندارد بلکه درون یک محفظه‌ای شامل ماده‌ای با عدد اتمی بالا قرار دارد با جذب انرژی توسط محفظه، سطح آن ساطع می کند که می تواند کپسول سوخت را برای انفجار درونی تحریک سازد. در طراحی چنین X گرم شده و اشعه تبدیل می شود [2]. اگر چه این طرح نسبت به تحریک مستقیم نیاز به X هدفی 70 تا 80 درصد انرژی لیزر به اشعه انرژی ورودی بیشتری دارد در عوض غیریکنواختی در تابش دهی که باعث کاهش بهره سوخت می شود به میزان زیادی کاهش می یابد.

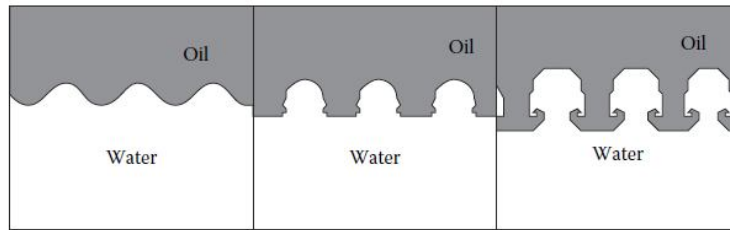


¹² - Compression phase

¹³ - Rayleigh- Taylor Instabilities

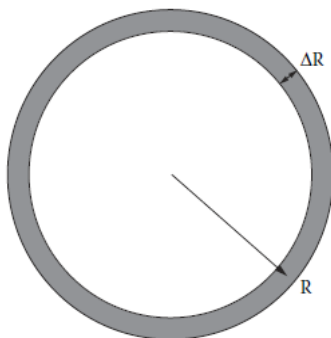
شکل 1-2 طرحی از تحریک غیر مستقیم [2]

با وجود این هنوز ناپایداری ها به طور کامل متوقف نمی شوند. به عنوان مثالی از ناپایداری ها می توان اختلال طول نامناسب است. چون این اختلالات به طور نمایی در سطح پوسته افزایش ICF موجهای کوتاه را در نظر گرفت که در می یابد حتی اگر خیلی کوچک باشد می تواند به اندازه های برسد که خطری جدی برای فشرده سازی کامل باشد. هنگامی که یک شاره سنگین تر به شاره سبک تر فشار وارد کند، این ناپایداری ایجاد می شود. به شکل (1-3) توجه کنید.



شکل 1-3 طرحی از ناپایداری های ریلی تیلور [2]

به جای دو شاره ما یک پلاسمای داغ با چگالی پایین تر و یک پلاسمای سرد با چگالی بالاتر داریم که ICF در اثرات فیزیکی همانند حالت دو شاره مختلف است. هنگامی که هدف فشرده می شود پلاسمای داغ به پلاسمای سرد فشار وارد می کند و چنین ناپایداری هایی شکل می گیرد. هنگامی که پلاسمای سرد با پلاسمای داغ ترکیب شود این و این برای فاز فشرده سازی نامناسب است. اثر منجر به سرد شدن نامطلوب پلاسمای داغ می شود، شکل (1-4) به ضخامت آن $R(t)$ بنابراین هدفها باید طوری طراحی شوند که این ناپایداری به حداقل برسد. نسبت شعاع پوسته یک پارامتر مهم است. محاسبات نشان می دهد که این نسبت از مرتبه 20-45 می شود که نه تنها در هنگام $\Delta R(t)$ شروع بلکه در طول فرآیند انفجار درونی برقرار است [2]. در لحظه شروع در سطح بیرونی پوسته پلاسمای چگالی کمتر به سمت چگالی بیشتر شتاب می گیرد و حتی می تواند منجر به تخریب پوسته شود.



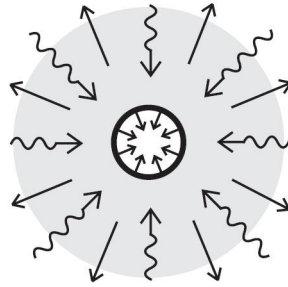
Δ برای تعیین نسبت بینشان [2]. R و R شکل 1-4 پارامترهای

دومین مرحله ناپایداری زمانی است که ناحیه مرکزی قرص با چگال پایین به سمت پوسته چگالتر قرص می‌کند می‌شود که این حالت منجر به ترکیب سوخت چگال سرد با لکه داغ پلاسما می‌شود. چون اندازه این ناحیه را کاهش می‌دهد برای این مرحله مضر است بنابراین باید سرعت این مرحله زیاد باشد تا قبل از اینکه قرص فرو بریزد و یا فشار داخلی زیاد شود فشرده‌سازی صورت بگیرد. علاوه بر این نور لیزر باید طوری باشد که تا آنجا که ممکن است از تولید الکترونهای داغ جلوگیری شود. چون این الکترونهای داغ می‌توانند باعث پیش گرم شدن ناحیه مرکزی سوخت قبل از رسیدن موج فشار به آنجا شوند. این پیش گرم شدن برای فاز فشرده‌سازی مناسب نیست زیرا باعث وارد آوردن نیرو از مرکز به سمت خارج شده که مخالف فشرده‌سازی عمل می‌کند. این پدیده با افزایش طول موج لیزر افزایش می‌یابد. به همین دلیل از لیزرهای با طول موج کوتاه استفاده می‌کنند.

1-4-3 فاز کاهش سرعت¹⁴

برای رسیدن به دما و چگالی مطلوب پالس لیزر با وارد کردن یک شوک یکنواخت در ساچمه سوخت شروع می‌شود. چنانچه شوک به درون سوخت منتشر شود توان لیزر شروع می‌کند به بالا رفتن و متعاقباً منجر می‌شود به یک موج فشرده‌کننده که به سمت مرکز کپسول حرکت می‌کند. اگر چنانچه سرعت شوک زیر سرعت صوت باشد موج فشرده‌سازی زودتر از موج شوک به مرکز سوخت می‌رسد. هنگامی که موج فشرده‌سازی به درونی‌ترین قسمت سوخت رسید و آن قسمت فشرده شده فاز کاهش سرعت آغاز می‌شود. موج شوک حرکت کننده به سمت داخل از مرکز سوخت منعکس می‌شود و به سطح پوسته داخلی منفجر شده برخورد می‌کند و منجر می‌شود به اینکه پوسته آرام شود. انرژی می‌شود در نتیجه دما و چگالی در مرکز افزایش می‌یابد و بقیه جنبشی قسمت داخلی سوخت به انرژی درونی تبدیل سوخت نسبتاً بدون تغییر باقی می‌ماند. برای دستیابی به دما و چگالی بالای مورد نیاز برای ناحیه داغ مرکزی باید شدت پالس به طور متوالی افزایش یابد تا بتوانیم بدون تغییر انرژی فشرده‌سازی داشته باشیم [5].

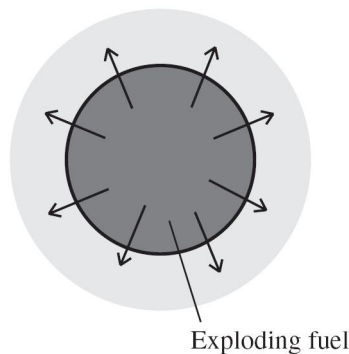
¹⁴ - Deceleration phase



شکل 5-1 طرحی از فاز کاهش سرعت [1]

15 4-4-1 فاز اشتعال و سوختن

هنگامی که شرایط دما و چگالی در ناحیه داغ مرکزی حاصل شد اشتعال رخ می دهد. ذرات آلفای تولید شده از واکنش گداخت انرژی خود را عمدتاً در ناحیه مرکزی می دهند و به سرعت آنجا را گرم می کنند. تابش، نوترونهای گداخت و انرژی را از ناحیه داغ مرکزی به سمت خارج آن منتقل می کنند. دمای قسمت خارج هدایت گرمایی به وسیله الکترونها، به این ترتیب موج سوختن به ناحیه داغ مرکزی افزایش می یابد تا اینکه واکنش های گداخت در آنجا نیز رخ می دهند سمت خارج انتشار می یابد. کل این فرآیندها در مدت زمان چند پیکو ثانیه اتفاق می افتند که در نهایت سوخت باقیمانده است. ICF اشتعال می یابد و این پایان سیکل



شکل 6-1 طرحی از فاز اشتعال و سوختن [1]

16 5-1 بهره انرژی

هنگامی بهره انرژی مثبت خواهیم داشت که انرژی به دست آمده از محصولات گداخت بیش از انرژی ICF در فرآیند مورد نیاز ورودی باشد. این انرژی ورودی دقیقاً همان انرژی مورد نیاز برای گرم کردن و اشتعال سوخت نیست به دلیل وجود یک سری فرآیندهای اتلافی نظیر ناپایداری‌های ریلی تیلور و ... اتلاف انرژی داریم. در نتیجه انرژی ورودی به کوچکتر از یک است.) η کاهش می یابد. (η افزایش می یابد و بهره هدف نیز به اندازه $\frac{1}{\eta}$ اندازه

به طور کلی بهره انرژی به این صورت بیان می شود:

$$(6-1) \quad G = \frac{E_{fus}}{E_d} = \frac{q_{DT} M_f \varphi}{E_d}$$

جرم M_f و J/g 1.3×10^{11} در واحد جرم است و برابر است با DT انرژی آزاد شده از واکنش q_{DT} که کسر سوختن¹⁷ است که به صورت زیر بیان می شود: φ سوخت و

$$(7-1) \quad \varphi = \frac{H_f}{H_f + H_B}$$

(10-100) مقدار آن KeV پارامتر سوختن است که در بازه دمایی H_B و (ρR) برابر با چگالی سطحی¹⁸ H_f به E_d انرژی مورد نیاز ورودی است. با در نظر گرفتن اتلاف انرژی $7 E_d$ می شود [1]. g/cm^2 تقریباً ثابت و برابر با فرم زیر تبدیل می شود.

$$(8-1) \quad E_d = \frac{E_{DT}}{\eta}$$

¹⁶ - Energy gain

¹⁷ - Fractional burn up

¹⁸ - Areal density

انرژی مورد نیاز برای تولید لکه داغ مرکزی است که با استفاده از قانون گازهای ایده‌آل برای دو یون و دو E_{DT} (دمای لکه داغ) هستند به شکل زیر به دست می‌آید: T الکترون که در دمای

$$E_{DT} = 4 \times \frac{3}{2} k_B T = 6 k_B T \quad (9-1)$$

فاکتوری است که برای اتلاف انرژی به کار می‌رود و معمولاً بین 10 تا 30 درصد است. بنابراین شکل نهایی η بهره انرژی به صورت زیر است:

$$G = \frac{1.3 \times 10^{11}}{6 k_B T} M_f \eta \varphi \quad (10-1)$$

نسبت عکس دارد. T نسبت مستقیم و با دمای η و φ و M_f همان طور که ملاحظه می‌شود بهره هدف با

این است که به ازای یک انرژی ورودی مشخص، انرژی خروجی ماکزیمم داشته باشیم. بنابراین ICF خواسته ما در باید فاز سوختن به خوبی انجام شود و چگالی ناحیه داغ مرکزی باید به گونه‌ای باشد که محصولات گداخت (ذرات آلفا و) بتوانند در آنجا آرام شوند و انرژی‌شان را در آنجا ذخیره کنند چون برد نوترونها در DT نوترونهای واکنش گداخت 10 تقریباً بیست برابر برد ذرات آلفا است آنها عمدتاً انرژی‌شان را در خارج از ناحیه داغ مرکزی به جا می‌کند $\rho R \gg \rho \lambda_\alpha$ که شرط زیر برقرار باشد

مسافت آزاد میانگین ذرات آلفا است. به محض شروع فرآیند سوختن، ذرات آلفا به سرعت هسته چگال را تا دمای λ_α (20-80) گرم می‌کنند. توان توقف ذرات آلفا به صورت زیر است که توسط فرالی¹⁹ تعیین شده است [2]. KeV.

(11-1)

$$\left(\frac{dE_\alpha}{dx} \right) = -26.9 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \frac{E_\alpha^{1/2}}{T_e^{1/2}} \left[1 + 0.168 \ln \left[T_e \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} \right] \right] - 0.05 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \frac{1}{E_\alpha} \left[1 + 0.075 \ln \left[T_e^{1/2} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} E_e^{1/2} \right] \right]$$

¹⁹ - Fraley