Archive of SID

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۳، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۸۱

بهره انرژی ساچمه‌هایی با اشتعال جرقه‌ای در همجوشی به روش لختی

اکبر پروازیان و جمشید جعفری
دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۹/۱۱/۵ دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۱۱/۲۳)

چکیده

برای تعیین بهره انرژی حاصل از همجوشی به روش لختی (ICF[1]) در ساچمه‌های چند لایه لازم است معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر رفتار پلاسما در مدت زمان محصورسازی حل گردد. ساچمه‌های چند لایه کروی که در ناحیهٔ مرکزی آن سوخت قرار دارد به وسیله پرتوهای محرک پرانرژی لیزری یا یون سنگین که از بیرون بر آن می‌تابد متراکم می‌گردد. انتخاب مناسب نسبت جرمی لایه سوخت به لایه هل‌دهنده موجب اشتعال ناحیهٔ مرکزی می شود. در حالتی که ساچمه به بیشترین تراکم خود می‌رسد، چگالی سوخت به بیش از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد سوخت می‌رسد. دما در ناحیه سوخت سرد به سرعت بالا می‌رود، پلاسما تشکیل می‌شود و برهمکنشهای همجوشی آغاز می‌شود. محاسبه تغییرات چگالی، دما و فشار داخل پلاسما برای تعیین شار انرژی جنبشی نوترونها، الکترونها و تابشهایی که از ساچمه خارج می‌شود لازم است. با استفاده از روش حل عددی معادلات پیوستگی، نیرو و انرژی بر پایهٔ یک معادله پیوستگی نوعی برنامه‌ای برای تعیین تغییرات چگالی، دما و فشار (بعد از تراکم ساچمه) تهیه شده است. نسبت انرژی خروجی محاسبه شده به انرژی ورودی بهرهٔ انرژی ساچمه را تعیین می‌نماید. با استفاده از این روش برای یک نمونه ساچمهٔ حاوی سوخت دوتریم و تریتیم (D-T) که با پرتوهای یون سنگین متراکم می‌شود، بهره‌ای بیش از ۴۰۰ به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: همجوشی، ساچمه، یون سنگین، بهره انرژی، روش لختی، سوخت D-T

۱. مقدمه

همجوشی به روش لختی روش مناسبی برای تولید انرژی مورد نیاز آینده بشر می‌باشد. در این روش مخلوطی از دوتریم-تریتیم (D-T) یا سایر ترکیبات مناسب همجوشی در یک محفظه چند لایه به شکل ساچمه قرار داده می‌شود. ساچمه با استفاده از پرتوهای محرک که از اطراف سطح خارجی آن تابیده می‌شود متراکم می‌گردد. در محصورسازی به روش لختی، از روشهای مختلفی برای تراکم ساچمه استفاده شده است. در هر کدام از این روشها سعی بر آن است که نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی را بالا ببرند. نوع پرتوهای محرک که برای تراکم ساچمه استفاده می‌شود، عامل اصلی بالا و پایین بودن بهرهٔ انرژی در ICF می‌باشد. از پرتوهای لیزر پرانرژی یا باریکه‌هایی از ذرات باردار نظیر یونهای سنگین، یونهای سبک و باریکه‌های الکترونی برای متراکم نمودن ساچمه‌ها می‌توان استفاده کرد. این پرتوهای محرک که به صورت پالسی و با توان بالغ بر 10^{14} w تهیه می‌شوند دارای بهره انتقال انرژی متفاوتی به ساچمه هستند. پرتوهای لیزری و باریکه‌های یون سنگین نسبت به سایر پرتوهای محرک به علت بهره بالاتر جذب انرژی در ساچمه‌ها مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. در طراحی ساچمه‌های سوخت هر دو روش پرتوهای محرک لیزری و باریکه‌های یون

1. Inertial Confinement Fusion

www.SID.ir

Archive of SID

سنگین مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱-۳]. انتخاب پرتوهای یون سنگین به علت قابلیت بالای انتقال انرژی به ساچمه، بالای ۲۵ درصد در مقایسه با باریکه‌های لیزری با بهره انتقال انرژی کمتر از ۱۰ درصد، روشی موفق در بالا بردن بهره انرژی در ICF به شمار می‌رود [۱-۳]. نور لیزر، ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روشی است که طراحان از آن برای تراکم ساچمه استفاده کرده‌اند.

به خاطر ناپایداریهایی که در اثر نایکنواختی و ناهمزمانی باریکه‌های یونی اتفاق می‌افتد، اخیراً از پرتوهای یونی به صورت غیر مستقیم استفاده می‌شود. در این روش از یک کپسول به شعاع ٤ تا ٥ میلیمتر به عنوان محافظ استفاده می‌شود که ساچمه در مرکز این محفظه قرار می‌گیرد. در دو انتهای محفظه تبدیل کننده‌هایی وجود دارد که پرتوهای یون سنگین به آنها برخورد می‌کنند. تبدیل کننده‌ها انرژی دریافتی از یونها را به اشعهٔ X تبدیل می‌کنند. تابش اشعهٔ X، فضای بین محفظه و ساچمه را فرا می‌گیرد. تراکم ساچمه در اثر تابش اشعهٔ X و نیز بخار یونی که از لایهٔ داخلی محفظه و لایهٔ بیرونی ساچمه با تابش اشعهٔ X ایجاد می‌شود حاصل خواهد شد. بهرهٔ انرژی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند که مقدار آن به حدود ۵۰ تا حداکثر ۸۰ خواهد رسید [۳].

پرداختن به بحث پیرامون رفتار کمیتهای ماکروسکپی مانند چگالی و دما در ساچمهٔ متراکم شده، می‌تواند در پیدا کردن راه‌هایی برای بالا بردن بهرهٔ انرژی مؤثر باشد. از طریق حل تحلیلی معادلات هیدرودینامیکی مستقل از زمان می‌توان مقدار چگالی و دما را در طول شعاع ساچمه به هنگام بیشترین تراکم به دست آورد. زمانی که ساچمه به بیشترین تراکم خود می‌رسد مرکز ساچمه مشتعل شده است که باعث می‌شود به ناحیهٔ سوخت سرد از دو طرف فشار وارد شود.

در طول زمانی که اشتعال مرکزی به سمت لایهٔ سوخت سرد حرکت می‌کند معادلات وابسته به زمان باید حل شود. زمانی که ساچمه می‌تواند فشار مرکزی را تحمل کند مدت زمان محصورسازی پلاسما خوانده می‌شود. در این مدت زمان در اثر انجام برهمکنشهای همجوشی انرژی زیادی تولید می‌شود که از طریق نوترونها و الکترونها به بیرون از ساچمه منتقل می‌شود. انرژی جنبشی حاصل از یونها که از همجوشی حاصل می‌شود به خاطر داشتن بار الکتریکی از درون ساچمه کمتر خارج می‌شوند و موجب بالا رفتن دمای سوخت می‌شود. حل عددی معادلات هیدرودینامیکی با استفاده از مدل FCT[1] [۱۰] انجام می‌شود که در بخش ۲ بررسی می‌گردد.

۲. ساختار ساچمه‌های چندلایه

هدف اصلی در طراحی ساچمه‌ها فراهم نمودن شرایط همجوشی سوخت دوتریم-تریتیم (D-T) یا برهمکنشهایی نظیر دوتریم-دوتریم (D-D)، دوتریم-هلیم ($D-^3He$) می‌باشد. انتخاب سوخت و پرتو محرک مناسب عامل اصلی بالا و پایین بودن بهره انرژی در ICF است.

دوتریم-تریتیم (D-T) به لحاظ آستانه انرژی پایین برهمکنش (٤ KeV) در مقایسه با سایر برهمکنشها اهمیت بیشتری دارد.

$$D+T\rightarrow {}^4_2He+n+17.6MeV \qquad (1)$$

سوخت (D-T) به علت سطح مقطع برهمکنش بالاتر سالها مورد توجه بوده است و شرایط فیزیکی لازم برای اشتعال آن نسبت به سایر برهمکنشهای همجوشی آسانتر فراهم می‌گردد [۱و۲].

ساخت ساچمه‌های سوخت به صورت یک یا چند لایه کروی صورت می‌گیرد. طرحهای اولیه ساچمه‌های سوخت D-T برای ICF به صورت یک کره از سوخت خالص D-T یا لایه‌ای کروی از D-T با حفره مرکزی خلا تهیه می‌شد. ساخت این ساچمه‌ها ساده و ارزانتر از ساچمه‌های چند لایه بود ولی انرژی مورد نیاز پرتو محرک جهت متراکم نمودن ساچمه‌ها بسیار بالا بود. علاوه بر آن بعد از تراکم، ساچمه در اثر انفجارهای میکروسکوپی متلاشی می‌شد و لذا آهنگ برهمکنشهای همجوشی بسیار پایین و در نتیجه بهره انرژی ساچمه نیز پایین بود [۱، ۳ و ٤].

در ساخت ساچمه‌های چند لایه، ناحیه مرکزی یک کره گازی شکل دوتریم-تریتیم است که با یک لایه کروی D-T جامد پوشیده می‌شود. ناحیه مرکزی به منظور ایجاد شرایط ساده‌تر اشتعال هنگام متراکم شدن ساچمه تهیه می‌شود تا پس از تراکم در فراهم نمودن شرایط اشتعال بهتر سوخت جامد کمک نماید. این دو ناحیه سوخت با پوشش نازکی از مواد با z بالا نظیر طلا نگهداری می‌شود. این ناحیه که به عنوان هل‌دهنده

1. Flux-Corrected Transport

www.SID.ir

Archive of SID

عمل می‌کند، در اثر پایستگی اندازه حرکت وقتی یک لایه خارجی سنگین با لایه داخلی سبک برخورد می‌کند سرعت متراکم شدن ساچمه را افزایش می‌دهد. این افزایش سرعت تراکم تقریباً با نسبت جرم لایه‌ها متناسب است [۱و٤]. سپس از یک یا دو لایه از عناصر با z پایین نظیر برلیم، لیتیم یا سایر عناصر سبک برای جذب انرژی پرتوهای محرک که از اطراف به سطح خارجی ساچمه تابیده می‌شود استفاده می‌گردد. این ناحیه به عنوان ناحیه جذب کننده می‌تواند کسر بالایی از انرژی یونهای سنگین فرودی را جذب کند. توان توقف لایه جذب کننده بالاست و انرژی باریکه یونی در این ناحیه جذب می‌شود و به طور مؤثری به فشار لازم برای متراکم نمودن ناحیه سوخت تبدیل می‌شود. لایه بیرونی ساچمه از مواد با z بالا نظیر طلا انتخاب می‌شود که به علت توان توقف پایین آن برای یونهای سنگین به صورت یک رسانای انتقال دهنده انرژی یونها به لایه میانی عمل می‌کند. این ناحیه که معمولاً از طلا ساخته می‌شود به علت جرم زیاد آن از متلاشی شدن و پراکندگی سایر مواد داخل ساچمه به اطراف جلوگیری می‌کند [۱و۸].

چگالی مواد در لایه‌های طلا و برلیم یا سایر عناصر جذب کننده باید به گونه‌ای تعیین شوند که پس از رسیدن به انتهای فاز تراکم از ناپایداریهای هیدرودینامیکی که منجر به مخلوط شدن ناحیه سوخت و لایه بیرونی می‌شود جلوگیری نماید. وقتی لبه جلویی باریکه یونی وارد ساچمه می‌شود. لایه‌های بیرونی ساچمه گرم شده و به تدریج به دمای بالایی می‌رسد و پلاسما در مرکز ساچمه تشکیل می‌شود. ضخامت مؤثر لایه‌های بیرونی و میانی ساچمه بر اساس انتقال انرژی یونها به این لایه‌ها تعیین می‌گردد [۱و٦].

با توجه به پدیده‌های فیزیکی گوناگونی که در فرایند متراکم نمودن ساچمه‌ها و پس از اشتعال سوخت رخ می‌دهد بررسی تمام این پدیده‌ها بسیار پیچیده و مشکل است. ترابرد یونهای سنگین در مواد با z بالا بیشتر کلمبی است و برخوردهای هسته‌ای کمتر از ۲ درصد رخ می‌دهد. در مواد با z پایین هر دو نوع برخورد هسته‌ای و کلمبی صورت می‌گیرد و برخوردهای هسته‌ای تا حدود ۵۰ درصد نیز موثر است. برآورد محدوده برخوردهای هسته‌ای یونهای سنگین در این نواحی از رابطه ساده تجربی زیر امکان پذیر است [۱]:

$$F = \exp\left(-\frac{N_a \sigma \rho R}{A}\right) \qquad (۲)$$

F کسری از هسته‌ها که بدون آنکه تحت برخورد هسته‌ای قرار گیرند در محیط حرکت می‌کنند را تعیین می‌کند که در آن N_A عدد آووگادرو، σ سطح مقطع هسته‌ای، A عدد جرمی عناصر محیط و ρR کمیتی است که در ICF به نام برد تعریف می‌شود. R ضخامت نفوذ ذرات در نواحی مختلف ساچمه و ρ چگالی محیط است. بر اساس رابطه ۲ برای $\rho R=۳/۹ gcm^{-۲}$ برای $^{۲۳۸}U^{+}$ با انرژی ۱۰GeV در طلا مقدار F=۰/۹۸ می‌گردد که کسر عدم عدم برخورد هسته‌ای این یون در طلا را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر کسر برخوردهای هسته‌های ۰/۰۲ می‌شود. لذا چون $\rho=۱۹/۵ g/cm^{۳}$ است R=۰/۲cm خواهد بود. این محاسبه برای عناصر سبک ناحیه جذب کننده تا حدود ۳۰ درصد برخورد هسته‌ای را نشان می‌دهد بنابراین اثرات هسته‌ای در لایه طلا ناچیز ولی در لایه میانی موثر است. محاسبات دقیق ترابرد یونهای سنگین در این نواحی نیازمند سطوح مقطع هسته‌ای یونهای سنگین در انرژیهای تا حدود ۱۰GeV در عناصر مختلف است. در چند دهه اخیر که طراحی ساچمه‌ها برای ICF صورت گرفته است ضخامت لایه‌های بیرونی ساچمه بر اساس برآورد از توان توقف یونها در نواحی بیرونی در اثر برخوردهای کلمبی و نتایج تجربی صورت گرفته است [۱، ۲، ٤ و ٥]. باید دقت نمود ضخامت لایه میانی به گونه‌ای باشد که یونها قبل از رسیدن به ناحیه سوخت در لایه جذب کننده متوقف شوند تا از رسیدن آنها به ناحیه پلاسما جلوگیری شود. این باعث گرم شدن بیشتر ناحیه جذب کننده و جلوگیری از برهمکنشهای غیر ضروری یونها با سوخت می‌شود. در این کار روش مورد استفاده در کار باسکو[1] و پریز[2] [۱و٦] به کار رفته است. در بخش ۱،۳ بهینه‌سازی برای تعیین ضخامت و جرم لایه‌های مختلف ساچمه به تفصیل بحث و بررسی شده است. شمای کلی ساچمه با برشی از ساچمه چند لایه در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج محاسبات هیدرودینامیکی در مرکز ساچمه و در ناحیه سوخت سرد بعد از پیشروی اشتعال برای تعیین رفتار چگالی، دما و فشار ناحیه سوخت در بخش ٤ بررسی شده است.

1. Basko

2. Piriz

www.SID.ir

Archive of SID

۳. پرتوهای محرک یونی

متداولترین روشهای متراکم نمودن ساچمه‌ها در همجوشی به روش لختی استفاده از پرتوهای لیزری و یون سنگین است. این باریکه‌ها که به صورت پالسی تهیه می‌شوند باید توان تهیه انرژی مورد نیاز جهت متراکم نمودن یک ساچمه با شعاع چند میلیمتر و محتوی چند میلیگرم سوخت را داشته باشد. برای ساچمه‌های چند لایه مانند شکل ۱ با سوخت چند میلیگرم انرژی مورد نیاز حدود ٦/٢ MJ است که باید در زمان طول پالس حدود چندین نانوثانیه به ساچمه منتقل گردد [۱، ۳ و ٦]. لیزرهای با طول موج کوتاه (حدود ۰/۲ μm) نظیر krf (۰/۲۵μm) برای این منظور مناسب هستند اما مشکل اصلی برای باریکه‌های لیزری بهره پایین انتقال انرژی کمتر از ۱۰ درصد به ساچمه است [۲و۳].

بر خلاف باریکه‌های لیزری یونهای سنگین نظیر اورانیم، بیسموت و سرب دارای بهره انتقال انرژی بالای ۲۵ درصد بوده و به راحتی کانونی می‌شوند. شتاب دهنده‌های یون سنگین، یونها را تا انرژیهای از مرتبه ۱۰GeV شتاب می‌دهند. به علت انرژی بالای یون، جریان باریکه‌های یون سنگین نسبت به یونهای سبک پایینتر است و این موجب آسانتر کانونی شدن آنها روی ساچمه و ترابرد بهتر در محیط ساچمه می‌گردد [۱، ٦،۷ و ۸]. با توجه به شناخت بسیاری از مسایل مربوط به یونهای سنگین پرانرژی استفاده از یونهای سنگین در ICF بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بهره انتقال انرژی بزرگتر از ۲۵٪ و آهنگ تکرار بزرگتر از ۲۰ Hz قابل دسترسی است. انتقال باریکه‌های یونی در فواصل طولانی در ظرف خلا و کانونی شدن با لنزهای مغناطیسی متداول است [۱، ۲، ٦، ۷، ۸ و ۱۳].

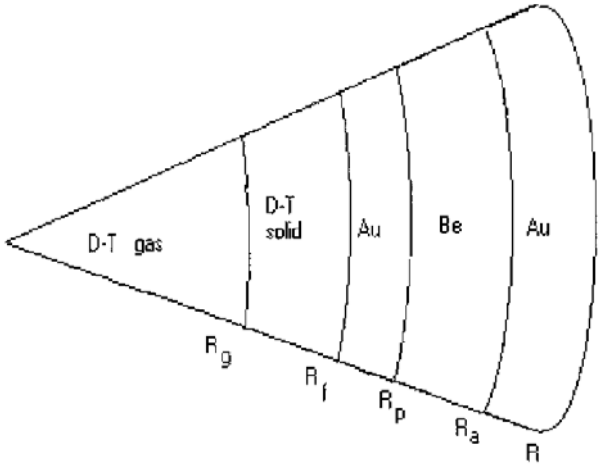
یونهای سنگین نظیر Bi^{+209} و U^{+238} با انرژی ۱۰ GeV برای تهیه انرژی مورد نیاز جهت متراکم نمودن ساچمه شکل ۱ به میزان ٦/٢ MJ با توان $10^{15} w.cm^{-2}$ مناسب‌اند. اگر یک باریکه یونی به شعاع ۲/۵ mm در مدت ۳۰ns یک جریان ۲۰kA را به ساچمه منتقل نماید توان مورد نیاز $10^{15} w.cm^{-2}$ فراهم می‌گردد (جدول ۱).

۱،۳. بهینه سازی ضخامت لایه‌های ساچمه

همان طور که در بخش ۲ اشاره شد یک ساچمه چند لایه مطابق شکل ۱ به وسیله باریکه‌های یون سنگین U^{+238} یا Bi^{+209}

جدول ۱. مشخصات باریکه یون $U^{+1}{}^{238}$

۳ MJ/pulse	انرژی باریکه
۱۰ GeV	انرژی یون U^{+1}
۰/۲gcm^{-2}	برد یون U^{+1} در طلا
٤×۱۰$^{15}U^{+1}$	عده یونها در هر پالس
۳۰-٤۰ ns	طول پالس
۱۰^{15} wcm^{-2}	توان روی ساچمه
۲۰ KA U^{+1}	جریان باریکه در هدف
۲/۵ mm	شعاع باریکه یونی



شکل ۱. برشی از یک ساچمه چند لایه

متراکم می‌گردد. برای متراکم نمودن این ساچمه توان w 10^{15} لازم می‌شود. جدول ۱ مشخصات باریکه‌های یون سنگین مورد نیاز در طراحی ساچمه شکل ۱ را مشخص می‌نماید بنابراین انرژی ورودی E_{in} =٦/٢MJ و طول پالس تابش بر روی ساچمه ۳۰ns است. برای بهینه سازی لایه‌ها، شعاع لبه بیرونی لایه‌های مختلف شکل ۱، یعنی R_g، R_f، R_p، R_a و R که به ترتیب شعاع ناحیه سوخت گاز DT، شعاع بیرونی سوخت جامد DT، شعاع بیرونی لایه هل دهنده (طلا)، شعاع بیرونی ناحیه جذب کننده (برلیم) و شعاع بیرونی ناحیه نگهدارنده (طلا) است را چنان تغییر دادیم تا بیشترین بهره انرژی، G، حاصل شود. این تغییر به معنی تغییر دادن نسبت جرمی لایه‌ها می‌باشد.

چگالی ناحیه سوخت گازی برابر ۰/۰۰۳ g/cm^3، برای سوخت جامد ۰/۲۲۵ g/cm^3، برای جذب کننده برلیم ۱/۹g/cm^3 و برای طلا ۱۹/۵ g/cm^3 می‌باشد. برای تعیین

www.SID.ir

Archive of SID

ضخامت و نسبت جرمی لایه‌ها چند شرط باید در نظر گرفته شود. اول، جرم هر لایه نسبت به لایه داخلی باید بیشتر باشد تا بتواند فشار موثری بر لایه داخلی هنگام تراکم وارد نماید. این موضوع نسبت جرمی موثر لایه‌ها را مشخص می‌نماید. دوم، در ناحیه سوخت باید لایه سوخت جامد به اندازه‌ای از مرکز ساچمه دور باشد که هنگام متراکم شدن فاصله لازم برای طی لایه جامد به سمت مرکز فراهم باشد. این به معنی داشتن نسبت $\Delta R/R_f$ مناسب است. مسئله سوم، رعایت ضخامت نواحی بیرونی برای توان توقف یونهاست و تعیین آن به گونه‌ای که یونها قبل از رسیدن به لایه سوخت در جذب کننده متوقف گردند.

انرژی ۶/۲ MJ که به طور یکنواخت از طریق یونهای سنگین ۱۰ GeV در زمان ۳۰ ns به ساچمه منتقل می‌شود سرعتی از مرتبه 10^7 cm/s به لایه‌های محیط می‌دهد. لذا شعاع بیرونی R باید به گونه‌ای باشد که لبه بیرونی ساچمه بتواند فاصله مورد نیاز برای رسیدن حجم ناحیه سوخت به یک هزارم حجم اولیه را طی کند. این شرط برای تشکیل پلاسما و شروع همجوشی لازم است. ابتدا ضخامت و جرم لایه سوخت DT را تعیین می‌کنیم. ضخامت لایه سوخت با توجه به انرژی و فشار انتقالی از لایه بیرونی باید طوری تعیین شود که در خلال متراکم شدن با توجه به سرعت و فاصله زمانی که در بالا اشاره شد فاصله حدود ۰/۳ cm را بتواند طی کند. لذا لبه داخلی سوخت سرد در R_g=۰/۳۱ cm قرار داده می‌شود. سپس برای آن که جرم سوخت جامد بتواند بهره انرژی مورد نظر G≥۴۰۰ را تامین نماید، تغییر R_f چنان انجام شد که در R_f=۰/۳۴۸cm مقدار مناسب جرم m_{DT}=۱۱/۶mg مشخص گردد. از سوختن کامل ۱ mg از دوتریم-تریتیم جامد ۳۴۰ MJ انرژی تولید می‌شود. با در نظر گرفتن این که زمان بقا ساچمه محدود است و با کاهش چگالی سوخت در اثر همجوشی و اتلاف انرژی کسری از سوخت f_b در تولید انرژی موثر است معمولاً جرمی بالاتر از حد لازم برای سوخت کامل تعیین می‌شود.

روش ساده تخمین کسر سوخت از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۱و۳]

$$f_b = \frac{\rho r}{\rho r + 6/3} \qquad (3)$$

با به کار بردن این رابطه و استفاده از چگالی سوخت و فاصله r که ناحیه سوخت در خلال تراکم طی می‌کند مقدار ρr=۳/۹gcm^{-2} است. بنابراین ۳۸ درصد سوخت در همجوشی شرکت می‌نماید. محاسبه f_b از این رابطه در طراحیهای ساچمه‌ها به کار رفته است ولی این رابطه کسر سوخت را خیلی پایینتر از مقدار واقعی مصرف سوخت نشان می‌دهد [۵،۱و۶]. کسر سوخت در بخش ۶ با استفاده از نتایج حل معادلات هیدرودینامیکی تعیین می‌گردد. دو کمیت مهمی که در بهینه سازی لایه‌های سوخت در نظر گرفته می‌شود نسبت ضخامت لایه سوخت جامد به مجموع ضخامت لایه‌های سوخت، $\Delta R/R_f$ و نسبت جرمی لایه هل دهنده (طلا) به لایه سوخت، $\mu_p = m_p/m_f$، هستند. نتایج تجربی و شبیه سازیهای انجام شده نسبت ضخامت لایه‌های سوخت را بین ۰/۱۴ تا ۰/۰۸ مناسب نشان می‌دهد.

کمیت μ_p باید به گونه‌ای باشد که جرم لایه نازک هل دهنده به اندازه کافی بزرگتر از جرم لایه سوخت باشد تا بتواند فشار و ضربه لازم را برای متراکم نمودن سوخت بر روی این لایه وارد کند. به همین دلیل مقدار μ_p در محدوده ۳ تا ۷ به کار رفته است [۵،۳،۱و۸]. بنابراین با توجه به مقادیر R_g و R_f نسبت لایه سوخت جامد به شعاع کل سوخت برابر $\Delta R/R_f$ =۰/۱۱ می‌گردد. با تعیین مکان R_p=۰/۳۵ cm جرم لایه نازک طلا برابر m_p=۵۹/۷ mg می‌شود و در نتیجه نسبت جرمی μ_p=۵/۱۴ به دست می‌آید. برای تعیین ضخامت و جرم دو ناحیه باقیمانده یعنی جذب کننده برلیم و لایه بیرونی طلا با در نظر گرفتن توان توقف یونهای سنگین در جذب کننده و جلوگیری از ورود یونها به ناحیه سوخت R_a چنان تغییر داده می‌شود که یونها در جذب کننده متوقف گردند. قدرت توقف یونهای سنگین در برلیم ۳/۵ برابر محیط طلاست. حال با رعایت ترتیب سنگینتر بودن لایه بیرونی نسبت به داخلی که برای انتقال فشار به ناحیه‌های داخلی در هنگام تراکم لازم است. لبه بیرونی برلیم R_a=۰/۴cm انتخاب می‌شود که معادل ۱۶۸mg برلیم است. سرانجام برای لایه آخر ساچمه یک پوشش از ماده سنگین طلا برای نگهداری ساچمه و جلوگیری از واپاشی ساچمه بعد از تراکم در نظر گرفته شده است. این لایه باید ضخامت کمی داشته باشد تا یونها از آن عبور کنند و نسبت جرمی لایه به جرم ناحیه جذب کننده نیز باید مناسب باشد. با قرار دادن R=۰/۴۱cm جرم این لایه ۴۰۲mg می‌شود. جدول ۲ مشخصات

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. مشخصات ساچمه

ناحیه	شعاع بیرونی ناحیه mm	چگالی g/cm^3	جرم mg
سوخت گاز D-T	R_g=۳/۱	۰/۰۰۳	۰/۳٤
سوخت جامد D-T	R_f=۳/٤۸	۰/۲۲۵	۱۱/٦
طلا	R_p=۳/۵	۱۹/۵	۵۹/۷
جذب کننده برلیم	R_a=٤	۱/۹	۱٦۸
نگه دارنده طلا	R=٤/۱	۱۹/۵	٤۰۲

پارامترهای ساچمه مورد مطالعه در این طرح را نشان می‌دهد. همان طور که قبلاً اشاره شد طراحی ساچمه‌ها به عوامل زیادی نظیر نوع پرتو محرک و مواد داخل آن بستگی دارد. علاوه بر آن امکان ساخت ساچمه برای کارهای تجربی و تبدیل انرژیهای آزاد نیز حایز اهمیت می‌باشند. به هر حال در بیشتر مطالعاتی که انجام شده است محاسبات بر اساس روشهای تخمین و سنجه یا بررسی هیدرودینامیکی در چند درجه حرارت ثابت بوده است [۱و۳]. در این کار بررسی رفتار هیدرودینامیکی ناحیه سوخت در دو مرحله اشتعال و پیشروی اشتعال برای به دست آوردن برشهای چگالی، دما و فشار مورد توجه می‌باشد که در بخشهای بعدی بررسی می‌شود.

٤. معادلات حاکم بر ساچمه

با حل معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر ساچمه تغییرات چگالی و دما در طول شعاع ساچمه را می‌توان به دست آورد. معادلات پیوستگی، نیرو و انرژی به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = -n_\alpha \nabla\cdot\vec{u}_\alpha \qquad (٤)$$

$$n_\alpha m_\alpha \frac{d\vec{u}_\alpha}{dt} + \nabla\vec{P}_\alpha = 0 \qquad (۵)$$

$$\frac{3}{2} n_\alpha k \frac{dT_\alpha}{dt} + P_\alpha \nabla\cdot\vec{u}_\alpha + \nabla\cdot\vec{h}_\alpha = Q_\alpha \qquad (٦)$$

در اینجا n چگالی سیال، u سرعت سیال، m جرم یونی، P فشار، K ثابت بولتزمن، T دما، h شار حرارتی، Q چشمهٔ انرژی و اندیس α نوع یون را مشخص می‌کند.

۱،٤. حل معادلات هیدرودینامیکی پس از تراکم

برای این که از معادلات هیدرودینامیکی ٤ تا ٦ به راحتی استفاده کنیم، می‌توان آنها را به شکل منظمتری نوشت. یعنی برای معادلات پیوستگی جرمی، نیرو و انرژی به ترتیب داریم:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\nabla\cdot\rho\vec{u} \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial\rho\vec{u}}{\partial t} = -\nabla\cdot(\rho\vec{u}\vec{u}) - \nabla P \qquad (۸)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla\cdot(E\vec{u}) - \nabla\cdot(P\vec{u}) \qquad (۹)$$

از مقایسهٔ معادلات (۷)، (۸) و (۹) ملاحظه می‌شود اگر جملهٔ ∇P در معادلهٔ (۸) و جملهٔ $\nabla\cdot(P\vec{u})$ را از معادلهٔ (۹) کنار بگذاریم سه معادله کاملاً شبیه هم می‌شوند. بنابراین در استفاده از آنها می‌توانیم از یک معادلهٔ کلی به صورت

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\nabla\cdot F + S \qquad (۱۰)$$

استفاده کنیم. S نمایش چشمه یا چاهک است که از معادلات (۸) و (۹) جملهٔ ∇P و $\nabla\cdot(P\vec{u})$ را می‌توان جایگزین آن کرد. F در اینجا به جای هر یک از توابع ρu، ρuu یا Eu جایگزین می‌شود و f برای ρ، ρu و E در نظر گرفته شده است. حال می‌توان محاسبات را برای معادلهٔ (۱۰) بدون چشمه به صورت عددی در یک برنامه محاسبه کرد و سپس با یک زیربرنامه که چشمه را محاسبه می‌کند پاسخ معادلات (۸) و (۹) را به دست آورد.

۲،٤. چارچوب سلولها و حرکت سیال

حرکت یک بعدی سیالی که در آن سیال با سرعت v^f و مرز سلولها با سرعت v^g حرکت می‌کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا $r^n_{i+\frac{1}{2}}$ مکان مرز سلولهای i و i+۱ با یکدیگر است. مکان مرکز سلولها به صورت زیر خواهد بود که در آن n گام زمانی را مشخص می‌کند:

$$r_i^n = \frac{1}{2}\left[r^n_{i+\frac{1}{2}} + r^n_{i-\frac{1}{2}}\right] \qquad (۱۱)$$

بعد از گذشت زمان Δt مکان جدید مرزها به صورت زیر است:

$$r^{n+1}_{i+\frac{1}{2}} = r^n_{i+\frac{1}{2}} + v^g_{i+\frac{1}{2}}\Delta t \qquad (۱۲)$$

سرعت سیال در مرزها برابر است با

$$v^f_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(v^f_{i+1} + v^f_i) \qquad i = 1,2,...,N-1 \qquad (۱۳)$$

که در آن N تعداد سلولهاست.

چنانچه ما شارش خالص سیال را از سلولی به سلول دیگر بخواهیم باید سرعت را به شکل زیر در محاسبات وارد کنیم:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\Delta v_{i+\frac{1}{2}} = v^f_{i+\frac{1}{2}} - v^g_{i+\frac{1}{2}} \qquad i = 1,2,...,N-1 \qquad (14)$$

و نیز سرعت شارش سیال در ابتدا و انتهای محیط به شکل زیر خواهند بود [۱۰]:

$$\Delta v_{\frac{1}{2}} = v^f_{\frac{1}{2}} - \frac{r^{n+1}_{\frac{1}{2}} - r^n_{\frac{1}{2}}}{\Delta t} \qquad (15)$$

$$\Delta v_{N+\frac{1}{2}} = v^f_{N+\frac{1}{2}} - \frac{r^{n+1}_{N+\frac{1}{2}} - r^n_{N+\frac{1}{2}}}{\Delta t} \qquad (16)$$

۳،٤. شکل گسسته سازی شدهٔ معادلهٔ پیوستگی

در اینجا به علت این که هم به سیال و هم به سلولها حرکت نسبت می‌دهیم، شارش ذرات را از یک سلول به سلول دیگر خواهیم داشت. به همین علت باید در معادلهٔ پیوستگی ورود و خروج ذرات را به عنوان چشمه و چاهک لحاظ کنیم. در معادلهٔ پیوستگی جملات چشمه و چاهک را با اضافه کردن سه جمله در سمت راست معادله بیان می‌کنیم. بنابراین از معادلهٔ پیوستگی به شکل زیر استفاده می‌کنیم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{-1}{r^{m-1}} \frac{\partial}{\partial r}(r^{m-1}\rho v) - \frac{1}{r^{m-1}} \frac{\partial}{\partial r}(r^{m-1} S_1) + C \frac{\partial S_2}{\partial r} + S_3 \qquad (17)$$

که در آن S_1، C، S_2 و S_3 ثابت‌اند [۱۰]. معادلهٔ (۱۷) به صورت کلی نوشته شده است که در آن m به ازای اینکه ۱، ۲ یا ۳ باشد شکل هندسی معادله در دستگاه مختصات دکارتی، استوانه‌ای یا کروی خواهد بود. در بررسی ساچمه‌های سوخت شکل ساچمه به صورت لایه‌های کروی هم‌مرکز با توزیع یکنواخت مواد در هر لایه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نماد m=۳ برای حل مسئله با تقارن کروی به کار می‌رود.

$$V^n_i \zeta_i = V^n_i \rho^n_i - \Delta t \rho^n_{i+\frac{1}{2}} A_{i+\frac{1}{2}} \Delta v_{i+\frac{1}{2}} + \Delta t \rho^n_{i-\frac{1}{2}} A_{i-\frac{1}{2}} \Delta v_{i-\frac{1}{2}} \qquad i = 1,2,...,N \qquad (18)$$

در اینجا Vها حجم سلولها و Aها سطح فصل مشترک بین سولها هستند.

با وارد کردن سه جملهٔ چشمه در معادلهٔ پیوستگی خواهیم داشت:

$$V^n_i \eta_i = V^n_i \zeta_i + \frac{1}{2}\Delta t A_{i+\frac{1}{2}} (S_{1,i+1} + S_{1,i})$$

$$-\frac{1}{2}\Delta t A_{i-\frac{1}{2}} (S_{1,i} + S_{1,i-1}) + \frac{1}{4}\Delta t C (A_{i+\frac{1}{2}} + A_{i-\frac{1}{2}})$$

$$\times (S_{2,i+1} - S_{2,i-1}) + \Delta t V^n_i S_{3,i} \qquad i = 2,...,N-1 \qquad (19)$$

با در نظر گرفتن چاهکهای ذرات (خروج ذرات از سلولها) و نیز با لحاظ کردن تغییر حجم سلولها خواهیم داشت:

$$V^{n+1}_{i+\frac{1}{2}} \rho^{n+1}_i = V^n_i \eta_i + \upsilon_{i+\frac{1}{2}} V_{i+\frac{1}{2}} (\rho^n_{i+1} - \rho^n_i)$$

$$-\upsilon_{i-\frac{1}{2}} V_{i-\frac{1}{2}} (\rho^n_i - \rho^n_{i-1}) \qquad i = 1,2,...,N \qquad (20)$$

با

$$V_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(V^{n+1}_{i+1} + V^{n+1}_i) \qquad (21)$$

و υ طوری تعیین می‌شود که معادلات دچار واگرایی نشود یعنی [۱۰]:

$$\upsilon_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3}\varepsilon^2_{i+\frac{1}{2}} \qquad (22)$$

و

$$\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} = A_{i+\frac{1}{2}} \Delta v_{i+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{2}\left[\frac{1}{V^{n+1}_i} + \frac{1}{V^{n+1}_{i+1}}\right] \qquad (23)$$

$$i = 0,1,2,...,N$$

۵. انرژی تولیدی و انرژی از دست رفته در درون ساچمه

در ساچمهٔ متراکم شده انرژی که از ساچمه خارج می‌شود، ناشی از هدایت گرمایی الکترونها و تابش ترمزی می‌باشد در صورتی که دمای ساچمه در این هنگام به بالای ٤KeV برسد همجوشی هسته‌ای D-T آغاز خواهد شد. تولید یونهای هلیوم حاصل از همجوشی باعث گرم شدن پلاسمای داخل ساچمه خواهد شد. هدایت گرمایی الکترونها و تابش ترمزی که در آن دوتریم–تریتیم با نسبتهای مساوی می‌باشند به شکل زیر هستند [۸و۱]:

$$Q_{ec}(t) = -\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 \kappa \frac{\partial T}{\partial r})_{r=0} = \xi_0^2 \frac{\kappa_0 T_0^{n+2}}{R^2} \qquad (24)$$

$$Q_{br} = 5/36 \times 10^{-24}\, n_e (n_D + n_T) T_s^{\frac{1}{2}} =$$

$$3/11 \times 10^{23}\, \rho_s^2 T_s^{\frac{1}{2}} \left[erg.cm^3.s^{-1}\right] \qquad (25)$$

در اینجا $\xi = r/R_0$، κ ضریب هدایت گرمایی، T دما، R شعاع بیرونی سوخت، T_s و ρ_s دما و چگالی در ناحیهٔ اشتعال مرکزی

www.SID.ir

Archive of SID

می‌باشد و n_T، n_D و n_e به ترتیب چگالی تعداد ذرات تریتیم، دوتریم (با نسبتهای مساوی) و الکترونهاست. گرمایش سوخت به وسیلهٔ ذرات آلفا به صورت زیر داده می‌شود:

$$Q_\alpha = \varepsilon_a f_\alpha n_D n_T \langle\sigma v\rangle_{DT} = ۸/۱۸ \times ۱۰^{-۴۰} f_\alpha \rho_s^۲ \langle\sigma v\rangle_{DT} \left[\mathrm{erg.cm^3.s^{-1}}\right] \quad (۲۶)$$

$\in_\alpha$ انرژی هر ذرهٔ آلفاست که به طور متوسط ۳/۵MeV می‌باشد و f_α کسری از ذرات آلفاست که در سوخت باقی می‌مانند در محاسبات انجام شده در این کار فرض می‌شود ذرات آلفا همه انرژی خود را به لایه سوخت منتقل می‌کنند لذا f_α=۱ منظور شده است. ρ_s چگالی در ناحیه اشتعال مرکزی برحسب g/cm^3 و $\langle\sigma v\rangle_{DT}$ بر حسب cm^3/s است [۱، ۷و۸].

همچنین کسری از انرژی نوترونی را هم که در اثر برخورد با اتمهای سوخت متراکم شده (۳۰۰ تا ۵۰۰ گرم بر سانتیمتر مکعب) موجب گرم شدن سوخت در ناحیهٔ با چگالی بالا می‌شود می‌توان لحاظ کرد. رابطهٔ مقدار انرژی نوترونی که جذب لایهٔ سوخت می‌شود به صورت زیر می‌باشد:

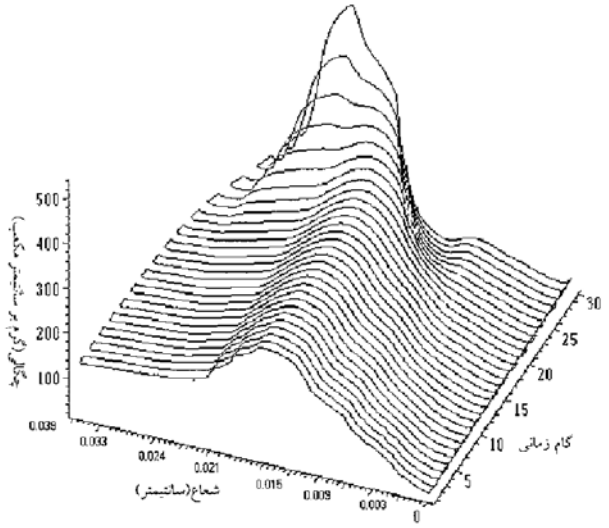
$$Q_n = \varepsilon_n f_n n_D n_T \langle\sigma v\rangle_{DT} \quad (۲۷)$$

در اینجا ε_n=۱۴/۱MeV مقدار انرژی متوسط هر نوترون و f_n کسری از انرژی نوترونهاست که در اثر پراکندگی در سوخت انرژی خود را از دست می‌دهند.

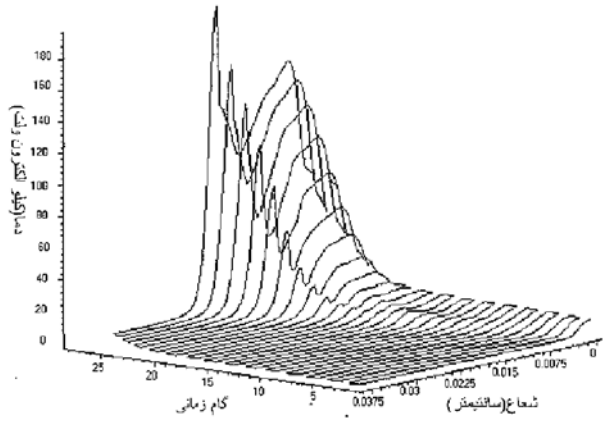
مقادیر $\langle\sigma v\rangle_{DT}$ در انرژیهای مختلف از پرکینز[1] [۱۲] به کار رفته‌اند. مقادیر f_n از مرجع شماره [۱] به کار رفته‌اند. $n_D = n_T = \frac{n}{۲}$ است که n از برنامه محاسباتی بخش ٤ محاسبه شده است. چون محیط سوخت هیدروژنی است برای محاسبه n_e نیز به ازای هر یون یک الکترون در نظر گرفته شده است.

٦. نتایج

پس از اینکه تراکم ساچمه توسط پرتوهای سنگین انجام شد، حجم ساچمه به حدود یک هزارم حالت اولیه خود خواهد رسید. در طی این مرحله از تراکم ساچمه، چگالی سوخت بیش از $۲۰۰ gr/cm^3$ خواهد شد (شکل ۲). مرکز ساچمه که حاوی گاز D-T است در اثر فشاری که از ناحیه سوخت سرد بر آن وارد می‌شود به دمای بالای ۵KeV می‌رسد (شکل ۳).



شکل ۲. تغییرات چگالی در مرحلهٔ اول اشتعال در گامهای زمانی ۵ پیکوثانیه



شکل ۳. تغییرات دما در مرحلهٔ اول اشتعال در گامهای زمانی ۵ پیکوثانیه

با بالا رفتن دما در ناحیه گازی سوخت یک کره داغ ایجاد می‌شود که به طرف ناحیه سوخت سرد پیشروی می‌کند.

۱،٦. پیشروی اشتعال

در شروع اشتعال ابتدا در اثر خورده شدن لایه‌هایی از سوخت سرد اشتعال به سمت سوخت سرد پیشروی می‌کند و سپس در اثر بالا رفتن دما در لایه‌های بیرونی سوخت سرد، اشتعال در تمام نقاط سوخت سرد رخ می‌دهد.

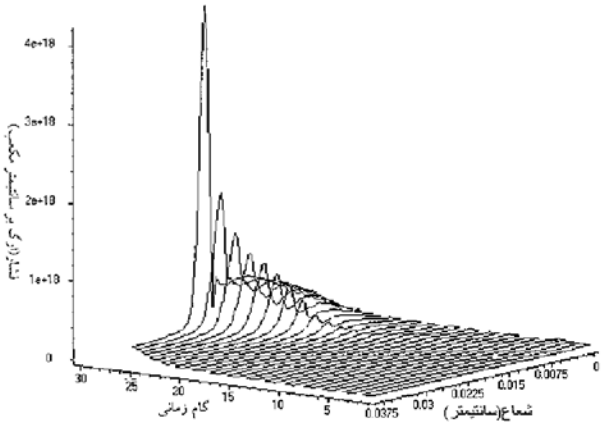
در اینجا اشتعال را در دو مرحله بررسی می‌کنیم که مرحلهٔ اول، پیشروی اشتعال می‌باشد. در این مرحله ناحیهٔ داغی (کرهٔ داغ) در مرکز ساچمه ایجاد می‌شود که یونهای سوخت در اثر برخورد با یکدیگر وارد برهمکنش هسته‌ای می‌شوند. یونهای

1. Perkins

www.SID.ir

Archive of SID

هلیوم فوق گرم که از گداخت یونهای سوخت حاصل می‌شود لایهٔ سوخت سرد مجاور با کرهٔ داغ را گرم می‌کنند تا اینکه این لایه به کرهٔ داغ اضافه می‌شود. هدایت گرمایی الکترونها و تابش ترمزی کرهٔ داغ نیز به این امر کمک می‌کند. نوترونهای سریع می‌توانند وارد لایه‌های بیرونیتر سوخت سرد شوند و در اثر پراکندگی با یونهای سوخت، این ناحیه از سوخت سرد را گرم کنند. تابش ترمزی در این لایه‌ها باعث می‌شود که دما در لایه‌های بیرونی سوخت سرد به کندی بالا رود. در این مرحله از سوختن سوخت با بالا رفتن دما در کرهٔ داغ، فشار نیز بالا می‌رود که موجب انبساط سلولهای این ناحیه از سوخت می‌شود. افزایش فشار در ناحیه کره داغ سلولهای این ناحیه را منبسط می‌نماید و در نتیجه سلولهای سوخت سرد متراکم می‌شوند (شکل ٤). انبساط حاصل از افزایش فشار ناحیه مرکزی منجر به چگالتر شدن ناحیه سوخت سرد می‌شود. لایه طلای متراکم که در لبه بیرونی سوخت سرد قرار گرفته است به علت جرم زیاد خود از حرکت سوخت به طرف بیرون جلوگیری می‌کند. بالا رفتن چگالی و دما موجب افزایش درصد اشتعال سوخت می‌گردد. در شکلهای ۲، ۳ و ٤ نمودار تغییرات چگالی، دما و فشار در این مرحله با استفاده از برنامهٔ رایانه‌ای به دست آمده است. شکل ۲ تغییرات چگالی سوخت در ناحیه D-T گازی و در ناحیه سوخت سرد را نشان می‌دهد. شعاع ناحیه مرکزی بعد از تراکم به ۰/۰۳۱cm می‌رسد و چگالی D-T در این مرحله بعد از چند پیکوثانیه از $۲۰۰g/cm^۳$ گذشته و با گذشت زمان به تدریج افزایش می‌یابد تا در ۱۵۰ پیکوثانیه در بعضی نواحی سوخت سرد از $۶۰۰g/cm^۳$ تجاوز می‌نماید. شکل ۳ تغییرات دما در مرحله اول اشتعال را نشان می‌دهد درجه حرارت ناحیه مرکزی در زمانهای اولیه به ۵ KeV می‌رسد و در مدت ٦۰ ثانیه به حدود ۲۰ KeV می‌رسد سپس تغییرات سریع دما تا پایان این مرحله یعنی بعد از ۱۵۰ps به ۱۰۰KeV در مرکز ساچمه می‌رسد. شکل ٤ تغییرات فشار ناحیه مرکزی را برحسب زمان به وضوح نشان می‌دهد. در گامهای اولیه زمانی تغییر محسوسی در فشار ناحیه مرکزی و ناحیه سوخت سرد مشاهده نمی‌شود. ولی بعد از گذشت حدود ٦۰ پیکوثانیه فشار در ناحیه مرکزی به شدت افزایش می‌یابد و این باعث تراکم ناحیه سوخت سرد و افزایش فشار این ناحیه می‌گردد.



شکل ٤. تغییرات فشار در مرحله اول اشتعال در گامهای زمانی ۵ پیکو ثانیه

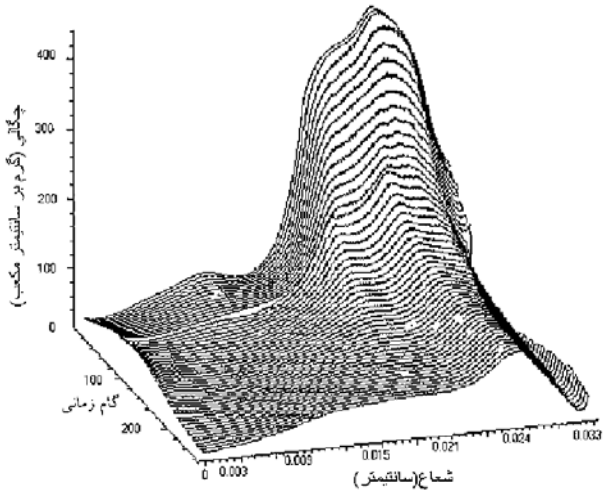
۲،٦. مرحلهٔ پایانی اشتعال

همان طور که در بالا اشاره شد در اثر ترابرد نوترونهای حاصل از گداخت در لایه‌های بیرونی سوخت سرد این لایه‌ها گرم می‌شوند. مرحلهٔ دوم وقتی شروع می‌شود که گرمایش ناشی از نوترونها در سوخت سرد دما را در بخش بزرگی از سوخت سرد از مرز دمای اشتعال بالاتر ببرد. در این مرحله به سرعت دما در تمام نقاط سوخت افزایش می‌یابد و باعث افزایش تعداد برهمکنشها، مخصوصاً در سلولهای چگالتر می‌شود. در فاصلهٔ زمانی ۱۰Ps از این مرحله بیش از نیمی از سوخت مشتعل می‌شود. با کاهش چگالی، تعداد برهمکنشها نیز کاهش می‌یابد که با وجود هدایت گرمایی شدید توسط نوترونها، الکترونها و تابش ترمزی به بیرون از سوخت دما به سرعت کاهش می‌یابد.

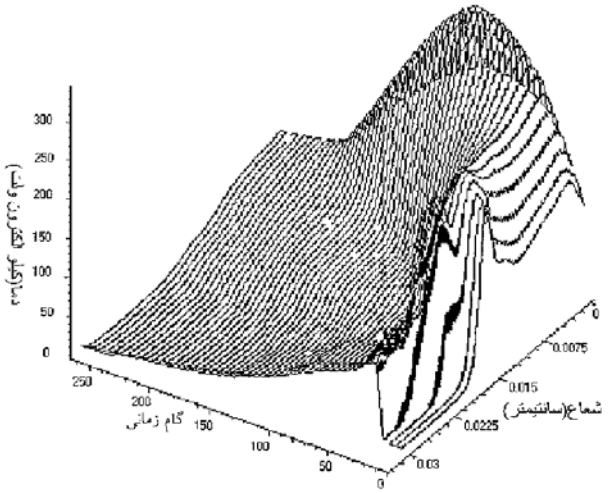
شکلهای ۵، ٦ و ۷ تغییرات چگالی، دما و فشار را در مرحلهٔ دوم سوختن سوخت نشان می‌دهند. شکل ۵ تغییرات چگالی ناحیه سوخت را در مرحله دوم اشتعال که با پیشروی اشتعال ناحیه مرکزی در سوخت سرد صورت می‌گیرد نشان می‌دهد چگالی ناحیه سوخت سرد در مدت کمتر از ۱۰ پیکوثانیه بعد از پایان مرحله اول از بالای $٤۰۰g/cm^۳$ و در اثر انجام برهمکنشهای همجوشی کاهش یافته و آهنگ کاهش بعد از ۱۰ پیکوثانیه به حدود $۵۰ g/cm^۳$ می‌رسد. شکل ٦ تغییرات دما در مرحله دوم را در ناحیه مرکزی و سوخت سرد که در این مرحله مشتعل شده است نشان می‌دهد. دما در این مرحله در نواحی سوخت سرد نیز به سرعت افزایش می‌یابد و بعد از ۲۵ پیکوثانیه به پایینترین مقدار خود می‌رسد که پایان مرحله دوم

www.SID.ir

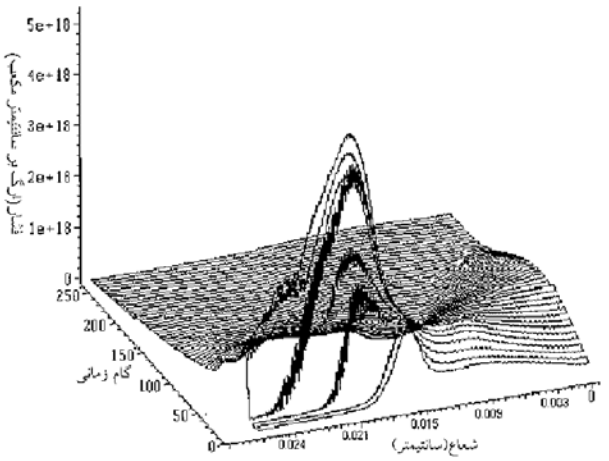
Archive of SID



شکل ۵. تغییرات چگالی در مرحلهٔ دوم اشتعال در گامهای زمانی ۰/۱ پیکوثانیه



شکل ٦. تغییرات دما در مرحلهٔ دوم اشتعال در گامهای زمانی ۰/۱ پیکوثانیه



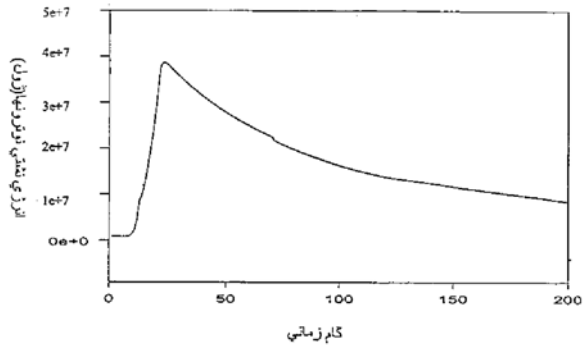
شکل ۷. تغییرات فشار در مرحلهٔ دوم اشتعال سوخت در گامهای زمانی ۰/۱ پیکوثانیه

است. شکل ۷ تغییرات فشار در این مرحله را نشان می‌دهد که در ابتدای مرحله اشتعال دارای قله‌ای در حد فاصل ناحیه مرکزی و سوخت سرد می‌باشد. در پایان این مرحله ٦٥ درصد از سوخت مشتعل می‌شود.

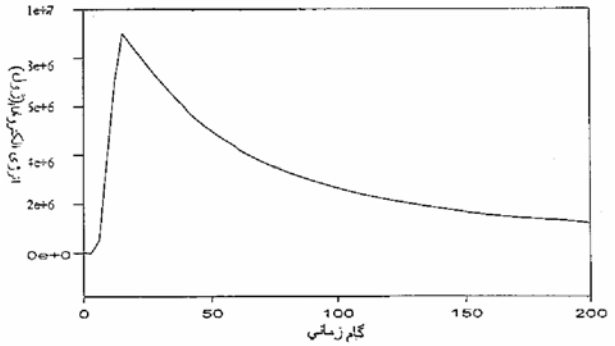
۳،٦. بهرهٔ انرژی

میزان انرژی که در مرحلهٔ دوم اشتعال از ساچمه بیرون می‌آید بر انرژی پرتوهای محرک، بهرهٔ ساچمه را تعیین می‌کند. در شکلهای ۸، ۹ و ۱۰ سهم انرژی نوترونها، الکترونها و تابش ترمزی در مرحلهٔ دوم اشتعال در مدت زمان ۲۰ پیکوثانیه در تمام سوخت سرد آمده است. انرژی پرتوهای محرک در اینجا ٦/۲MJ می‌باشد که در مقابل انرژی دریافتی ۲/٥٦GJ است. این مقدار انرژی از ساچمه‌ای با جرم سوخت ۱۱/٦ mg می‌باشد که بهرهٔ آن ٤۱۳ خواهد بود.

همان گونه که در بخش ۱،۳ بحث شد طراحی ساچمه‌ها در اغلب تحقیقات تجربی و نظری بر اساس بعضی روشهای محاسباتی تخمین یا سنجه پروفیلهای چگالی و دما انجام می‌شود [۱-۳]. بعضی دیگر این محاسبات را برای تعیین



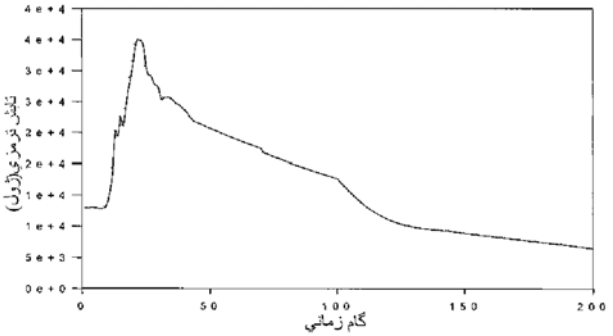
شکل ۸ انرژی نشتی حاصل از نوترونها در گامهای زمانی ۰/۱ پیکوثانیه



شکل ۹. نمودار انرژی الکترونهای گسیل شده از سوخت در گامهای زمانی ۰/۱ پیکوثانیه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰. نمودار تابش ترمزی در گامهای زمانی ۰/۱ پیکوثانیه

برشهای چگالی در چند دمای ثابت به دست آورده‌اند [۵،۱و۶]. در این طرح بر اساس بحث بخش ٤ برشهای واقعی چگالی، دما و فشار محاسبه شده است. بهره انرژی محاسبه شده بر اساس نتایج معادلات هیدرودینامیکی سهم سوخت مصرفی را دقیقتر به دست می‌دهد نسبت به محاسبه از رابطه تقریبی ۳ که در بخش ۱،۳ مطرح گردید. در واقع رابطه (۳) کسر سوخت مصرفی را بسیار پایینتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد تا حدود ۵۰ درصد. این مسئله در کار باسکو و پریز [۱و۵] نیز مورد توجه قرار گرفته است. کارهای تجربی نیز این موضوع را تایید می‌کند [۲و۳]. گرچه محاسبات برشهای چگالی و دما و فشار در کار این پژوهشگران بر اساس تقریبهای خاص و با استفاده از روش سنجه کمیتهاست ولی سهم کسر سوخت، f_b، با نتایج کار حاضر نزدیکتر است و اختلافی کمتر از ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. این اختلاف ناشی از روش مورد استفاده است که برشهای واقعیتری از چگالی، دما و فشار را به دست داده است. چون ساچمه طراحی شده در این کار کاملاً شبیه سایر کارهای انجام شده نیست مقایسه نسبی صورت گرفته است. با توجه به وجود پدیده‌های متفاوت و پیچیده در بررسی رفتار ساچمه‌ها در این کار تنها به دست آوردن پاسخ معادلات هیدرودینامیکی مورد توجه قرار گرفت. برای ترابرد ذرات حاصل از همجوشی در ناحیه سوخت و لایه‌های بیرونی لازم است معادله ترابرد بررسی شود. موضوع اخیر در حال انجام است که در کار دیگری نتایج آن ارایه خواهد شد.

مراجع

1. M M Basko, "High gain D-T targets for heavy ion beam fusion", *Nuclear Fusion*, **32**, 9 (1992).
2. S Nakai, et al., "Inertial Confinement", *Nuclear Fusion*, **30**, 9 (1990), 1779-1797.
3. S Nakai, et al., "Inertial Confinement", *Nuclear Fusion*, **30**, 9(1990), 1863-1878.
4. T Honda etal., "Burn characteristics of inertially confined D-^{3}He fuel", *Nuclear Fusion*, **32**, 9(1992), 1515-1529.
5. V Nakao, etal. "Effects of Nuclear elastic scattering on energetic ion transport in hot dense plasma", *Nuclear Fusion*, **30**, 1(1990), 143-155.
6. A R Piriz and J G Wouchuk, "Energy gain of spherical shell targets in inertial confinement fusion", *Nuclear Fusion*, **32**, 6(1992), 933-943.
7. A R Piriz, J K, Wouchuk, "Energy gain and performance of ablatively driven shell targets *Nuclear Fusion*, **34**, 2, (1994).
8. M M Basko, "On the scaling of the energy gain of ICF targets", *Nuclear Fusion,* **35**, 1(1995).
9. J P Goedbloed, "Derivation of the MHD equations", *Transaction of fusion technology*, **33**, Mar. (1998).
10. P Boris, et al, "LCPFCT_A Fluid-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continutiy Equation", *Naval Research Laboratory,* Report-7192 April 16, (1993).
11. M M Basko, "A6-MJ P4 Target for heavy ion inertial fusion", *Nuclear Fusion* (1999).
12. S T Perkins and Cullen D E "Experimental and evaluated nuclear plus interference Cross section for light charged partilces", Report UCRL –50400 **15**, Pt. F Lawrence Livemore Laboratory, CA (1980).
۱۳. پروازیان، اکبر "انتقال انرژی یونهای سنگین در هدفهای دوتریم-تریتیم" گزارش طرح تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۰).

www.SID.ir