

ملزومات بهره انرژی در همجوشی محصور سازی لختی به روش اشتعال سریع با راه اندازی مستقیم

موسوی، محدثه - قاسمی زاد، عباس*

دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

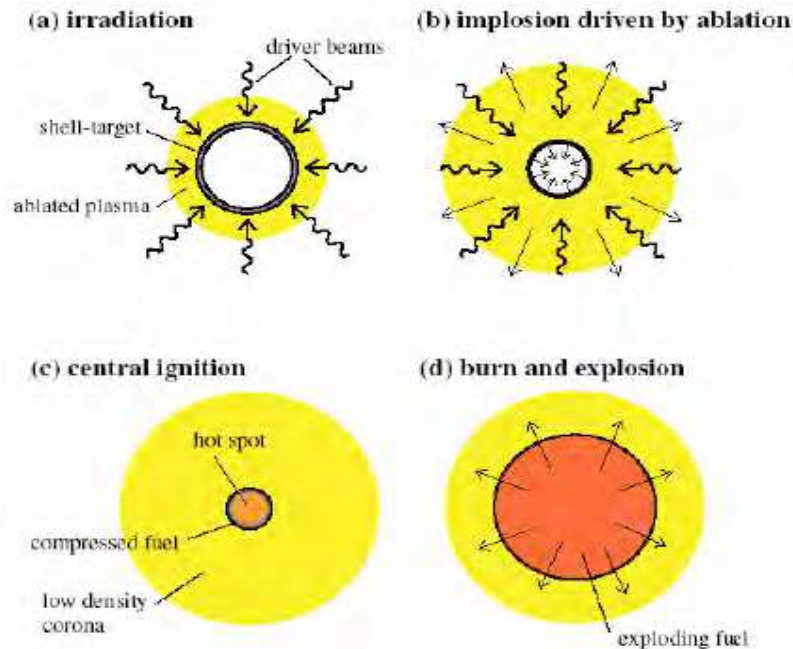
در ICF سوخت محصور شده باید به یک دما و فشار بالا دست یابد تا واکنش های گرما هسته ای روی دهد. اما باید در نظر داشت که انرژی کل آزاد شده توسط واکنش های همجوشی هسته ای می بایست خیلی بیشتر از انرژی راه اندازی مورد نیاز برای تراکم سوخت باشد. تپش های لیزر و ویژگی های هدف ها بر طبق طراحی روی هم گذاری بهینه اشتعال سریع انتخاب می گردد، تا بتوان به روی هم گذاری سوخت با ناحیه داغ کوچک، چگالی های بالا و چگالی های ناحیه ای مناسب برای اشتعال سریع، دست یافت. در این پژوهش وابستگی بهره انرژی را به انرژی لیزر تراکم و طول موج این باریکه مورد بررسی قرار می دهیم

کلمات کلیدی: (*Inertial Confinement Fusion, Compression Pulse, Target Characteristic*)
(areal density)

مقدمه :

یکی از روش های مطرح در فرآیند همجوشی هسته ای، روش محصورسازی لختی است. در این روش ساچمه سوخت حاوی دوتریم - تریتیم (سوخت) در شعاع چند میلیمتر، توسط پرتوهای محرک متراکم می گردد و این عمل موجب چگال شدن سوخت و بالا رفتن دمای سوخت تا ۱۰ keV می شود. در چنین دمایی اتم های سوخت یونیده می شود و به صورت پلازما در می آید. در اثر تراکم، چگالی سوخت حدود ۱۰۰۰-۵۰۰ برابر سوخت جامد می شود که موجب بالا رفتن آهنگ بر هم کنش همجوشی هسته ای D-T می گردد.

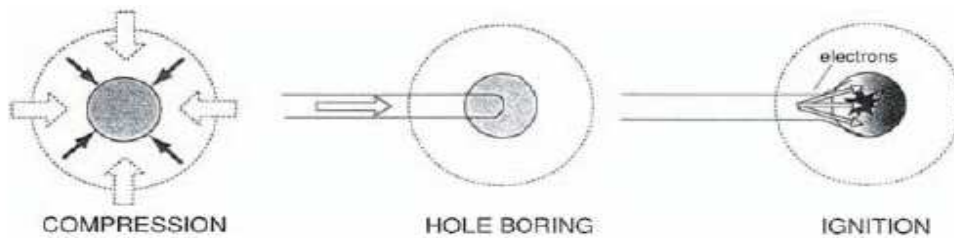
فشار ناشی از این بر هم کنش سبب فروریزی ساچمه سوخت می شود. این موج فشار تقریباً با سرعت امواج مکانیکی (امواج صوتی) در محیط ساچمه سوخت منتشر می شود که این امر باعث محدود شدن زمان محصور سازی تا مرتبه نانو ثانیه می شود. در این مدت تقریباً ۶۰-۳۰ درصد سوخت مصرف می شود [۱ و ۲].



شکل شماره (۱): مراحل فرآیند همجوشی: (a) تابش لیزر به ساچمه سوخت سوخت، (b)

ایده ۱

تراکم سوخت، (c) ایجاد ناحیه داغ مرکزی، (d) سوختن و فروپاشی ساچمه سوخت [۳]
 اشتعال سریع روسی در سمبوسی محصور ساری صبی است. در این ایده، ساچمه سوخت از اعراض توسط پرتوهای محرک لیزر یا یون سبک و سنگین پرتودهی می شود. پرتوهای محرک انرژی خود را در لایه جذب کننده سوخت به جا می گذارد، که باعث گرم و منبسط شدن این لایه می شود. از آن جایی که این عمل خیلی سریع انجام می شود نیروی واکنشی ناشی از کنده شدن ذرات از سطح، ساچمه سوخت را به سمت درون متراکم می کند، به طوری که سوخت درون ساچمه به چگالی ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد (چگالی عادی) می رسد که این، مرحله تراکم ساچمه سوخت است. همزمان با برخورد باریکه با سطح ساچمه سوخت، بر اثر برهمکنش پرتوی محرک با اتم ها و مولکول های این لایه، الکترون ها یا پروتون هایی، بر حسب جنس سطح، با انرژی زیادی آزاد می شود. این باریکه ذرات به سمت درون ساچمه سوخت انتشار می یابد که با نهشت انرژی خود در سوخت، باعث گرم شدن آن و رسیدن سوخت به دمای اشتعال می گردد و واکنش های همجوشی هسته ای در درون ساچمه سوخت انجام می گیرد که این، مرحله اشتعال است. پس از آن، ساچمه سوخت منفجر شده و انرژی آزاد می شود.



شکل شماره (۲): مراحل انجام اشتعال سریع [۴]

مفاهیم اساسی در بررسی بهره انرژی در روش اشتعال سریع:

پارامتر ρR

گاهی استفاده از پارامترهایی که به آسانی قابل فهم و تشخیص هستند، برای نشان دادن وابستگی یک سیستم خاص، یا فرآیند ویژه ای، بسیار مناسب می باشد. معیار لاوسون^۱ نوعی فرمول بندی است که به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته و توازن انرژی را برای سیستم های همجوشی فراهم می سازد. هر سیستم تولید انرژی، یک انرژی ورودی و یک انرژی خروجی دارد، که بهره انرژی نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی است. و هدف در هر سیستم تولید انرژی داشتن بهره مثبت می باشد.

می خواهیم معیار لاوسون را با توجه به ویژگی های موجود در فرآیند همجوشی محصورسازی لختی تغییر داده و به پارامتر مفیدی دست یابیم که پارامتر محصورسازی یا پارامتر ρR نامیده می شود. به عبارتی این کمیت، یک چگالی ناحیه ای^۲ است. برای این منظور یک ساچمه سوخت کروی را در نظر می گیریم که توسط باریکه لیزری و یا یونی مورد تابش قرار می گیرد و متعاقب آن یک موج فشار متقارن کروی که به طرف مرکز همگرا است، ایجاد می شود.

$$\rho_b R_b > \frac{2m_i}{\langle \sigma v \rangle_{DT}} v_d \left(\frac{f_b}{1-f_b} \right)$$

که در آن v_d ، معرف سرعتی است که جرم قلب به سوی بیرون حرکت می کند و کسر مصرف سوخت^۳ m_i و f_b جرم یک یون است.

این رابطه شرط بین چگالی سوخت و شعاع آن را در زمان آغاز سوختن، برای یک کسر سوختن مشخص، نشان می دهد. بدیهی است برای این که فرآیند همجوشی محصورسازی لختی در یک سیستم تولید انرژی همجوشی بصورت پایا ایجاد شود، باید شرط رابطه ی (۱) برقرار باشد.

¹ Lawson criterion

² Areal density

³ Fuel burn fraction



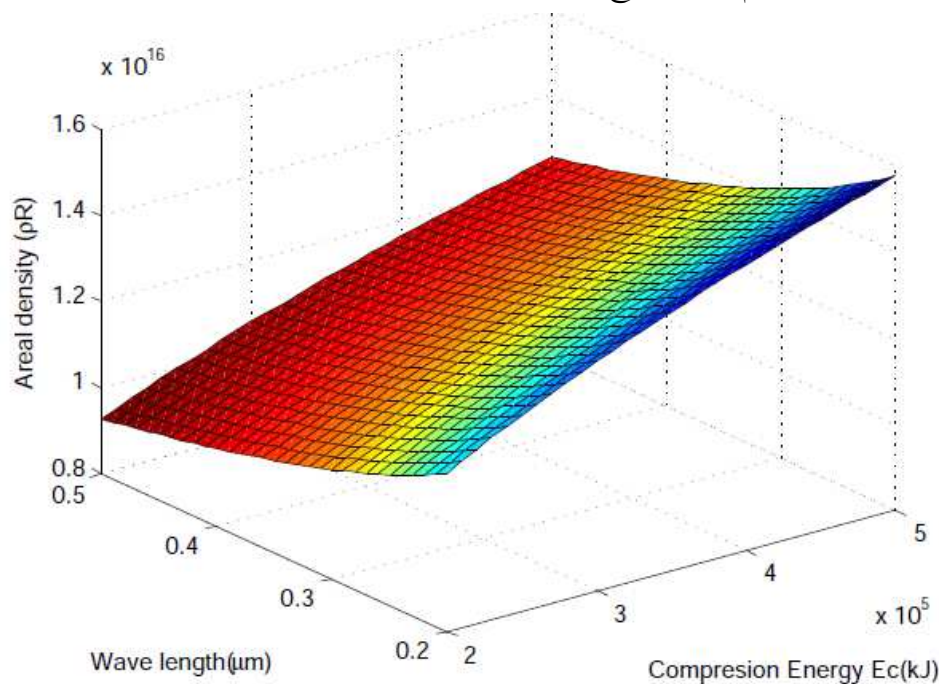
چگالی ناحیه ای را به عنوان بیشینه مقدار $\int_0^{\infty} \rho dr$ در طول انفجار داخلی در نظر می‌گیریم. وابستگی چگالی ناحیه به زمان را به صورت زیر داریم:

$$\rho r_h(t) = \int_0^{R_h} \rho dr = \frac{M_h(t)}{R_h(t)^2}$$

از معادلات شعاع ناحیه داغ^۱ و فشار در شروع مرحله کاهش سرعت، رابطه جرم ناحیه داغ M_h بر حسب جرم پوسته سرد M_s در آغاز مرحله کاهش سرعت بدست می‌آید. در پایان می‌توان رابطه چگالی ناحیه را بر حسب ویژگی‌های اولیه بدست آورد:

$$(\rho R)_{\max} \approx \frac{1.2}{(\alpha_{if}^{\min})^{0.54}} I_{15}^{0.25} \left(\frac{E_c}{100} \right)^{0.33} \left(\frac{0.35}{\lambda_L} \right)^{0.25}$$

در این رابطه λ_L و I طول موج و شدت باریکه لیزر تراکم و E_c انرژی تراکم هدف است. پارامتر α_{if}^{\min} ایزنوتروپ کمینه است که با توجه به امکانات عملی قرار داده می‌شود. شکل (۳) نشانگر وابستگی پارامتر محصورسازی به انرژی تراکم و طول موج لیزر است.



شکل شماره (۳): تغییرات چگالی ناحیه ای بر حسب انرژی تراکم و طول موج لیزر

بهره انرژی

$$M = \frac{E_{fusion}}{E_{d-target}}$$

مهمترین تعریف بهره انرژی هدف، به صورت زیر است:

¹ Hot spot



که نسبت انرژی E_{fusion} حاصل از تولیدات همجوشی به انرژی $E_{d-target}$ که به هدف می رسد، است. دستیابی به حالت $M = 1$ در هدف، برنامه ی مورد بررسی در همجوشی است.

می دانیم که تنها کسری از انرژی لیزر به هدف می رسد و می تواند برای فراهم آوردن شرایط در مساحت ناحیه ی داغ، به انرژی تبدیل شود. بازده انتقال انرژی به صورت بازده جفت شدگی η_D و با رابطه زیر

$$\eta_D = \frac{E_{DT}}{E_{d-target}}$$

تعریف می گردد.

$$G = \frac{E_{fusion}}{E_{DT}}$$

که E_{DT} انرژی سوخت است. بنابراین بهره سوخت به صورت زیر خواهد بود:

برای دستیابی به رابطه ای مناسب که تمامی کمیت ها تاثیر گذار را مقدار بهره انرژی را نشان دهد، می بایست از توازن انرژی استفاده کرد. به این ترتیب که تمامی انرژی های ورودی و خروجی در فرایند تولید انرژی از طریق همجوشی را مورد کاوش قرار دهیم و با جمع بندی تمامی این شرایط امکان بررسی بهره انرژی را به درستی بدست آوریم.

اولین انرژی ورودی توسط باریکه ی تراکم فراهم می گردد و دیگری مربوط به انرژی ذرات آلفا و نوترونی است که در نتیجه واکنش همجوشی که در آستانه فرایند رخ می دهد. این ذرات محصول همجوشی دوتریوم و تریتیوم در مرکز ساچمه ی سوخت است و سبب گرمایش تمامی سوخت می گردد. انرژی های تلف شده در ساچمه سوخت نیز شامل تابش و هدایت گرمایی می شود. باید در توجه کرد که برای بررسی بهتر در هریک از این موارد برای حذف عامل زمان، توازن توان را مورد مطالعه قرار می دهیم. مدل توازن توان ناحیه داغ که توسط Lindl استنتاج گردید [۵].

توصیف مسئله و نتایج :

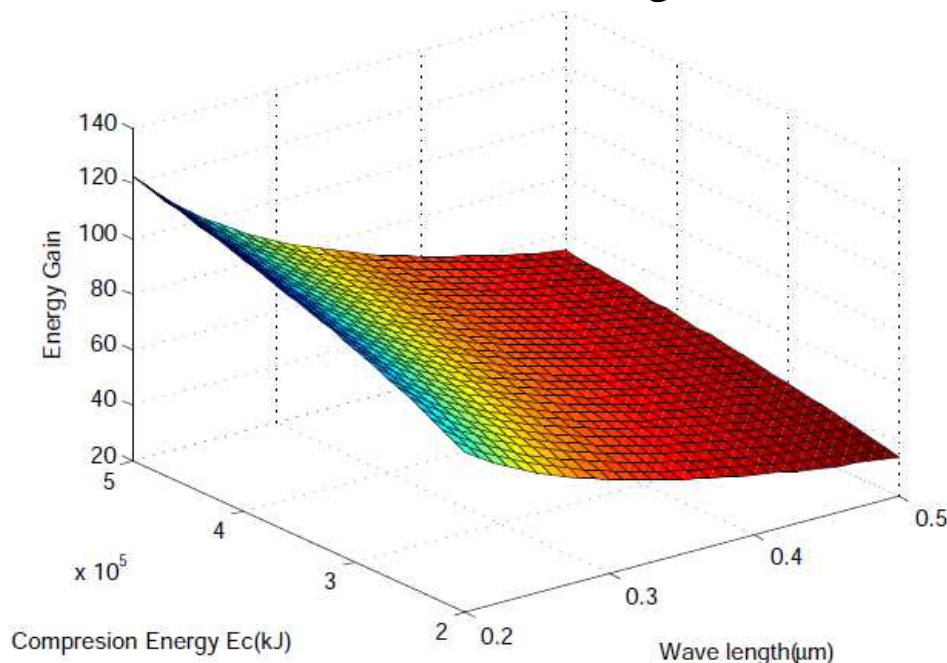
با نظر به توضیحاتی که پیرامون روش اشتعال سریع ذکر آن رفت، انرژی اشتعال از طریق باریکه ای جداگانه تامین می گردد و به این ترتیب می بایست در رابطه ی توازن توان این انرژی را نیز به انرژی های ورودی به ساچمه ی سوخت افزود. این انرژی در راه اندازه مستقیم اشتعال سریع می تواند توسط ذرات شتابدار پروتون یا یون، الکترون هاس سریع، باریکه پرتوی ایکس و لیزر تامین گردد. این باریکه را در این بررسی، ایده آل در نظر می گیریم و به عنوان مثال واگرایی باریکه الکترونی در مسیر رسیدن به قلب ساچمه ی سوخت و یا سایر ناپایداری ها، نادیده می پنداریم. پس از این می توان با اعمال پاره ای تصحیحات، شرایط ایده آل را به شرایط آزمایشگاهی نزدیک ساخت و به این ترتیب شبیه سازی به بهره برداری عملی نزدیک تر خواهد شد و می توان کاوشی همه جانبه به عمل آورد.

موضوع حائز اهمیت دیگری که باید در نظر داشته باشیم، وابستگی طراحی هدف به انرژی تراکم برای دستیابی به روی هم گذاری بهینه سوخت است. به این معنا که بسته به ساختار و ابعاد هدف به مقدار انرژی متفاوت برای تراکم بهینه نیاز داریم. انرژی تراکم سرعت انفجار داخلی را تعیین می کند، بنابراین عوامل موثر در انرژی داخلی طول موج و شدت پرتوی تراکم و چگالی بهینه و پارامتر آیزتروپ کمینه است. چگالی بهینه را بر اساس پژوهش هایی که پیشتر انجام گرفته است، $300 - 500 \text{ g/cm}^3$ منظور کرد [۶] و

پارامتر ایزنوتروپ کمینه با در نظر گرفتن امکانات عملی $\alpha_{if} \approx 0.7 - 0.8$ می باشد. با در نظر گرفتن شرایطی که ذکر شد رابطه زیر را می توان برای بهره انرژی بیشینه رابطه زیر را بدست آورد [۷]:

$$G_M \approx \frac{743 I_{15}^{-0.09} \left(\frac{0.35}{\lambda_L} \right)^{0.66} \left(1 - \frac{E_{cut}}{E_c} \right)^{1.1}}{1 + 30 \left(\frac{\lambda_L}{0.35} \right)^{0.25} / E_c^{0.33}}$$

که E_c بر حسب kJ و $E_{cut} \approx 40 kJ$ و شدت لیزر را در واحد $10^{15} W / cm^2$ می باشد. با ترسیم منحنی سه بعدی بهره بر حسب انرژی تراکم E_c و طول موج (شکل ۴)، می توان این ارتباط را مشاهده نمود. که با نمودار شبیه سازی منبع [۷] در توافق خوبی است.



شکل شماره (۴): تغییرات بهره انرژی بر حسب انرژی تراکم و طول موج لیزر

مراجع

- [1] Lindi, J.D., Plasma Phys. & Controlled Fusion, Vol.45, pp.A215-A234 (2003).
- [2] A.Parvazian & J. Jafari, Iranian J. Phys. Research, Vol.3, No.2. (2002).
- [3] S.Nakai, K.Mima, Rep. Prog. Phys, 67, 321-349(2004).
- [4] C. Deutsch, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 24, 95-113 (2003).
- [5] S. Pfalzner, "An Introduction to Inertial Confinement Fusion", University of Cologne, Germany, Published by CRC Press (2006).
- [6] M. Moosavi, A. Ghasemizad, " The study of influences of decreased initial of tritium content in fuel capsule in fast ignition concept of inertia confinement fusion", advanced in applied physics and materials science congress, Turkey (2011).
- [7] Chuandong Zhou, " Fuel Assembly for Conventional, Fast and Shock Ignition Direct-Drive Inertial Confinement Fusion", University of Rochester, New York, (2008)