

بررسی پارامترهای فیزیکی مدل‌های هم‌چگالی و هم‌فشار ایده احتراق جرقه مرکزی در همجوشی محصورشدگی لختی

صدیقه پورحسینی، عباس قاسمی زاد*

گروه فیزیک، دانشگاه گیلان

چکیده:

یکی از روشهای همجوشی محصورشدگی لختی به روش تحریک مستقیم، ایده احتراق جرقه مرکزی می باشد. در این ایده، ساچمه سوخت شامل دو ناحیه است. یک ناحیه داغ مرکزی، که دارای دمای بالا و چگالی پائین تحت عنوان لکه داغ و دیگری ناحیه ای در اطراف آن که دارای دمای پائین و چگالی بالا تحت عنوان سوخت سرد یا سوخت اصلی می باشد. ایده احتراق مرکزی بر اساس دو مدل هم فشار و هم چگالی قابل بررسی است. در این مقاله به بررسی انرژی تراکم سوخت سرد، انرژی احتراق و بهره سوخت در مدل هم چگالی و همچنین بهره انرژی در مدل هم فشار پرداخته ایم. **کلیدواژه:** همجوشی محصورشدگی لختی، مدل هم چگالی، مدل هم فشار، انرژی احتراق، بهره سوخت، بهره انرژی

مقدمه:

فرآیند همجوشی محصورشدگی اینرسی (لختی)، به طور کلی به دوروش تحریک مستقیم و غیرمستقیم قابل دستیابی می باشد. در فرآیند همجوشی محصور شدگی لختی به روش تحریک مستقیم، که بر اساس سه ایده احتراق حجمی، احتراق جرقه مرکزی و احتراق سریع قابل انجام است، ساچمه سوخت همجوشی به طور مستقیم تحت تابش یک باریکه یونی و یا یک باریکه لیزری قرار می گیرد و متعاقب آن ذراتی از سطح ساچمه سوخت جدا می گردد. این فرآیند، سبب تولید موج فشاری به سمت داخل ساچمه سوخت و در نتیجه افزایش تراکم و گرما در سوخت همجوشی می شود که در نتیجه آن، شرایط وقوع واکنش همجوشی فراهم شده و پدیده انفجار داخلی در ساچمه سوخت به وقوع می پیوندد. به دنبال ایده احتراق حجمی در فرآیند همجوشی محصورشدگی لختی به روش ایده تحریک مستقیم، برای دستیابی به بهره قلب بالا، ایده دیگری تحت عنوان احتراق جرقه مرکزی (Central spark ignition) مطرح شد [۱]. این ایده بر اساس دو مدل، تحت عناوین هم فشار (Isobaric model) و هم چگالی (Isochoric model) قابل بررسی می باشد.

۱- مدل هم چگالی در ایده احتراق جرقه مرکزی

در این مدل، سوخت را شامل دو ناحیه در نظر می گیریم. یک ناحیه سرد دارای شعاع R_F و چگالی یکنواخت ρ و دیگری ناحیه داغ یا جرقه با شعاع R_S ($R_S \ll R_F$) که ناحیه سرد آنرا در بر گرفته است. در

* Email: ghasemi@guilan.ac.ir

مدل هم چگالی، فرض اساسی این است که چگالی سوخت در دو ناحیه برابر باشد. در این روش، ابتدا توسط یک باریکه لیزر، به طور متقارن سوخت را متراکم می‌کنیم و سپس توسط یک باریکه لیزری با شدت بیشتر، احتراق در ناحیه مرکزی فراهم می‌گردد. متعاقب این عمل، گرمای تولید شده توسط این احتراق به سوخت سرد اطراف ناحیه مرکزی هدایت می‌شود [۲].

شرط اساسی توازن انرژی یک نیروگاه قدرت بر پایه فرآیند همجوشی ساچمه سوخت توسط تحریک لیزری به صورت زیر است [۳]:

$$\varepsilon_{He} f_e \varepsilon_{el} G_p = 1 \quad (1)$$

در عبات فوق، ε_{He} بازدهی تبدیل انرژی گرما هسته ای ایجاد شده توسط واکنش همجوشی به انرژی الکتریکی، f_e کسر توان الکتریکی نهائی تولید شده بواسطه انرژی لیزر فرودی، ε_{el} ضریب بهره ورودی سیستم (ضریب تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی ورودی به محرک) و G_p بهره ساچمه (نسبت انرژی گرما هسته ای تولید شده به انرژی پرتوی جذب شده توسط ساچمه) می باشد. بهره ساچمه (Pellet gain)، G_p را می توان به صورت زیر نوشت [۳]:

$$G_p = \varepsilon_{LF} G_F \quad (2)$$

که ε_{LF} کسری از انرژی باریکه است که برای تراکم سوخت مورد استفاده قرار می گیرد و G_F نیز بهره سوخت (Fuel gain) می باشد. بر این اساس، بهره سوخت سیستم می تواند به صورت زیر نوشته شود [۳]:

$$G_F = \frac{E_F}{E_S + E_C} \quad (3)$$

که در رابطه فوق E_C ، E_S و E_F به ترتیب، انرژی گرما هسته ای نهشت یافته، انرژی استفاده شده برای تراکم سوخت و انرژی که باعث احتراق اولیه شده است، می باشند. اگر q_{DT} انرژی نهشت یافته بر واحد جرم واکنش همجوشی دوتریوم-تریتیوم، f_b کسری از سوخت که مورد استفاده قرار گرفته و M_F جرم کلی سوخت باشد، در این صورت پارامتر E_F می تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$E_F = q_{DT} f_b M_F \quad (4)$$

لازم به ذکر است که $f_b = \frac{H_F}{H_F + H_B}$ و $H_F = \rho R_F$ می باشد. در این رابطه H_F پارامتر محصور

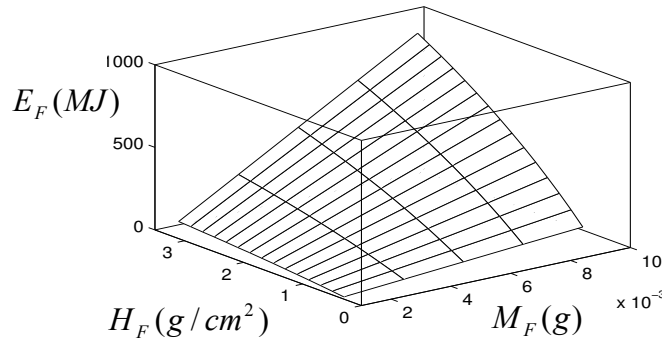
شدگی سوخت می باشد و H_B نیز به صورت $H_B = \frac{8 M_i}{\sigma} \geq 7 \text{ g/cm}^2$ در نظر گرفته می شود

که $\sigma = \frac{\langle \sigma v \rangle_{DT}}{C_S}$ است [۳]. در روابط فوق ρ ، M_i ، $\langle \sigma v \rangle_{DT}$ و C_S به چگالی سوخت، میانگین جرم یونی، پارامتر

سیگما-وی و سرعت صوت در پلاسمای سوخت دوتریوم-تریوم می باشد. با جاگذاری روابط فوق در رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$E_F(MJ) = 3.37 \times 10^5 M_F \frac{H_F}{H_F + 7} \quad (5)$$

در شکل (۱) نمودار تغییرات E_F بر حسب M_F و H_F را رسم و ارائه نموده ایم.



شکل (۱): نمودار تغییرات E_F بر حسب M_F و H_F .

۱-۱- انرژی تراکم سوخت سرد در مدل هم چگالی

انرژی مورد نیاز برای تراکم سوخت سرد، هنگامی که چگالی سوخت، η برابر بیشتر از چگالی هیدروژن مایع است می تواند به صورت زیر نوشته شود [۳]:

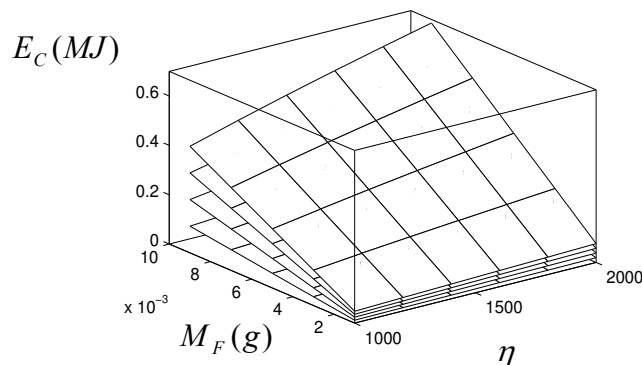
$$E_C(MJ) = 0.12 \alpha \eta^{2/3} M_F \quad (\alpha > 1) \quad (6)$$

در این رابطه α پارامتر آیزنتروپ است که میزان انحراف از تبهگنی کامل سوخت را نشان می دهد، به طوری که در شرایط تبهگنی کامل سوخت، $\alpha = 1$ می باشد. با استفاده از روابط زیر [۳]:

$$\eta^{2/3} = \frac{H_F}{H_0} \quad \text{و} \quad H_0 = \left(\frac{3M_F \rho_0^2}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (7)$$

که ρ_0 چگالی هیدروژن مایع است و با جایگذاری روابط فوق در معادله (۶) خواهیم داشت:

$$E_C(MJ) = \frac{(0.12) \alpha M_F H_F}{\left(3 \rho_0^2 M_F / 4\pi \right)^{1/3}} \quad (8)$$



شکل (۲): نمودار تغییرات E_C بر حسب M_F و η بازای مقادیر مختلف پارامتر آیزنتروپ،

به ترتیب از بالا، ۴، ۳، ۲ و ۱.

در شکل (۲) نمودار تغییرات E_C بر حسب M_F و پارامتر η را رسم نمودیم.

۲-۱- انرژی احتراق و بهره سوخت در مدل هم چگالی

بامعرفی پارامتر f_S بصورت نسبت جرم سوخت در ناحیه داغ مرکزی به جرم کل سوخت می‌توانیم بنویسیم [۳]:

$$f_S = M_S / M_F = (H_S / H_F)^3 \quad (9)$$

اگر M_i میانگین جرم یونی و T_S دمای احتراق در ناحیه داغ مرکزی باشد، برای انرژی احتراق خواهیم داشت [۳]:

$$E_S (MJ) = 3 f_S T_S (M_F / M_i) \quad (10)$$

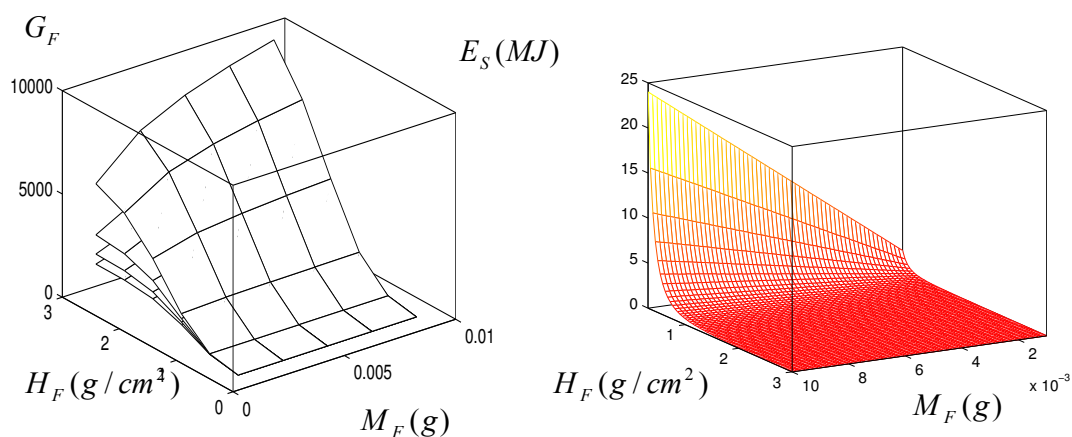
با جایگذاری مقدار $M_i = 4 \times 10^{-24} \text{ g}$ ، $H_S = 0.3 (\text{g/cm}^2)$ ، $T_S = 20 (\text{KeV})$ و رابطه (۹) در رابطه (۱۰) خواهیم داشت:

$$E_S (MJ) = 64.8 (M_F / H_F^3) \quad (11)$$

وابستگی E_S به جرم سوخت و پارامتر H_F از رابطه (۱۱) ملاحظه می‌شود که آنرا در شکل (۳) نشان داده ایم. با جایگذاری معادلات (۱۱)، (۸) و (۵) در رابطه (۳)، رابطه‌ای نیز برای بهره سوخت به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$G_F = \frac{\frac{M_F H_F}{H_F + 7}}{(0.526) \alpha H_F M_F^{2/3} + (64.8) \frac{M_F}{H_F^3}} \quad (12)$$

که در شکل (۴) نمودار بهره سوخت بر حسب پارامترهای H_F و M_F را رسم و ارائه نموده ایم.



شکل (۴): نمودار تغییرات G_F بر حسب M_F و H_F برای مقادیر متفاوت α ، به ترتیب از بالا، ۱، ۲، ۳ و ۴.

شکل (۳): نمودار تغییرات E_S بر حسب M_F و H_F در $T_S = 20 (\text{KeV})$.

۲- مدل هم فشار در ایده احتراق جرقه مرکزی

در سال ۱۹۸۲ میلادی، میر-تر-وهن (Meyer-ter-Vehn) برای بررسی ایده احتراق جرقه مرکزی در همجوشی محصورشدگی لختی، مدل هم فشار (Isobaric model) را در نظر گرفت [۱]. در این مدل، بخشی از سوخت درون یک ناحیه داغ مرکزی با دمای بالا و چگالی پائین قرار گرفته است که اطراف این ناحیه را نیز بخش دیگری از سوخت فراگرفته که دارای دمای پائین و چگالی بالا می باشد. فرآیندهمجوشی در ایده احتراق جرقه مرکزی از ناحیه داغ مرکزی آغاز می شود و تعداد زیادی ذرات آلفا و نوترون تولید می کند. ذرات آلفا، درون ناحیه داغ متوقف شده و انرژی خود را در محیط از دست می دهند و باعث گرم شدن آن تادمای $30-40 \text{ KeV}$ می شوند که این فرآیند، خود-گرمایش نام دارد. متعاقبا ذرات آلفا به لایه بعدی می روند و بنابراین انتشار موج سوخت گرما هسته ای ادامه می یابد. البته توجه داریم که طی واکنش همجوشی، نوترون نیز تولید می شود که به دلیل بی بار بودن، بدون انجام برهم کنش از درون سوخت عبور می کند.

۲-۱- بهره انرژی در مدل هم فشار

فرمول فشار، P_F ، در واحد cgs برای سوخت سرد عبارت است از [۴]:

$$P_F = \alpha P_{FD} = \alpha (2 \times 10^{12}) \rho^{5/3} \quad (13)$$

که α پارامتر آیزنتروپ (فشار سوخت اصلی به فشار فرمی) است.

رابطه برای انرژی تراکم سوخت سرد، ϵ_F ، نیز عبارت است از [۴]:

$$\epsilon_F = \alpha \epsilon_{FD} = \alpha (3 \times 10^5) \rho^{2/3} \quad (J/g) \quad (14)$$

که ϵ_{FD} تحت عنوان انرژی تبهگن فرمی برای چگالی هایی از مرتبه 1000 g/cm^3 برابر $3 \times 10^7 \text{ J/g}$ است که این مقدار قابل مقایسه با خروجی همجوشی یعنی $3 \times 10^{11} \text{ J/g}$ است. با احتراق ناحیه داغ و سپس انتشار موج

سوخت، می توانیم یک بهره ذاتی $\frac{\epsilon_{DT}}{\epsilon_{FD}}$ (انرژی برگرم تولید شده توسط همجوشی دوتریوم-تریتیوم بر

انرژی تبهگن فرمی) از مرتبه 10^4 در کسر مصرف سوخت f_b در بازدهی کلی فرآیند انفجار داخلی،

$\eta_T = \eta_c \eta_H$ ، را انتظار داشته باشیم [۴]. براساس توضیحات فوق می توانیم رابطه بهره انرژی را توسط

پارامتر بازده به صورت زیر استخراج کنیم:

$$G = \frac{\gamma}{E_D} = \frac{f_b \epsilon_{DT} M_F}{\left[\frac{(\epsilon_F M_F)}{\eta_T} \right]} \quad (15)$$

که M_F جرم سوخت و E_D انرژی محرک فرودی می باشد.

بنابراین با استفاده از $\epsilon_{DT} = \frac{17.6 \text{ MeV}}{5 \text{ amu}} = 3.4 \times 10^1 \text{ J/g}$ و رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$G = 10^4 \left[\frac{(\rho/1000)^{-2/3}}{\alpha} \beta_{ap} \right] \eta_c \eta_H f_b \quad (16)$$

که در رابطه فوق، β_{ap} فاکتور عملی بهره است. مقدار این پارامتر را که به طور نوعی ضریبی از ۲ در نظر می‌گیریم به دلیل تفاوت در محاسبات تئوری و کارهای تجربی ظاهر می‌شود. در واقع مشاهده شده که در عمل برای فشردن سوخت به انرژی دو برابر مقدار محاسبه شده نیاز داریم [۵].

بحث و نتیجه گیری

با بررسی پارامترهای فیزیکی در مدل هم‌چگالی ایده احتراق جرقه مرکزی، دریافتیم که انرژی گرما هسته‌ای نهشت یافته در ساچمه سوخت، با افزایش جرم کلی سوخت و پارامتر محصورشدگی سوخت، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در مقادیر ثابت M_F ، افزایش پارامتر H_F باعث افزایش E_F می‌گردد و علاوه بر این در مقادیر ثابت H_F ، با افزایش جرم سوخت اولیه در ساچمه سوخت، E_F افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان عنوان نمود که ساچمه‌های سوخت با ابعاد بزرگتر و با جرم سوخت اولیه بیشتر، منجر به ایجاد انرژی گرما هسته‌ای بیشتری می‌شوند. با به دست آوردن رابطه‌ای برای محاسبه انرژی تراکم سوخت سرد در مدل هم‌چگالی مرکزی دریافتیم که با افزایش پارامتر آیزنوتروپ و بازای مقادیر ثابت جرم سوخت، انرژی مورد نیاز برای تراکم سوخت نیز افزایش می‌یابد. بنابراین نتیجه گرفتیم که اگر نیاز به ساچمه سوخت با ابعاد بزرگتر یا سوخت متراکم تر داشته باشیم، انرژی تراکم بیشتری نیز، نیاز خواهیم داشت. با محاسبه انرژی احتراق ناحیه داغ دریافتیم که این کمیت به پارامترهای جرم سوخت و پارامتر محصورشدگی سوخت وابسته است. بطوریکه در دمای احتراق ثابت و جرم ثابت سوخت، افزایش H_F منجر به افزایش E_s می‌گردد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که برای ساچمه سوخت با ابعاد بزرگتر و با جرم سوخت بیشتر در ساچمه، نیاز به انرژی احتراق بیشتری نیز داریم. با محاسبه پارامتر بهره سوخت نتیجه گرفتیم که افزایش پارامتر آیزنوتروپ، تحت شرایط ثابت بودن پارامترهای M_F و H_F ، منجر به کاهش بهره سوخت همجوشی می‌گردد. همچنین محاسبات مادر مدل هم‌فشار ایده احتراق جرقه مرکزی نشان داد که در عمل برای فشردن سوخت به انرژی دو برابر مقدار محاسبه شده نیاز داریم.

مراجع:

1. S.Nakai, K.Mima, "Laser Driven Inertial Fusion Energy: Present and Prospective", Rep. Prog. Phys, 67, 321-349(2004).
2. L.R.Hafstad et al., "Final Report of Special Laser-Fusion Advisory Panel, Energy Research and Development Administration Report", No.28(1975).
3. R.E.Kidder, "Energy Gain of Laser Compressed Pellets: a Simple Model Calculation", Nuclear Fusion, 16, 3(1976).
4. M.D.Rosen, "The Physics Issues that Determine ICF Target Gain and Driver Requirements", Physics of plasmas, Vol.6, No.5(1999).
5. M.M.Basko, "Spark and Volume Ignition of DT and D2 Microspheres", Nuclear Fusion, Vol.30, No.12(1990).