

محاسبه بهره انرژی پلاسمای تبهگن در فرایند اشتعال سریع

محمد مهدوی*، احمد غلامی

دانشگاه مازندران - دانشکده علوم

چکیده

در همجوشی به روش محصور سازی اینرسی، در طول فاز تراکم چگالی بالا دمای پایین پلاسما تولید می شود که در رویکرد اشتعال سریع، الکترون های پلاسما می تواند در حالت تبهگن باشند. انرژی بالای مورد نیاز برای بدست آوردن این چگالی بالا در پلاسمای تبهگن نسبت به پلاسمای با چگالی متوسط، باعث کاهش بهره انرژی می شود. معادلات حاکم بر رفتار پلاسمای تبهگن متفاوت از نوع کلاسیک می باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که شرایط ایجاد پلاسمای تبهگن باعث تغییر در دمای اشتعال و بهره انرژی سیستم خواهد شد.

کلید واژه

همجوشی محصور سازی انرژی، پلاسمای تبهگن، اشتعال سریع، تابش ترمزی و بهره انرژی

مقدمه

همجوشی به روش اینرسی روش مناسب برای تولید انرژی مورد نیاز بشر می باشد، که در این روش ترکیبی از سوخت مورد نظر در محفظه ای با استفاده از پرتوهای محرک که به اطراف سطح خارجی آن تابیده می شود با استفاده از روشهای متفاوتی متراکم می گردد. در هر کدام از این روشها سعی بر این است که نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی را بالا ببریم. در رویکرد فرایند اشتعال سریع، سوخت توسط یک انفجار درونی به چگالی بالا متراکم شده و سپس در لحظه بیشینه تراکم، یک لکه داغ پیرامون سوخت متراکم ایجاد می شود. در این رویکرد در حالت با چگالی بالا و دمای پایین الکترون در پلاسما، الکترون های پلاسما در شرایط تبهگن می باشد [۱و۲]. یکی از مزیت های دانسیته بالا آن است که از آنجا که میزان واکنش همجوشی متناسب با توان دوم دانسیته است، بنابراین زمان فشردگی لازم برای بهره انرژی خالص می تواند به مقدار

چشمگیری کاهش یابد. معادلات حاکم بر رفتار این نوع پلازما نشان می دهد که به دلیل اصل طرد پاولی پارامترهای اتلافی از قبیل تابش ترمزی در پلاسمای تبهگن نسبت به حالت کلاسیک تغییر پیدا می کند [۳]، و این باعث تغییر در دمای اشتعال و بهره انرژی می شود. در قرص شبیه سازی شده معادلات تعادل انرژی برای سوخت D/T با ناخالصی 3He حل شده و بهره انرژی را برای این سوخت محاسبه و تأثیر چگالی و ناخالصی هلیوم-۳ بر روی آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مدل تئوری:

پس از مرحله فشرده سازی، قرص سوخت آماده اشتعال و سوختن است. سوختن گرما هسته ای در قرص D/T که با شرایط اولیه $\rho_0 R_0 = 800(\text{kg/m}^2) = (80\text{gr/cm}^2)$ و چگالی $\rho_0 = 9 \times 10^8(\text{kg/m}^3)$ فشرده شده در دمای $T_0 = 4 \times 10^{-18}(\text{kJ}) = (25\text{KeV})$ شروع می شود. تعداد نهایی ذرات N_k در هر لحظه از معادله زیر تعیین می شود [۴]:

$$\frac{dN_k}{dt} = \sum_{j=1}^4 a_k^j N_{j(1)} N_{j(2)} \langle \sigma v \rangle_j \frac{1}{V} \quad (1)$$

که در آن V حجم پلاسمای داغ، $\langle \sigma v \rangle_j$ واکنش پذیری متوسط ماکسولینی واکنش j ام، a_k^j تعداد ذرات نوع k ام است که در واکنش j ام تولید شده یا از بین رفته است. شش ذره که در قرص سوخت در نظر گرفته شدند عبارتند از: $D, T, {}^4He, {}^3He, p, n$

در یک قرص واقعی علاوه بر واکنش D/T واکنش های زیر نیز امکان وقوع خواهند داشت:



معادلات تعادل انرژی برای یون و الکترون بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} N_i \frac{dT_i}{dt} &= \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^6 (1 - \eta_k^j) (1 - f_k^j) \omega_k^j E_j N_{j(1)} N_{j(2)} \langle \sigma v \rangle_j \frac{1}{V} - P_{ie} V \\ &+ (1 - f_d) P_{ign} V - N_i T_i 4\pi R^2(t) C_s \frac{1}{V} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} N_e \frac{dT_e}{dt} = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^6 (1 - \eta_k^j) f_k^j \omega_k^j E_j N_{j(1)} N_{j(2)} \langle \sigma v \rangle_j \frac{1}{V} + P_{ie} V - P_b V + f_d P_{ign} V - P_{he} V - N_e T_e 4\pi R^2(t) C_s \frac{1}{V} \quad (4)$$

که در آن T_i و T_e ، دمای یون و الکترون، E_j انرژی حاصل از واکنش j ام، ω_k^j کسر انرژی واکنش j ام که توسط ذره k ام حمل می شود، f_k^j کسری از انرژی ذره k ام که در واکنش j ام تولید می شود و به الکترونهای پلاسما انتقال می یابد [۵]. η_k^j احتمال نشت ذره k ام از واکنش j ام، به خارج از قرص سوخت است [۴].
 P_{ie} جمله تبادل انرژی بین یون و الکترون، $R(t)$ شعاع قرص، C_s سرعت صوت و N_i تعداد کل ذرات یون است. P_{ign} مقدار انرژی ذخیره شده توسط پرتوهای یون خارجی (پروتون) که توسط پارامتر f_d نسبتی بین یون و الکترون تقسیم می شود. P_b توان اتلافی مربوط به تابش ترمزی می باشد.

بهره انرژی در پلاسمای تبهگن

در فرایند همجوشی اگر انرژی منتقل شده از محصولات همجوشی از انرژی ورودی به سیستم بیشتر باشد، بهره سیستم مثبت بدست می آید. در انرژی همجوشی اینرسی، بهره براساس جملاتی از انرژی همجوشی اینرسی تعریف شده است. براساس طرح پیشنهادی تنها قسمتی از هدف مدل سازی شده است. بهره انرژی بر اساس عامل b ، که کسری از هدف متراکم شده در حال سوختن می باشد، بصورت زیر تعریف می شود [۱].

$$b = \frac{\rho R}{\rho R + \beta} \quad ; \quad \beta = \frac{8 c_s m_f}{\langle \sigma v \rangle} \quad (5)$$

$$G = \frac{b E_{fusion}}{E_{com} + E_{ign}} \quad (6)$$

E_{fusion} انرژی کل تولید شده در واکنش های همجوشی برابر است با:

$$E_{fusion} = \int_0^{\infty} dt \sum_{j=1}^4 E_j \langle \sigma v \rangle_j N_{j(1)} N_{j(2)} \frac{1}{V} \quad (7)$$

E_{ign} ، مقدار انرژی ذخیره شده در اشتعال کننده توسط پرتوهای یون خارجی، و E_{com} انرژی پلاسمای متراکم شده می باشد، که بر اساس چگالی در فرایند اشتعال سریع به صورت زیر تعریف می شود [۶]:

$$E_{com}(j) = 3.3 \times 10^4 \eta_c^{-1} \rho^{2/3} \alpha M_f \quad (8)$$

$$E_{ign}(j) = \int_0^{\infty} dt P_{ign} V \quad (9)$$

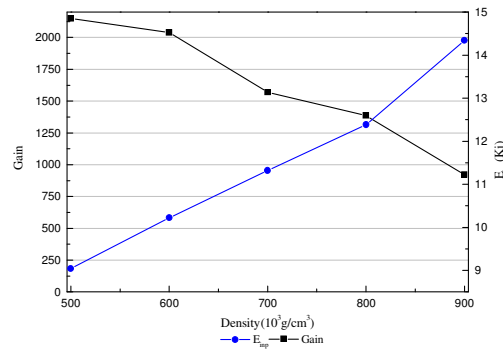
η_c ضریبی است که بر اساس محرک یعنی لیزر، برای سوخت متراکم شده تعریف می شود. پارامتر α نیز

در معادله (۸) بر اساس $\alpha = \frac{5T}{E_f}$ ، بیان می شود. جرم سوخت متراکم شده را می توان به صورت زیر تعریف

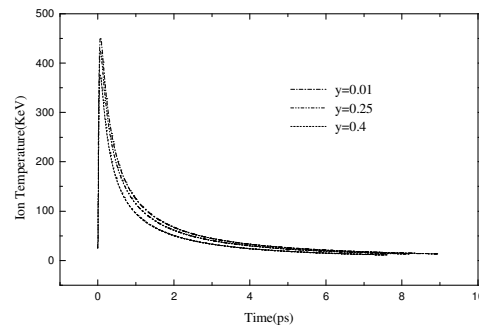
کرد:

$$M_f = \frac{4\pi (\rho R)^3}{3 \rho^2} \quad (10)$$

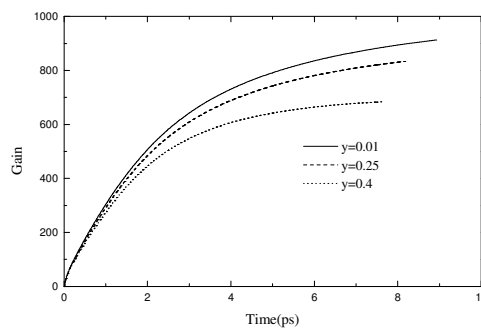
با افزایش چگالی در سوخت مقدار انرژی لازم برای متراکم کردن سوخت و در نتیجه انرژی محرک زیاد می شود و این عامل باعث کاهش بهره انرژی می شود. در شکل ۱ بهره انرژی برای قرص سوخت شبیه سازی شده، در چگالی های متفاوت با حفظ شرایط تبهگنی ارائه شده است. مقدار ناخالصی در سوخت D/T تاثیر زیادی بر روی دمای یون ها و به تبع آن می تواند بر روی دمای اشتعال و بهره انرژی داشته باشد، شکل ۲ و ۳ نشان می دهد که افزایش ناخالصی در سوخت قرص باعث کاهش دمای یون و متعاقب آن باعث کاهش بهره انرژی می شود. بنابراین سوخت D/T با کمترین ناخالصی دارای بیشترین بهره انرژی و کمترین دمای اشتعال در فرایند همجوشی می باشد.



شکل ۱: مقادیر عددی بدست آمده بهره انرژی در قرص سوخت $D / T_{x=0.01} / {}^3\text{He}_y=0.18$



شکل ۲: تغییرات دمای یون در قرص سوخت $D / T_{x=0.01} / {}^3\text{He}_y$ به ازای نسبت های مختلف ناخالصی هلیوم-۳



شکل ۳: مقایسه بهره در قرص سوخت $D / T_{x=0.01} / {}^3\text{He}_y$ به ازای نسبت های مختلف ناخالصی هلیوم-۳

نتیجه گیری

با بررسی توان های اتلافی پلاسمای تبهگن و حل معادلات تحول زمانی یون و الکترون درقرص سوخت شبیه سازی شده $D/T_x/{}^3He_y$ ، در شرایط اولیه اشتعال $\rho_0 R_0 = 800 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ و $T_0 = 4 \times 10^{-18} \text{ (kj)}$ افزایش انرژی محرک سوخت برای رسیدن به چگالی مورد نظر در حالت تبهگن باعث کاهش بهره انرژی می شود و از طرف دیگر تأثیر ناخالصی در قرص سوخت باعث کاهش دمای یون و نیز باعث کاهش بهره انرژی می شود.

مرجع ها

- [1] P. T. Leon , S. Eliezer and J. M. Martinez-Val, " Fusion energy in degenerate Plasmas" *Phys. Lett. A* **343** 181(2005).
- [2] P. T. Leon, S. Eliezer, M. Piera and J.M.Martinez-Val, " Inertial fusion features in degenerate plasmas" *Laser Part. Beams* **23** 193 (2005).
- [3] S. Eliezer, P.T. Leon, J. M. Martinez-Val and D. V. Fisher, " Radiation loss from inertially confined degenerate plasmas " *Laser Part. Beams* **21** 599 (2003).
- [4] K. Ghosh and S. V. G. Menon, " Energy deposition of charged particles and neutrons in a inertial confinement fusion" *Nucl. Fusion*, **47** 1176 (2007).
- [5] S. Son and N. J. Fisch, " Controlled fusion with hot-ion mode in a degenerate plasma" *Phys. Lett. A* **356** 65 (2006).
- [6] S. Eliezer and K. Mima, " *Applications of Laser-Plasma Interactions* " , CRC Press,14 (2009).