

نشریه تابش و فناوری هسته‌ای، دوره ۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶

مطالعه میزان تأثیر تریتیوم در بهره سوخت غیر هم مولار دوتریوم-تریتیوم در

همجوشی افروزش شوکی

بابک خان بابائی^{۱*}، بهناز کالجبی^۱، میثاق کسایان^۲

^۱ استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۴)

چکیده

افروزش شوکی، یکی از روش‌های مورد توجه در ایده همجوشی محصورشدگی لختی می‌باشد که جداسازی مراحل فشرده‌سازی و اشتعال سوخت در این روش، منجر به کاهش الزامات راه‌انداز و افزایش مقدار بهره می‌شود. در حال حاضر یکی از عمده نگرانی‌های نیروگاه‌های هسته‌ای قدرت، مشکلات ناشی از پسمان‌های هسته‌ای است. در طراحی‌های صورت گرفته در نیروگاه‌های همجوشی آینده، همچنان مشکلات حفاظت پرتوی ناشی از انباشت تریتیوم در پوشش بارور زاینده و فعالسازی مواد ساختمان راکتور ناشی از نوترون‌های واکنش همجوشی دوتریوم-تریتیوم (DT) قابل توجه است. از این رو، در این مقاله شرایط اشتعال سوخت و بهره همجوشی برای سوخت DT غیر هم مولار در فرآیند اشتعال شوکی مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات نشان می‌دهد شرایط تشکیل لکه داغ، به چگالی لکه داغ و سوخت سرد اطراف آن بستگی دارد. در نهایت، تأثیر جرم سوخت، نسبت فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد اطراف آن، کسر وزنی تریتیوم و پارامتر آیزنترپ در مقدار بهره انرژی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: همجوشی محصورشدگی لختی، افروزش شوکی، بهره سوخت، پارامتر آیزنترپ

* سمنان، دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، کد پستی: ۳۶۷۱۶-۴۱۱۶۷

پست الکترونیکی: b.khanbabaee@du.ac.ir

۱. مقدمه

در رهیافت افروزش شوکی، ابتدا سوخت توسط پالس کم شدت اولیه فشرده، سپس در انتهای مرحله فشرده سازی، توسط باریکه پرشدت ثانویه تحت تابش قرار می گیرد و یک موج شوکی درونسو ایجاد می شود. برخورد میان موج شوکی ایجاد شده و موج برگشتی از مرکز سوخت سبب گرمایش بسیار زیاد و افزایش چگالی لکه داغ مرکزی اولیه شده و شرایط اشتعال فراهم می شود [۳-۱]. در این فرآیند به دلیل افزایش فشار لکه ی داغ نسبت به فشار سوخت چگال اطرافش به ازای یک جرم مشابه از سوخت، انرژی کمتری نسبت به فرآیند هم فشار اشتعال مرکزی مورد نیاز است. بنابراین در افروزش موج ضربه ای به بهره بالاتر و آستانه افروزش پایین تر می توان دست یافت. همچنین با کاهش انرژی لازم برای فشرده سازی سوخت، سرعت انفجار درونی کاهش یافته و ناپایداری های ریلی-تیلور کمتر ظاهر می شوند. در این مقاله شرایط اشتعال سوخت DT غیر هم مولار بررسی می شود. سپس وابستگی مقدار بهره را به پارامترهای مختلف در نظر گرفته و بهره ماکزیمم محاسبه خواهد شد [۶-۴].

۲. روش کار

به منظور اشتعال سوخت همجوشی می بایست توان نهشتی ذرات آلفای ناشی از واکنش DT بیشتر از توان های اتلافی باشد تا شرط خودگرمایش سوخت فراهم شود. بنابراین شرط اشتعال را می توان به صورت $W_\alpha > W_b + W_e + W_m$ در نظر گرفت [۷]. که در آن:

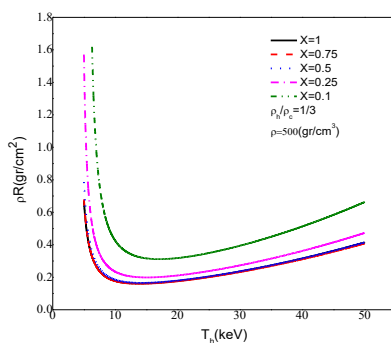
$$W_\alpha \left(\frac{keV}{cm^3 s} \right) = \sum_{j,k} \omega_k^j E_j n_{j1} n_{j2} \langle \sigma.v \rangle \quad (1)$$

$$W_R \left(\frac{keV}{cm^3 s} \right) = 2.94 \times 10^{-15} n_e \sum_j n_j Z_j^2 T_h^{0.5} \quad (2)$$

$$W_m \left(\frac{keV}{cm^3 s} \right) = 4 \times 10^{-5} T_h^{1.5} \left(\sum_j n_j + n_e \right)^{1.5} \frac{3}{R} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_h}} \quad (3)$$

$$W_e \left(\frac{keV}{cm^3 s} \right) = \frac{17.81 \times 10^{28} T_h^{3.5}}{Ln \Lambda R^2} \quad (4)$$

W_α ، توان حاصل از همجوشی، W_R ، توان تابش ترمزی، W_m ، توان ناشی از کار مکانیکی، W_e ، توان ناشی از رسانش حرارتی الکترون و ρ_h و T_h چگالی و دمای لکه داغ و $\gamma = \frac{5}{3}$ و $Ln \Lambda$ لگاریتم کولنی می باشد [۸-۹]. در شکل (۱)، شرط اشتعال بر حسب دمای سوخت به ازای X های مختلف رسم شده است. چنانچه مشاهده می شود با افزایش مقدار تریتیوم در سوخت، به دلیل داشتن آهنگ برهم کنش بزرگتر سوخت DT، نسبت به سایر برهم کنش ها، اشتعال سوخت در دماهای پایین تری رخ خواهد داد.

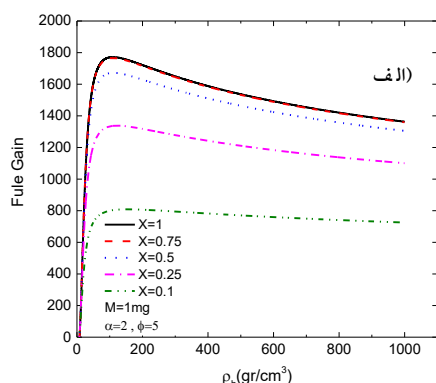


شکل ۱. شرط اشتعال به ازای مقادیر مختلف X

بهره سوخت، به صورت نسبت انرژی آزاد شده در همجوشی به انرژی دریافت شده توسط سوخت تعریف می شود. با محاسبه

فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد متراکم شده اطراف آن و M نیز جرم کل سوخت می باشد [۱۱-۱۰].

در شکل (۲)، بهره بر حسب چگالی لکه داغ و به ازای X های مختلف برای جرم ۱ میلی گرم رسم شده است.



شکل ۲. بهره سوخت بر حسب چگالی لکه داغ با جرم ۱ میلی گرم

با توجه به شکل، منحنی بهره سوخت به ازای $X=0.75$ و $X=1$ تقریباً برهم منطبق هستند. به عبارتی با استفاده کمتر از تریتیوم در سوخت می توان به بهره موردنظر در سوخت هم مولار دست یافت. همچنین مقدار کاهش بهره سوخت از $X=0.5$ به $X=0.25$ نسبت به کاهش بهره سوخت از $X=1$ به $X=0.5$ افت شدیدتری پیدا کرده است. در شکل (۳)، بهره سوخت بر حسب چگالی لکه داغ، به ازای جرم های مختلف رسم شده است.

توان کل حاصل از همجوشی در مدت زمان محصورسازی سوخت می توان انرژی کل حاصل از همجوشی را بدست آورد.

$$E_f = \sum_{j,k} E_j \omega_j^k n_{j_1} n_{j_2} <\sigma v>_j \frac{m}{\rho} \frac{R}{4C_s} \quad (5)$$

در رابطه بالا E_f ، انرژی حاصل از همجوشی و n چگالی تعداد

در واحد حجم عناصر تشکیل دهنده سوخت - $n_D = \frac{N_{tot}}{(1+x)V}$

و $n_T = \frac{xN_{tot}}{(1+x)V}$ و ω_j^k کسر انرژی رسیده به محصول واکنش

و C_s سرعت صوت در پلاسما است. بنابراین انرژی حاصل از همجوشی بصورت رابطه زیر بدست می آید:

$$E_f = q_{F_{DT}} m \left(\frac{\rho R}{H_{B_{DT}} + \rho R} \right) + \quad (6)$$

$$q_{F_{DDn}} m \left(\frac{\rho R}{H_{B_{DDn}} + \rho R} \right) + q_{F_{DDp}} m \left(\frac{\rho R}{H_{B_{DDp}} + \rho R} \right)$$

که در رابطه بالا، H_B ، پارامتر سوخت در برهمکنش های مختلف و q انرژی حاصل از همجوشی دو هسته برهم کنش کننده در واحد جرم می باشند. بنابراین بهره سوخت زیر بدست خواهد آمد.

$$G = E_f / (E_c + E_h) \quad (7)$$

در این رابطه E_c ، انرژی سوخت سرد فشرده شده و

$$E_h = 75 \times 10^4 \beta \gamma (r_0 E_c^{-\frac{5}{2}})^2$$

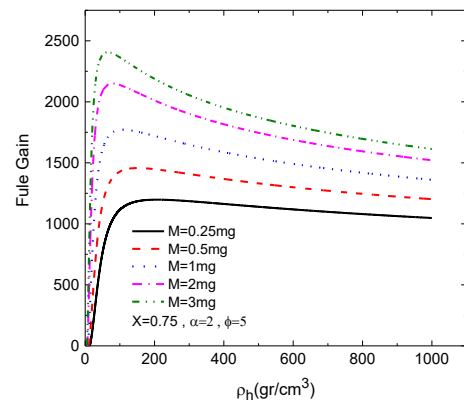
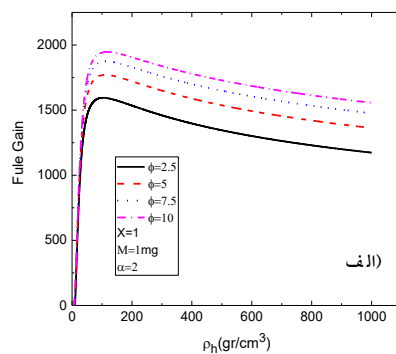
$$\gamma = \frac{T_h}{5} \text{ و } \beta = \frac{\rho_h R_h}{3}$$

$$\rho_c = 5.45 \left(\frac{E_c}{\alpha M} \right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\rho_h = 0.0095 \frac{\phi}{T \alpha^2 M^2} E_c$$

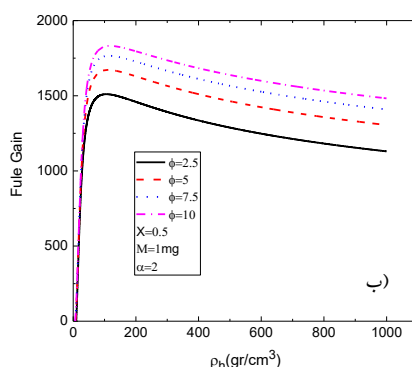
$$R_c = r_1 E_c^{-\frac{3}{2}} \text{ و } R_h = r_0 E_c^{-\frac{5}{2}}$$

کل سوخت هستند. در رابطه بالا α پارامتر آیزنروپ و ϕ نسبت



شکل ۳. بهره سوخت بر حسب چگالی لکه داغ X .

با توجه به شکل (۳)، افزایش جرم سبب افزایش بهره می‌گردد، ولی با افزایش دو برابری جرم، بهره افزایش قابل توجهی پیدا نمی‌کند، که این مطلب را می‌توان در طراحی سوخت‌ها مورد توجه قرار داد. میزان بهره سوخت برای جرم‌های بالاتر از ۱mg در روش‌های احتراق شوکی و مرکزی، تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند.



شکل ۴. بهره سوخت بر حسب چگالی لکه داغ (و پارامترهای مختلف ϕ). الف. $X=1$. ب. $X=0.5$.

در شکل (۸)، بهره سوخت بر حسب انرژی سوخت سرد با X های متفاوت رسم شده است. از آنجا که واکنش DT دارای بزرگترین سطح مقطع در بین واکنش‌های همجوشی است، از این رو، اگر نسبت وزنی تریتیوم به دوتریوم موجود در سوخت بیشترین مقدار را داشته باشد ($X=1$) می‌توان انتظار داشت که سوخت دارای بیشترین بهره خواهد بود و هر چه این نسبت کوچکتر شود، بهره نیز کاهش پیدا خواهد کرد. با توجه به نمودار، منحنی بهره سوخت به ازای $X=0.75$ تقریباً منطبق بر منحنی $X=1$ است و این بدان معنی است که برای سوخت‌هایی با

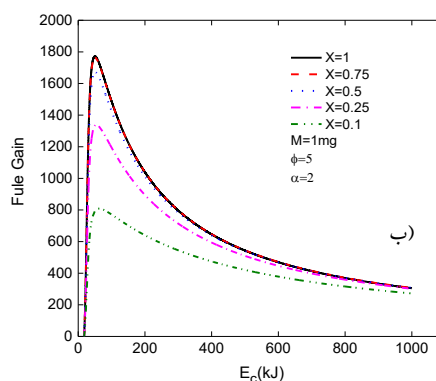
پارامتر ϕ نسبت فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد است، که با توجه به شکل (۴-الف و ب) می‌توان دریافت که هرچه اختلاف فشار ایجاد شده توسط موج شوکی بزرگتر باشد، به ازای یک چگالی لکه داغ مشخص می‌توان به بهره بزرگتری دست پیدا کرد. با مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که با نصف شدن تعداد تریتیوم نسبت به تعداد دوتریوم بهره کاهش بسیار زیادی پیدا نمی‌کند.

$X > 0.75$ ، می توان با مصرف کمتر تریتیوم به بهره سوخت

مراجع

هم مولار رسید.

- [1] S. Atzeni, A. Schiavi, A. Marocchino, *Plasma Phys. Control. Fusion* 53, 035010 (2011)
- [2] S. Atzeni, A. Marocchino, A. Schiavi, *Plasma Phys. Control. Fusion* 57, 014022(2015)
- [3] S. Atzeni, X. Ribeyre, G. Schurtz, A. J. Schmitt, B. Canaud, R. Betti, L.J. Perkins, *Nucl. Fusion* 54, 05400(2014)
- [4] R. Betti, C. D. Zhou, K. S. Anderson, L. J. Perkins, W. Theobald, A. A. Solodov, *Phys. Rev. Lett.* 98, 155001 (2007)
- [5] X. Ribeyre, G. Schurtz, M. Lafon, S. Galera, S. Weber, *Plasma Phys. Control. Fusion* 51, 015013, (2009)
- [6] W. Theobald, K. S. Anderson, R. Betti, R. S. Craxton at etla *Plasma Phys. Control. Fusion* 51, 124052(2009)
- [7] J. Martinez-Val, S. Eliezer, Z. Henis, M. Piera, *Nucl. Fusion* 38, 11, (1998)
- [8] S. Eliezer, J. Martinez-Val, M. Piera, *Phys. Lett.* 40, 2(1998)
- [9] S. Elieze, Z. Henis, J. Martinez, *Physics Letters A* 243, 5-6 (1998)
- [10] M. Lafon, X. Ribeyre, G. Schurtz, *Physics of Plasmas* 17, 5 (2010)
- [11] S. Andrew, B. Jason, P. Steven, Z. Steven, E. David, *E. Physics of Plasmas* 17, 4(2010)



شکل ۵. بهره سوخت بر حسب انرژی سوخت سرد

۳. نتایج

در این پژوهش جهت محاسبه شرایط اشتعال سوخت، تقریبات در نظر گرفته شده جهت محاسبات در مراجع قبلی اصلاح شده و مقادیر دقیق تری از این کمیت حاصل شد. سوخت به صورت غیرهم مولار در نظر گرفته شد و شرط اشتعال و بهره سوخت به ازای نسبت های مختلف تریتیوم به دوتریوم X ، مورد بررسی قرار گرفت که در نتیجه، آستانه اشتعال سوخت به ازای X های بزرگتر، کاهش یافته، بدین ترتیب که شرایط اشتعال به ازای تریتیوم بیشتر در دماهای پایین تری فراهم می شود. همچنین با توجه به منحنی بهره سوخت، می توان دریافت که با مصرف کمتر تریتیوم به منظور کاهش استفاده از تریتیوم جهت کاهش مشکلات زیست محیطی، می توان به بهره سوخت هم مولار دست یافت.

Journal of Radiation and Nuclear Technology / Vol. 4 / No. 1 / Spring 2017

Study of the effects of Tritium in unequimolar Deuterium- Tritium Fuel Gain in Shock Ignition Fusion

B. Khanbabaei^{1*}, B. Kaleji¹, M. Kasaeian²

¹ Assistant Professor, School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran

² M.Sc, School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran

* Corresponding author's E-mail: b.khanbabaei@du.ac.ir

(Received: 2017/04/03- Accepted: 2017/01/14)

ABSTRACT

Shock ignition (SI) is one of the attractive topics for inertial confinement fusion (ICF) which this two-step ICF process separates fuel assembly and ignition, relaxing the driver requirements and promising high gain. One of the main concerns about current working on nuclear power Reactor is the potential hazards of their radioactive waste. In the design of future fusion power plants, there still exist radiological hazards due to accumulation of byproduct tritium in blanket layer and also collisions between neutrons released from Deuterium- Tritium(DT) fusion reaction and nearly all fusion reactor building materials. Therefore, in this paper, ignition requirements and fuel gain of non-equimolar DT fuel pellet have been studied in SI scheme. Our calculations show that the hot-spots formation conditions depend on densities of hot-spot and its surrounding cold fuel. Finally, the role of physical parameters on energy gain is investigated, including fuel mass, the ratio of hot- spot pressure to cold fuel pressure, different tritium weight fractions and isentrope parameter.

Keywords: *inertial confinement fusion, shock ignition, fuel gain, isentrope parameter*