



بررسی حالت یون داغ در واکنش همجوشی دوتریوم-هلیوم ۳

متولی، سید محمد^{۱*} - فدایی، فرشته^۲ - تقی‌پور، آرمین^۱

^۱دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

^۲دانشگاه پیام نور، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

پژوهش‌هایی که امروزه بر روی واکنش همجوشی هسته‌ای با سوخت دوتریوم-هلیوم ۳ به عنوان یکی از واکنش‌های مهم همجوشی در حال انجام است، بسیار گسترده می‌باشند. ما در این کار برخلاف پژوهش‌های سابق که دمای یون و الکترون یکسان در نظر گرفته می‌شد، حالت یون داغ را برای واکنش همجوشی هسته‌ای با سوخت دوتریوم-هلیوم ۳ مورد نظر قرار داده و دمای الکترون و یون را متفاوت در نظر می‌گیریم. بر همین اساس، دستگاه معادلات تعادل ذره و انرژی را برای این واکنش نوشته و پارامترهای پلاسما را با حل عددی این معادلات بدست آورده و بررسی می‌کنیم. کلمات کلیدی: حالت یون داغ، همجوشی دوتریوم-هلیوم ۳، پارامترهای پلاسما، معادلات ذره و انرژی.

Study of the hot ion mode in D-³He fusion reaction

Motevalli, S. Mohammad¹; Fadaei, Fereshteh²; Taghipour, Armin¹

¹University of Mazandaran, Faculty of Science, Department of Nuclear Physics

²Payam Noor University, Faculty of Science, Department of Physics

Abstract:

Today, researches on nuclear fusion reactions by D-³He fuel, as one of the most important fusion reactions, are widespread. In this work, unlike the former researches that was considered equal temperatures for ion and electron, we consider the hot ion mode for fusion reaction by D-³He fuel and also different temperatures for ion and electron. Accordingly, the system of particle and energy balance equations are written for this reaction and the plasma parameters are obtained by numerically solving these equations.

Key words: Hot ion mode, D-³He fusion, plasma parameters, particle and energy equation.

مقدمه:

یکی از روش‌های دستیابی به همجوشی هسته‌ای استفاده از میدان مغناطیسی برای محصور سازی پلاسما می‌باشد، که سیستم توکامک به عنوان یکی از موفق‌ترین دستگاه‌های همجوشی در روش محصور سازی مغناطیسی شناخته شده است [۱]. برای محصورسازی پلاسمای داغ از اثر میدان مغناطیسی بر روی ذرات باردار استفاده می‌شود.



از آنجایی که در همجوشی هسته‌ای باید بر دافعه‌ی کولنی نیز غلبه کرد، در ابتدا سوخت دوتریوم-تری‌تیوم در همجوشی هسته‌ای به علت منحرف نشدن سوخت در میدان مغناطیسی و در نتیجه انتقال بیشتر انرژی به ذرات بدون بار الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. تا به امروز بیشتر آزمایش‌های انجام گرفته نیز بوسیله همین سوخت بوده است که مهم‌ترین دلایل این امر انجام گرفتن واکنش در دمای پایین‌تر و همچنین دارا بودن بالاترین سطح مقطع در محدوده‌ی دمایی مورد نظر در راکتورهای همجوشی می‌باشد. اما این سوخت معایبی مانند پرتوزایی بالا، امکان رخداد فروگداخت و کمبود منابع طبیعی سوخت تری‌تیوم دارد؛ به دلیل کمبود منابع طبیعی تری‌تیوم نیاز به حضور بلانکت‌هایی به منظور زایش تری‌تیوم نیز می‌باشد که موجب ایجاد هزینه‌های بیشتر می‌گردد. از دیگر سو واکنش همجوشی با سوخت دوتریوم-هلیوم ۳ به خاطر تبدیل مستقیم انرژی و کم‌تر بودن خطرات ناشی از پرتوزایی، عدم امکان رخداد فروگداخت، بازدهی بیشتر، هزینه‌ی نگهداری پایین‌تر و مواردی از این دست مورد توجه قرار گرفت. در رابطه با واکنش همجوشی هسته‌ای با سوخت دوتریوم-تری‌تیوم در راکتور توکامک پژوهش‌های نظری و تجربی بسیاری انجام شده‌اند [۴-۲]. همچنین در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی بر روی راکتور توکامک کروی در موازات پروژه‌ی ایترا انجام شده است. این پژوهش‌ها علاوه بر سوخت دوتریم-تری‌تیوم بر روی سوخت دوتریوم-هلیوم ۳ نیز انجام می‌شوند. بخشی از این کارهای پژوهشی مربوط به بررسی نسبت سوخت‌ها در واکنش‌های متفاوت همجوشی و مقایسه‌ی نتایج متفاوت و یا بررسی و مقایسه‌ی نسبت مقاطع عرضی چگالی برای ذرات و یا نسبت مقاطع عرضی دما برای یون‌ها و الکترون می‌باشد [۵]. چرخه سوخت در واکنش همجوشی دوتریوم و هلیوم ۳ به صورت زیر است:



ما در این کار پژوهشی برخلاف کارهای سابق که با فرض برابر بودن دمای یون و الکترون انجام می‌گرفت، معادلات توازن ذره‌واکنش همجوشی با سوخت دوتریوم-هلیوم ۳ و همچنین معادلات مربوط به دماهای یون و الکترون را برای حالت یون داغ نوشتیم تا با حل عددی این دستگاه معادلات دیفرانسیل متشکل از معادلات مربوط به چگالی‌ها و دماها، چگالی‌های ذرات و دماهای یون و الکترون را نسبت به زمان بدست آورده و با هم مقایسه کنیم.

روش کار:



معادلات توازن ذره مربوط به همجوشی با سوخت دوتریوم-هلیوم^۳ را برای ذرات دوتریوم، هلیوم^۳، تریتیوم، پروتون و آلفا می‌نویسیم [۶-۷]. با در نظر گرفتن واکنش‌های همجوشی (۱)، (۲)، (۳) و (۴) باید توجه کرد که ذره‌ی دوتریوم در واکنش‌های دوتریوم-هلیوم^۳، دوتریوم-تریتیوم، دوتریوم-دوتریوم (۲) و دوتریوم-دوتریوم (۳) به عنوان سوخت مصرف می‌شود. ذره‌ی هلیوم^۳ در واکنش دوتریوم-دوتریوم (۳) به عنوان محصول تولید و در واکنش دوتریوم-هلیوم^۳ به عنوان سوخت مصرف می‌شود. ذره‌ی تریتیوم توسط واکنش دوتریوم-دوتریوم (۲) به عنوان محصول تولید و در واکنش دوتریوم-تریتیوم به عنوان سوخت مصرف می‌شود. ذره‌ی آلفا به عنوان محصول در واکنش‌های دوتریوم-تریتیوم و دوتریوم-هلیوم^۳ و ذره‌ی پروتون نیز به عنوان محصول در واکنش‌های دوتریوم-دوتریوم (۲) و دوتریوم-هلیوم^۳ تولید می‌شوند.

معادله‌ی توازن ذره‌ی دوتریوم به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{dn_D(t)}{dt} = (1 + \alpha_n)S_D(t) - \frac{n_D(t)}{\tau_D} - (1 + \alpha_n) \left[n_D(t)n_T(t)\langle\sigma_v\rangle_{DT} + 2\frac{n_D(t)^2}{2}\langle\sigma_v\rangle_{DDPT}\langle\sigma_v\rangle_{DDHe3N} + n_D(t)n_{He3}(t)\langle\sigma_v\rangle_{DHe3} \right] \quad (5)$$

معادله‌ی توازن ذره‌ی هلیوم^۳:

$$\frac{dn_{He3}(t)}{dt} = (1 + \alpha_n)S_{He3}(t) - \frac{n_{He3}(t)}{\tau_{He3}} + (1 + \alpha_n) \left[\frac{n_D(t)^2}{2}\langle\sigma_v\rangle_{DDHe3N} - n_D(t)n_{He3}(t)\langle\sigma_v\rangle_{DHe3} \right] \quad (6)$$

معادله‌ی توازن ذره‌ی تریتیوم:

$$\frac{dn_T(t)}{dt} = (1 + \alpha_n) \left[\frac{n_D(t)^2}{2}\langle\sigma_v\rangle_{DDPT} - n_D(t)n_T(t)\langle\sigma_v\rangle_{DT} \right] - \frac{n_T(t)}{\tau_T} \quad (7)$$

معادله‌ی توازن ذره‌ی آلفا:

$$\frac{dn_\alpha(t)}{dt} = (1 + \alpha_n) \left[n_D(t)n_T(t)\langle\sigma_v\rangle_{DT} + n_D(t)n_{He3}(t)\langle\sigma_v\rangle_{DHe3} \right] - \frac{n_\alpha(t)}{\tau_\alpha} \quad (8)$$

معادله‌ی توازن ذره‌ی پروتون:

$$\frac{dn_p(t)}{dt} = (1 + \alpha_n) \left[\frac{n_D(t)^2}{2}\langle\sigma_v\rangle_{DDPT} + n_D(t)n_{He3}(t)\langle\sigma_v\rangle_{DHe3} \right] - \frac{n_p(t)}{\tau_p} \quad (9)$$

در معادلات فوق $n_D(t)$ ، $n_{He3}(t)$ ، $n_T(t)$ و $n_\alpha(t)$ و $n_p(t)$ به ترتیب چگالی ذرات دوتریوم، هلیوم^۳، تریتیوم، آلفا و پروتون می‌باشند. τ_D ، τ_{He3} ، τ_T ، τ_α و τ_p زمان محصور سازی موثر ذره و $S_D(t)$ و $S_{He3}(t)$ به ترتیب میزان سوخت ذخیره شده‌ی دوتریوم و هلیوم^۳ می‌باشند.

در معادلات فوق پارامتر سیگما-وی یا به عبارتی همان پارامتر آهنگ واکنش برای واکنش‌های دوتریوم-تریتیوم، دوتریوم-دوتریوم، دوتریوم-دوتریوم و دوتریوم-هلیوم^۳ به ترتیب با $\langle\sigma_v\rangle_{DT}$ ، $\langle\sigma_v\rangle_{DDPT}$ ، $\langle\sigma_v\rangle_{DDHe3N}$ و $\langle\sigma_v\rangle_{DHe3}$ نشان داده شده‌اند.

با در نظر گرفتن روابط توازن توان یون و الکترون و روابط موجود برای انرژی یون (E_i) و انرژی الکترون (

E_e) می‌توان روابط مورد نیاز برای محاسبه‌ی دمای یون و الکترون را به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{dE_e(t)}{dt} = P_f(1 - F_{ion}) + \frac{P_{EXT}(1 - F_{pi})}{V_0} + P_{oh} + P_{ie} - P_b - P_s - \frac{E_e(t)}{\tau_E} \quad (10)$$

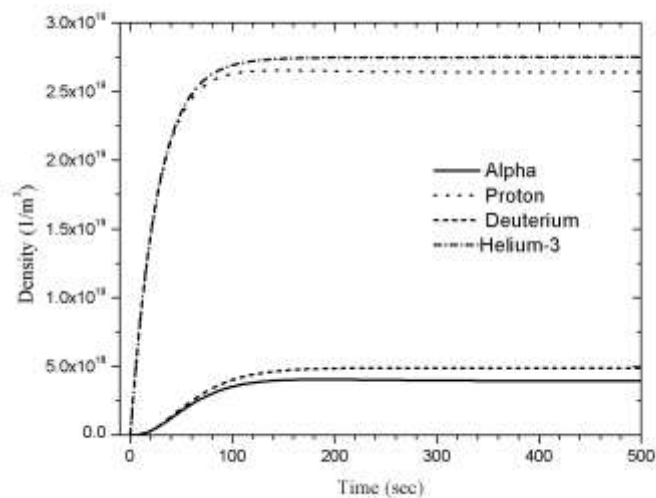


$$\frac{dE_i(t)}{dt} = P_f(F_{ion}) + \frac{P_{EXT}(F_{Pi})}{V_o} - P_{ie} - \frac{E_i(t)}{\tau_E} \quad (11)$$

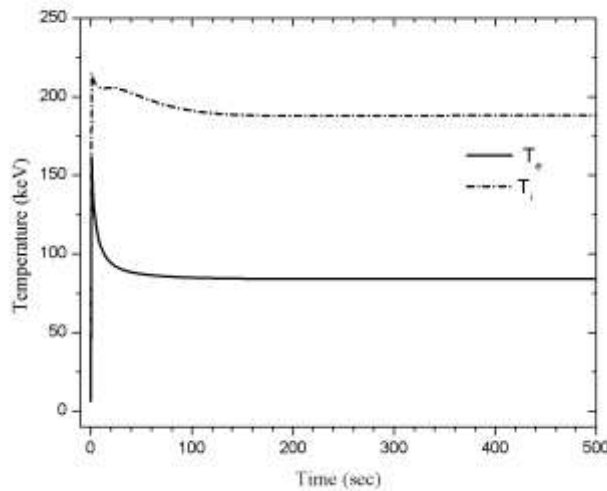
در روابط بالا، P_f توان گرمایی محصولات همجوشی، F_{ion} کسر انتقال انرژی توان همجوشی به یون، P_{EXT} توان گرمایی خارجی، F_{Pi} کسر توان به یون‌های توان گرمایی خارجی، V_o حجم پلاسما، P_{oh} توان گرمایی اهمی، P_b اتلاف تابش ترمزی، P_s اتلاف تابش سینکروترون، P_{ie} توان انتقالی ناشی از برخورد به علت اختلاف دمای یون و الکترون می‌باشند [۸-۱۱]، τ_E زمان محصور سازی می‌باشد.

نتایج:

با جایگذاری روابط موجود برای توان‌ها و قرار دادن مقادیر F_{Pi} ، F_{ion} و V_o دستگاه معادلات دیفرانسیل فوق را به روش عددی حل می‌کنیم. پس از حل این دستگاه معادلات دیفرانسیل، مقادیر چگالی‌های دوتریوم، هلیوم-۳، پروتون و آلفا و دماهای یون و الکترون را برای یک بازه‌ی زمانی ۵۰۰ ثانیه بدست خواهیم آورد. با بدست آوردن این داده‌ها نمودارهای چگالی‌ها و دماهای یون و الکترون بر حسب زمان را می‌توان رسم کرد.



شکل ۱- تغییرات چگالی دوتریوم، هلیوم-۳، پروتون و آلفا بر حسب زمان.



شکل ۲- تغییرات دمای یون و الکترون بر حسب زمان.

بحث و نتیجه گیری:

در شکل ۱ تغییرات چگالی‌های دوتریوم، هلیوم-۳، پروتون (p) و آلفا (α) را به صورت چهار منحنی و در شکل ۲ نیز تغییرات دماهای یون (T_i) و الکترون (T_e) را به صورت دو منحنی در نموداری بر حسب زمان مشاهده می‌کنیم. در منحنی تغییرات چگالی‌های دوتریوم و هلیوم-۳ به ترتیب پس از حدود 115 s و 170 s ثانیه به مقدار تقریباً ثابتی در حدود $2.65 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ و $2.75 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ می‌رسند و پس از این زمان شاهد تغییرات چگالی نیستیم. اما چنین اتفاقی برای محصولات واکنش همجوشی دوتریوم-هلیوم-۳ یعنی پروتون و آلفا به ترتیب پس از 230 s و 280 s رخ می‌دهد و به مقادیر تقریباً ثابتی در حدود 4.88×10^{18} و 3.98×10^{18} می‌رسند. اگر همین بررسی مشابه را برای داده‌های دماهای یون و الکترون انجام دهیم، خواهیم دید که روند تغییرات برای دماهای یون و الکترون به ترتیب پس از حدود 200 s و 150 s به میزان کمینه می‌رسد و تقریباً به مقدار ثابتی در حدود 188 keV و 84.25 keV می‌رسند. نتایج حاصل از این محاسبات نشان می‌دهد، دمای الکترونها و یونها در واکنش همجوشی دوتریوم و هلیوم-۳ دارای مقادیر یکسانی نیست درحالی‌که در پژوهشهای قبلی [۱۱] همین معادلات را با فرض یکسان بودن این دماها حل و محاسبه کرده ایم. بنابراین به نظر می‌رسد برای بدست آوردن نتایج دقیقتر در محاسبات، باید دمای الکترونی و یونی را متفاوت در نظر گرفت.

مراجع:

1. Citrin, J., et al. "Electromagnetic stabilization of tokamak microturbulence in a high- β regime." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 57.1 (2014): 014032.
2. Santarius, J. F.; et al.; *Fusion Science and technology* 44 (2003): 289.
3. Kulcinski, G. L., et al. "Safety and Environmental Characteristics of Recent D-³He and DT Tokamak Power Reactors." *Fusion Technology* 21.3P2B (1992): 1779-1783.
4. Holtkamp, Norbert. "The status of the ITER design." *Fusion Engineering and Design* 84.2 (2009): 98-105.



5. Akers, R. J., et al. "Steady state operation of spherical tokamaks." *Nuclear Fusion* 40.6 (2000): 1223.
6. Mitarai, O. "A D-³He spherical tokamak reactor with the plasma current ramp-up by vertical field." *Nuclear Reactors, Nuclear Fusion and Fusion Engineering*, (Nova Science Publishers, Inc., 2009), Edited by A. Aasen and P. Olsson.
7. Vlad, G. "Energy balance code for the simulation of DT, D-3 He and catalyzed DD burning in high-field tokamaks of the OMITRON type." *Il Nuovo Cimento B* (1971-1996) 84.2 (1984): 141-159.
8. Trubnikov, B. A. "Universal coefficients for synchrotron emission from plasma configurations." *Reviews of Plasma Physics*, Volume 7. Vol. 7. 1979.
9. Matsuura, H., et al. "Effect of nuclear elastic scattering on plasma confinement condition in D-³He Tokamak fusion energy systems." ICENES. 2005.
10. McNally Jr, J. Rand. "Physics of fusion fuel cycles." *Nuclear Technology-Fusion* 2.1 (1982): 9-28.
11. Motevalli, S. M., and F. Fadaei. "Ignition curves for deuterium/helium-3 fuel in spherical tokamak reactor." *Pramana-Journal of Physics* 86.4 (2016): 837-846.