

کنترل سوخت واکنش همجوشی $D-^3He$ در توکامک کروی

فدایی فرشته

دانشگاه پیام نور، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

در این مقاله، ناپایداری گرمایی در پلاسمای واکنش همجوشی $D-^3He$ را در نقاط تعادل پلازما (چگالی بالا و دمای پایین) که از لحاظ اقتصادی برای رآکتور همجوشی مطلوب هستند را مورد بررسی قرار داده و سپس با استفاده از مدل کنترل غیر خطی، ناپایداری گرمایی پلازما را حذف و پلازما را به پایداری گرمایی می‌رسانیم.
کلمات کلیدی: واکنش همجوشی $D-^3He$ ، پایداری گرمایی، مدل غیر خطی.

مقدمه:

امروزه تحقیقات بسیاری بر روی واکنش‌های همجوشی در حال انجام است و اکثر این تحقیقات بر روی واکنش همجوشی دوتریوم-تری‌تیوم متمرکز شده است، زیرا این واکنش در بین سایر واکنش‌های همجوشی دارای سطح مقطع بالاتر است. اما نمی‌توان تحقیقات را تنها بر روی این واکنش متمرکز کرد زیرا این واکنش دارای معایبی نیز است. در این واکنش همجوشی ۸۰ درصد انرژی همجوشی به نوترون داده می‌شود که با توجه به مسایل ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای و همچنین مسائل زیست محیطی، از آسیب‌های این نوترون‌ها نمی‌توان صرف نظر کرد. در همین راستا تحقیقات بسیاری بر روی سایر سوخت‌های هسته‌ای که سوخت‌های پیشرفته، نامیده می‌شوند در حال انجام است [۱-۳]. یکی از این سوخت‌ها، سوخت همجوشی $D-^3He$ است. واکنش همجوشی $D-^3He$ در مقایسه با واکنش $D-T$ دارای نرخ انجام واکنشی پایین‌تری است بنابراین به پارامتر بتای بالاتری نیاز دارد در حالیکه پارامتر بتا در توکامک‌های قراردادی بسیار کم است بنابراین برای این واکنش همجوشی مطلوب نیستند. توکامک‌های کروی با نسبت ابعاد (۲-۱،۱) دارای پارامتر بتا تا حدود ۰،۵ و بالاتر هستند [۴-۷]، بنابراین برای این واکنش همجوشی، توکامک کروی گزینه مناسبی است. پارامترهای مورد نیاز برای توکامک کروی $D-^3He$ اولین بار توسط گلمبوس^۱ مورد بررسی قرار گرفت [۸].

اما یکی از مسایلی که در مورد سوخت‌های همجوشی به عنوان سوخت رآکتور همجوشی، ناپایداری گرمایی این واکنش‌های همجوشی است. از لحاظ اقتصادی باید رآکتور همجوشی در دمای کم و چگالی بالا عمل کند اما در این ناحیه، واکنش همجوشی به صورت ذاتی ناپایدار است. با افزایش اندک دما در این ناحیه، توان همجوشی افزایش یافته و گردش گرمایی رخ می‌دهد و همچنین با کاهش اندک دما نیز خاموشی رخ خواهد داد. در این کار ما با استفاده از مدل غیر خطی پایداری گرمایی پلازما را بررسی می‌کنیم.

روش کار :

در این کار، ما در ابتدا معادلات تبادل انرژی و ذره صفر بعدی را برای واکنش همجوشی $D-^3He$ با در نظر گرفتن اینکه الکترون‌ها و این‌های پلاسما دارای دما یکسانی هستند و هیچ ناخالصی با Z بالا در سیستم وجود ندارد نوشته و برای یافتن نقاط تعادل ابتدا قسمت زمانی معادلات را برابر صفر قرار داده و نقاط تعادل پلاسما را محاسبه می‌کنیم این نقاط تعادل، برای واکنش همجوشی $D-^3He$ در جدول (۱) ارائه شده است. پس از یافتن نقاط تعادل پلاسما، با استفاده از مدل غیر خطی ارائه شده در [۹]، معادلات ذره و انرژی را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم .

جدول شماره (۱): نقاط تعادل پلاسما $D-^3He$

n_D	n_3	n_p, n_α	P_{aux}	T	S_d, S_3	E
$3.22 \times 10^{19} m^{-3}$	$3.22 \times 10^{19} m^{-3}$	$3.89 \times 10^{18} m^{-3}$	0.78GW	50keV	$4 \times 10^{18} / s.m^3$	2.165 MJ / m ³

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = -\frac{n_\alpha}{\tau_p} + n_D n_3 \langle \sigma v \rangle_{d3} + n_D n_3 \langle \sigma v \rangle_{d3} \cdot (n_D n_3)_{eq} \langle \sigma v \rangle_{d3} + u_\alpha \quad (1)$$

$$\frac{dn_D}{dt} = -\frac{n_D}{\tau_p} - n_D n_3 \langle \sigma v \rangle_{d3} - n_D n_3 \langle \sigma v \rangle_{d3} \cdot (n_D n_3)_{eq} + S_D + u_D \quad (2)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = -\frac{n_3}{\tau_p} - n_D n_3 \langle \sigma v \rangle_{d3} - n_D n_3 \langle \sigma v \rangle_{d3} \cdot (n_D n_3)_{eq} + S_3 + u_3 \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{E}{\tau_E} - \left[\frac{E_{eq}}{\tau_E} - [P_f + P_{br} + P_{syn} + P_{ohm} + u_E] \right] \quad (4)$$

که در این معادلات $\langle \sigma v \rangle$ میزان واکنش پذیری که بر حسب دما به صورت زیر است [۱۰].

$$\langle \sigma v \rangle = C_1 \xi^{\frac{5}{6}} \xi^2 \exp(-3\xi^{\frac{1}{3}}) \quad (5)$$

که در آن پارامترهای ξ و ξ^2 دارای روابط زیر هستند.

$$\xi = 1 - \frac{C_2 T + C_4 T^2 + C_6 T^3}{1 + C_3 T + C_5 T^2 + C_7 T^3} \quad (6)$$

$$\xi^2 = \frac{C_0}{T^{1/3}} \quad (7)$$

و همچنین داریم

$$u_\alpha = -\frac{(n_\alpha)_{eq}}{\tau_p} + (n_D n_3)_{eq} \langle \sigma v \rangle_{d3} \quad (8)$$

$$u_D = -\frac{(n_D)_{eq}}{\tau_p} - (n_D n_3)_{eq} \langle \sigma v \rangle_{d3} + S_d \quad (9)$$

$$u_3 = -\frac{(n_3)_{eq}}{\tau_p} - (n_D n_3)_{eq} \langle \sigma v \rangle_{d3} + S_3 \quad (10)$$

$$u_E = P_{aux} - P_{br} \quad (11)$$

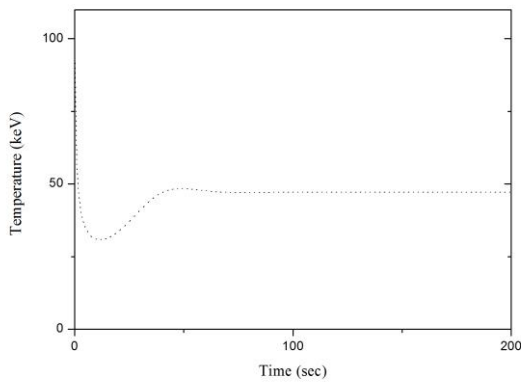
و P_f چگالی توان همجوشی، P_{br} چگالی توان تابشی ناشی از تابش ترمزی [۱۱]، P_{oh} چگالی توان اهمی [۱۲]، P_{syn} چگالی توان سیکلوترونی [۱۳] و P_{aux} چگالی توان کمکی پلاسما است. با قرار دادن مقادیر تعادل و پارامترهای توکامک کروی که در جدول (۲) ارائه شده است. می‌توان نمودار وابستگی زمانی پارامترهای پلاسما را رسم کرد.

جدول شماره (۲): پارامترهای توکامک کروی [۱۴]

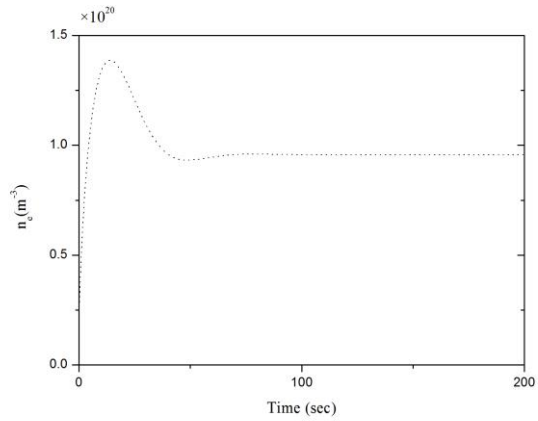
B	I	R	a	M	κ_χ	V
$2.7T$	$128MA$	$8m$	$6.15m$	2.5	3	1.972×10^4

نتایج :

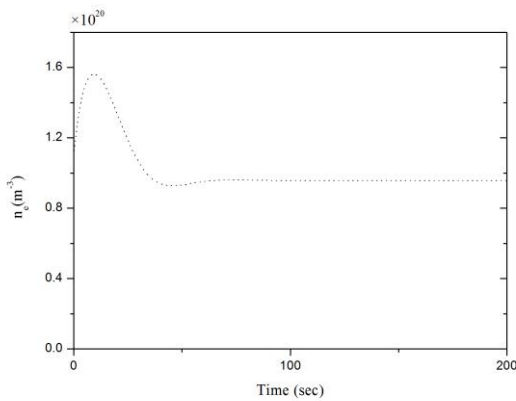
در شکل (۱) چگالی الکترونی پلاسما واکنش همجوشی $D-^3He$ بر حسب زمان نمایش داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است با استفاده از مدل کنترل غیر خطی که ارائه گردید. پلاسما بعد از گذشت مدت زمانی در حدود ۵۰ ثانیه، پلاسما اختلال ۵۰٪ دما و ۲۰٪ در چگالی آلفا وارد شده به شرایط اولیه، نقاط تعادل که در جدول شماره (۱) مشخص شده است را رد کرده، مجدداً به همان نقاط تعادل که برای رآکتور از لحاظ اقتصادی مطلوب هستند، برمی‌گردد. همین نتایج، در شکل (۲) برای دمای واکنش همجوشی $D-^3He$ بر حسب زمان رسم گردیده است و در شکل (۳) پارامتر β که یکی از پارامترهای مهم در رآکتور همجوشی است و به صورت نسبت فشار جنبشی درونی پلاسما بر فشار مغناطیسی خارجی وارد بر پلاسما تعریف می‌شود، برای همین میزان اختلال مثبت وارد بر شرایط اولیه، بر حسب زمان رسم شده است. سپس در شکل (۴-۶) چگالی الکترونی پلاسما، دمای پلاسما و پارامتر بتا برای حالت اختلال ۵۰٪- دما و ۲۰٪- در چگالی آلفا وارد شده در شرایط اولیه، نقاط تعادل که در جدول شماره (۱) مشخص شده است، بر حسب زمان رسم شده‌اند. همان‌طور که مشخص است در این حالت نیز پلاسما اختلال‌های وارد شده به شرایط اولیه پارامترهای پلاسما را رد کرده و به نقاط تعادل (جدول شماره (۱)) بازمی‌گردد.



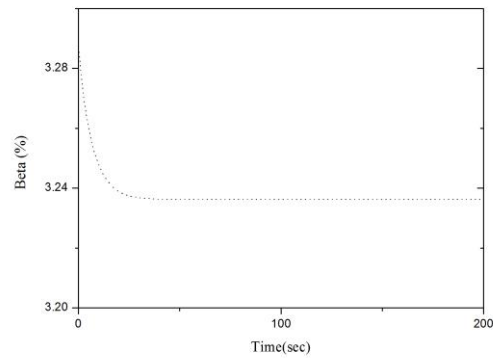
شکل (۲) - دمای پلاسمای $D-^3He$ بر حسب زمان در حالت پایداری گرمایی با اختلال $+50\%$ دما و 20% در چگالی آلفا



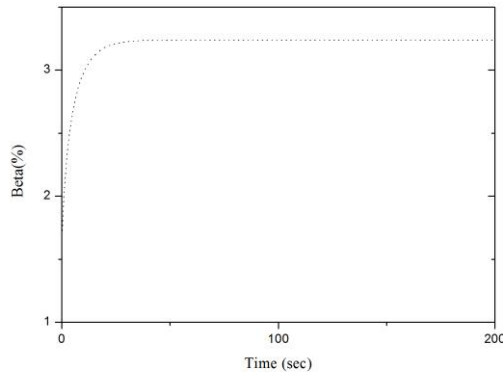
شکل (۱) - چگالی الکترونی پلاسمای $D-^3He$ بر حسب زمان در حالت پایداری گرمایی با اختلال $+50\%$ دما و 20% در چگالی آلفا



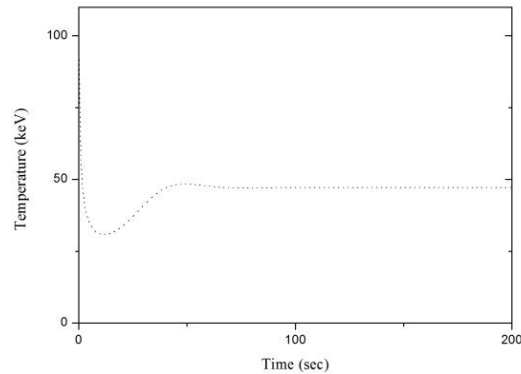
شکل (۴) - چگالی الکترونی پلاسمای $D-^3He$ بر حسب زمان در حالت پایداری گرمایی با اختلال $+50\%$ دما و 20% در چگالی آلفا



شکل (۳) - پارامتر β پلاسمای $D-^3He$ بر حسب زمان در حالت پایداری گرمایی با اختلال $+50\%$ دما و 20% در چگالی آلفا



شکل (۶) - پارامتر β پلاسما $D-^3He$ بر حسب زمان در حالت پایداری گرمایی با اختلال ۵۰٪- دما و ۲۰٪- در چگالی آلفا



شکل (۵) - دمای پلاسمای $D-^3He$ بر حسب زمان در حالت پایداری گرمایی با اختلال ۵۰٪- دما و ۲۰٪- در چگالی آلفا

بحث و نتیجه گیری :

همان‌طور که از شکل‌های ارائه شده در این کار، که با استفاده از مدل کنترل غیر خطی، وابستگی زمانی پارامترهای پلاسما را برای اختلال‌های مثبت و منفی بر شرایط اولیه پارامترهای پلاسما، بر حسب زمان نشان می‌دهند، پلاسما بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی، به نقاط تعادل اولیه که از لحاظ اقتصادی برای رآکتور مطلوب هستند، برخورد گشت بنابراین نتایج بدست آمده با استفاده از این مدل توانسته است شرایط ناپایداری گرمایی در پلاسمای واکنش همجوشی $D-^3He$ را حذف کند و پلاسما را به تعادل گرمایی برساند.

مراجع :

- [1] Chapman, John J. "Advanced fusion reactors for space propulsion and power systems." (2011).
- [2] El-Guebaly, Laila, and Massimo Zucchetti. "Recent developments in environmental aspects of D-3 He fuelled fusion devices." *Fusion engineering and design* 82, no. 4 (2007): 351-361.
- [3] Zucchetti, Massimo. "Exploration of Clearance Strategy for an Advanced-Fuel Fusion Experimental Device." *Fusion Science and Technology* 60, no. 2 (2011): 743-747.
- [4] Peng, YK M., and Dennis J. Strickler. "Features of spherical torus plasmas." *Nuclear Fusion* 26, no. 6 (1986): 769.
- [5] Sykes, Alan. "Overview of recent spherical tokamak results." *Plasma physics and controlled fusion* 43, no. 12A (2001): A127.
- [6] Lloyd, B., R. J. Akers, F. Alladio, Y. Andrew, L. C. Appel, D. Applegate, K. B. Axon et al. "Overview of physics results from MAST." *Nuclear fusion* 47, no. 10 (2007): S658.
- [7] Motevalli, Seyed Mohammad, and Fereshteh Fadaei. "A Comparison Between the Burn Condition of Deuterium-Tritium and Deuterium-Helium-3 Reaction and Stability Limits." *Zeitschrift für Naturforschung A* 70, no. 2 (2015): 79-84.
- [8] Galambos, John D., and Y-K. Martin Peng. "Ignition and burn criteria for D-3 He tokamak and spherical torus reactors." *Fusion Science and Technology* 19, no. 1 (1991): 31-42.

[۹] متولی سید محمد، فدایی فرشته. "پایداری گرمایی سوخت پلاسمای دوتریوم - تریتیوم در توکامک ITER" نوزدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران. مشهد ۱۳۹۱.

- [10] S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion: BeamPlasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter: BeamPlasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter*. Vol. Oxford University Press :125. 2004
- [11] Dawson, John M. "Advanced fusion reactors." *Fusion, part B, edited by: Teller, E* (1981): 465.
- [12] Stacey, Weston M. *Fusion: an introduction to the physics and technology of magnetic confinement fusion*. John Wiley & Sons, 2010.
- [13] Trubnikov, B. A. "Universal coefficients for synchrotron emission from plasma configurations." In *Reviews of Plasma Physics, Volume 7*, vol. 7, p. 345. 1979.
- [14] Bing-Ren, Shi. "Possibility of Establishing D-3He Fusion Reactor Using Spherical Tokamaks." *Chinese Physics Letters* 21, no. 9 (2004): 1783.

Burn control D-3He fusion reaction in spherical tokamak

Abstract:

In this work, thermally unstable of D-³He fusion reaction in equilibrium points (high density and low temperature) that is desirable in term of economical for fusion reactors, to be considered and then using the nonlinear control model, thermal instability removes of plasma and plasma reach to thermal stability.

Keywords: thermal stability, nonlinear model, D-³He fusion reaction.