

پایداری گرمایی سوخت پلاسمای دوتریوم - تریتیوم در توکامک ITER

سید محمد متولی (۱) - فرشته فدایی (۲)

۱ دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته ای

۲ دانشگاه پیام نور، گروه فیزیک

چکیده:

یکی از مسائل مهم در نیروگاههای همجوشی هسته ای آینده، وجود ناپایداری گرمایی ذاتی در راکتورهای گرمای هسته ای مانند توکامک است. در این کار تحقیقاتی، با استفاده از حل معادلات توازن انرژی و ذره در پلاسمای دوتریوم-تریتیوم، ناپایداری گرمایی را نشان داده و در نهایت با استفاده از روش پسگام غیر خطی این ناپایداری را برطرف کرده و پلاسمای دوتریوم-تریتیوم را به پایداری گرمایی می رسانیم.

کلمات کلیدی: ناپایداری پلاسمای، معادلات توازن انرژی و ذره، روش پسگام غیرخطی، پایداری پلاسمای.

مقدمه:

امروزه پیشرفتهای چشمگیری در زمینه دستیابی به مقادیری از دما، چگالی و زمان محصورسازی در حدود پارامترهای مورد نیاز برای ساخت یک نیروگاه همجوشی هسته ای انجام شده است. یکی از پروژه های عظیمی که دانشمندان، طراحان و مهندسان مختلف کشورهای جهان برای طراحی یک نیروگاه همجوشی انجام می دهند، توکامک بین المللی ITER می باشد [۱]. به منظور آنکه راکتور همجوشی هسته ای از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد، باید در مدت زمان طولانی در حالت پایدار سوخت پلاسمای در نقاط عملی که با Q بالا مشخص می شود، باقی بماند. در اینجا Q نسبت توان همجوشی به توان امدادی است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$Q = \frac{P_{fus}}{P_{aux}} \quad (1)$$

زمانی که $Q = \infty$ ($P_{aux} = 0$) باشد، راکتور در نقطه اشتعال عمل می کند و زمانیکه $Q < \infty$ ($P_{aux} \neq 0$) باشد، در نقطه زیراشتعال است. اگر این نقاط عمل در دمای پایین طراحی شده باشند دارای ویژگی ناپایداری ذاتی خواهند بود، به این معنا که هر اختلال کوچک وارد شده به پارامترهای پلاسمای، سیستم را از این نقاط عمل دور خواهد کرد و به نقاط عمل جدیدی می برد. این نتیجه این واقعیت است که در این نقاط وقتی دما افزایش می یابد، انرژی تولید شده توسط همجوشی بر انرژی از دست داده غلبه می کند و بر عکس. از طرفی، این نقاط عمل جدید در مناطقی با دمای بالا و چگالی پایین قرار دارند که این ویژگی آنها را از لحاظ

اقتصادی و تکنولوژیکی نامطلوب کرده است. در این مناطق ناپایدار، تغییرات کم دما منجر به افزایش توان شده و در نتیجه آن جهش قدرت راکتور را خواهیم داشت.

کنترل پلاسما جهت جلوگیری از این ناپایداریهای گرمایی، نه تنها برای نگهداشتن پلاسما در زمان طولانی تحت شرایط مناسب سوخت موثر است بلکه برای جلوگیری از تخریب پلاسما نیز ضروری خواهد بود. کنترل کننده می تواند اختلالات وارد شده به شرایط اولیه را از بین برده و پلاسما را مجبور کند به نقطه تعادل برگردد. روشهای مختلفی برای کنترل این ناپایداریها پیشنهاد شده و به صورت نظری تحلیل شده اند. در این روشها، اساساً سه نوع مختلف محرک کنترل در نظر گرفته شده اند که شامل کنترل توسط تعدیل توان امدادی [۳و۲]، تعدیل میزان تزریق [۵و۴] و تزریق کنترل شده ناخالصی است [۶].

در این کار تحقیقاتی، کنترل ناپایداری شرایط سوخت پلاسمای D-T در راکتور همجوشی را با محرک تعدیل توان امدادی و میزان تزریق به وسیله حل معادلات توازن انرژی و ذره در مدل صفر بعدی و با استفاده از روش پسگام غیر خطی، بررسی می کنیم.

ناپایداری پلاسما:

معادلات توازن انرژی- ذره در مدل صفر بعدی برای راکتور همجوشی D-T را در نظر می گیریم. در این مدل فرض شده الکترونها و یونها دارای توزیع ماکسولی هستند و هیچ ناخالصی با Z بالا نداریم.

$$\frac{dn_{\alpha}}{dt} = -\frac{n_{\alpha}}{k_{\alpha}\tau_E} + \left(\frac{n_{DT}}{2}\right)^2 \langle\sigma v\rangle \quad (2)$$

$$\frac{dn_{DT}}{dt} = -\frac{n_{DT}}{k_{DT}\tau_E} - 2\left(\frac{n_{DT}}{2}\right)^2 \langle\sigma v\rangle + \frac{n_n}{k_D\tau_E} \quad (3)$$

$$\frac{dn_n}{dt} = -\frac{n_n}{k_D\tau_E} + S \quad (4)$$

$$\frac{dE}{dt} = P_{aux} + \left(\frac{n_{DT}}{2}\right)^2 \langle\sigma v\rangle Q_{\alpha} + \eta j^2 + A_b Z_{eff} n_e^2 \sqrt{T} - \frac{E}{\tau_E} \quad (5)$$

در این معادلات n_{α} ، n_{DT} و n_n به ترتیب چگالی ذرات آلفا، D-T و سوخت خنثی می باشد. S میزان تزریق، P_{aux} چگالی توان امدادی، η مقاومت اسپیاترز، j چگالی جریان پلاسما، $Q_{\alpha} = 3.52 MeV$ انرژی ذرات آلفا و $A_b = 4.85 \times 10^{-37} Wm^3 / \sqrt{kev}$ ضریب تابش ترمزی می باشد. در معادلات فوق Z_{eff} و n_e نیز از روابط زیر بدست می آیند:

¹ Spitzer



$$Z_{eff} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{n_e} = \frac{n_{DT} + 4n_\alpha}{n_e} \quad (6)$$

$$n_e = n_{DT} + 2n_\alpha \quad (7)$$

برای محاسبه $\langle \sigma v \rangle$ از رابطه زیر استفاده می کنیم [۶]:

$$\langle \sigma v \rangle = 3.68 \times 10^{-18} \cdot \frac{1}{T^{2/3}} \cdot \exp\left(\frac{-19.94}{T^{1/3}}\right) (m^3 \cdot sec^{-1})$$

در این رابطه T دمای پلاسما است. زمان محصور سازی انرژی τ_E نیز با توجه به مدل ITER۹۰H-P [۸] از رابطه زیر بدست می آید:

$$\tau_E = 0.082 k I^{1.02} R^{1.6} B^{0.15} A_i^{0.5} k_\chi^{-0.19} P_{net}^{-0.47} \quad (9)$$

پارامترهای استفاده شده در رابطه فوق در جدول (۲) قرار دارد و A_i عدد ایزوتوپی می باشد که برای مخلوط دوتریوم و تریتیوم به نسبت ۵۰:۵۰، ۲.۵ است و فاکتور مقیاس f به مد محصورسازی و پارامترهای توکامک ITER وابسته است [۷].

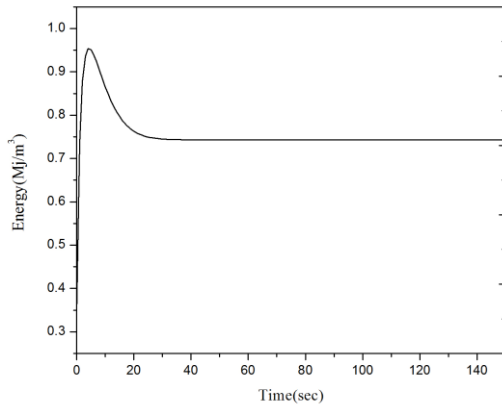
معادلات توازن انرژی- ذره را به صورت عددی حل می کنیم [۸]. سپس با استفاده از اطلاعات جدول (۳) و وارد کردن اختلال ۲۰٪ - به چگالی و ۱۰٪ - به انرژی پلاسما دوتریوم-تریتیوم، چگالی الکترونی n_e و انرژی پلاسما دوتریم-تریتیوم را در زمانهای مختلف محاسبه و نتایج حاصل را در نمودارهای شکل (۱) و (۲) نشان داده ایم. شکل (۱) وابستگی زمانی چگالی الکترونی پلاسما و شکل (۲) انرژی پلاسما را بر حسب زمان نشان می دهد. نتایج حاصل از محاسباتمان نشان می دهد، با وارد کردن اختلال به شرایط اولیه پس از گذشت مدت زمان کوتاهی چگالی الکترونی و انرژی پلاسما از مقادیر اولیه شان که همان نقاط عمل اولیه پلاسما می باشند، دور شده و به نقاط عمل دیگری می روند و در این نقاط باقی می ماند، که به این ویژگی ناپایداری گرمایی پلاسما می گویند.

جدول شماره (۲): پارامترهای ITER [۹].

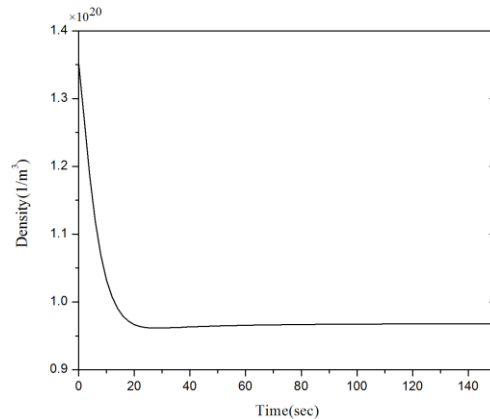
I	R	a	B	k_χ	τ_α	τ_{DT}	τ_D	V
22MA	6.0m	2.15m	4.85T	2.2	$7\tau_E$	$3\tau_E$	$1\tau_E$	1100m ³

جدول شماره (۳): شرایط اولیه پلاسما [۹].

n_α	n_{DT}	P_{aux}	T	S	E
$0.61 \times 10^{19} m^{-3}$	$13 \times 10^{19} m^{-3}$	0	6keV	$4 \times 10^{18} / s.m^3$	$4.21 \times 10^5 J.m^{-3}$



شکل ۲: انرژی پلاسما دوتریوم-تریوم بر حسب زمان.



شکل ۱: چگالی الکترونی پلاسما دوتریوم-تریوم

بر حسب زمان

پایداری پلاسما:

حال به منظور کنترل این ناپایداری گرمایی، با استفاده از روش پسگام غیرخطی [۱۰]، P_{aux} و S را به عنوان پارامترهای کنترل بکار می‌بریم:

$$P_{aux} = \frac{\bar{E}}{\tau_E} - \left(\frac{n_{DT}}{2} \right)^2 \langle \sigma v \rangle Q_\alpha - \eta j^2 + A_b Z_{eff} n_e^2 \sqrt{T} \quad (10)$$

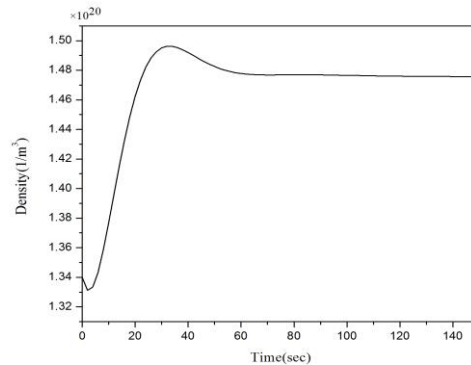
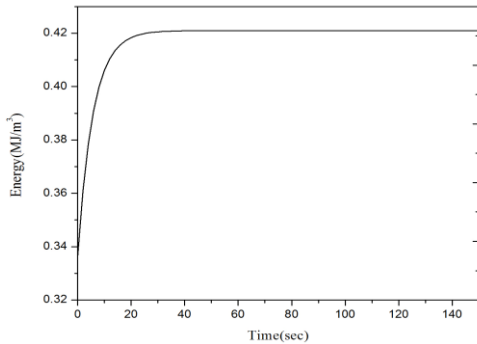
و برای میزان تزریق داریم:

$$S = -((n_n - \bar{n}_n) - \alpha) + \alpha \eta j - \frac{(n_{DT} - \bar{n}_{DT})}{k_{DT} \tau_E} + \frac{n_n}{k_D \tau_E} \quad (11)$$

که در این معادله داریم:

$$\alpha = \frac{1}{\tau_d} \left[2 \left(\frac{n_{DT} - \bar{n}_{DT}}{2} \right)^2 \langle \sigma v \rangle + \frac{\bar{n}_{DT}}{\tau_{DT}} + 2 \left(\frac{\bar{n}_{DT}}{2} \right)^2 \langle \sigma v \rangle - \frac{\bar{n}_n}{\tau_d} \right] \quad (12)$$

با قرار دادن پارامترهای فوق و حل مجدد معادلات جفت شده توازن انرژی و ذره با وارد کردن اختلال 20% - به چگالی پلاسما و اختلال 10% - به انرژی پلاسما دوتریوم-تریوم، انرژی E و چگالی الکترونی n_e پلاسما را زمانهای مختلف محاسبه و نتایج حاصل از محاسباتمان را در نمودارهای شکل ۳ و ۴ نشان داده ایم.



شکل (۳): چگالی الکترونی پلاسمای دوتریوم-تری‌تیوم با اختلال ۲۰٪ - به انرژی و ۱۰٪ - به چگالی، بر حسب زمان.

شکل (۴): انرژی پلاسمای دوتریوم-تری‌تیوم با اختلال ۲۰٪ - به انرژی و ۱۰٪ - به چگالی، بر حسب زمان.

بحث و نتیجه گیری:

در این کار تحقیقاتی، ابتدا با وارد کردن اختلال ۲۰٪ - به چگالی و ۱۰٪ - به انرژی پلاسمای دوتریوم-تری‌تیوم، معادلات توازن انرژی- ذره پلاسمای را به صورت عددی حل کرده و با رسم نمودارهای چگالی الکترونی و انرژی پلاسمای ناپایداری گرمایی پلاسمای را نشان داده ایم. سپس با استفاده از پارامترهای کنترل (S و P_{aux}) در روش پسگام غیرخطی، ناپایداری گرمایی پلاسمای را از بین برده و پلاسمای را مجدداً به شرایط اولیه که دارای ویژگی دمایی کم و چگالی بالا است، بر گردانیم. همانطور که از نمودارهای شکل ۳ و ۴ مشاهده می شود، پس از گذشت زمان حدود ۲۵ ثانیه، انرژی و چگالی الکترونی پلاسمای به مقادیر تعادل اولیه اش برمی گردند. بنابراین با استفاده از پارامترهای کنترل، ناپایداری گرمایی موجود در پلاسمای دوتریوم-تری‌تیوم را از بین برده و پلاسمای سوخت مورد نظر را به پایداری گرمایی رسانده ایم.



مراجع :

- [۱] W. M. Stacey, "Tokamak D-T fusion neutron source requirements for closing the nuclear fuel cycle", *Nuclear Fusion* ۴۷, ۲۱۷ (۲۰۰۷).
- [۲] L. Bromberg *et al.*, "Active burn control of nearly ignited plasmas", *Nuclear Fusion* ۲۰, ۲ (۱۹۸۰).
- [۳] T. P. Goodman *et al.*, "Sawtooth Pacing by Real-Time Auxiliary Power Control in a Tokamak Plasma", *Phys. Rev. Lett.* ۱۰۶, ۲۴۵۰۰۲ (۲۰۱۱).
- [۴] J. Mandrekas *et al.*, "Evaluation of different control methods for the thermal stability of the International Thermonuclear Experimental Reactor", *Fusion Technology* ۱۹, ۱ (۱۹۹۱).
- [۵] W. Hui *et al.*, "Robust burn control of fusion reactors with modulation of refueling rate", *Fusion Technology* ۲۶, ۳ (۱۹۹۴).
- [۶] M. D. Boyer *et al.*, "Zero-dimensional nonlinear burn control using isotopic fuel tailoring for thermal excursions", *Proc. Control Applications* (۲۰۱۱).
- [۷] H. S. Bosch, G. M. Hale, "Improved Formulas for Fusion Cross-Sections and Thermal Reactivities", *Nuclear Fusion* ۳۲, ۶۱ (۱۹۹۲).
- [۸] N. Uckan, "Confinement capability of ITER-EDA design", *Fusion Engineering* ۱, ۱۸۳ (۱۹۹۴).
- [۹] S. M. Motevalli and F. Fadaei, "Study of effects of different reactions on plasma parameters in D-T magnetic confinement fusion", *Int. J. Mod. Phys. E* ۱۲, ۱۲۵۰۰۷۸ (۲۰۱۲).
- [۱۰] D. Post *et al.*, "ITER Operation Scenarios", Documentation ITER/US/۹۱/PC-۰۶-۲, p.۷, (۱۹۹۱).
- [۱۱] H. K. Khalil, *Nonlinear systems*, ۲nd Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (۱۹۹۶).