



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

تأثیر کسرهای تریتیوم بر پارامترهای پلاسمای راکتور همجوشی هسته ای نوع توکامک

سید محمد متولی، نوشین دشتیان

دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته ای

چکیده:

برهم کنش دوتریوم-تریتیوم نوید بخش ترین برهم کنش همجوشی هسته ای می باشد که به کمترین انرژی ورودی ($\sim 10 \text{ KeV}$) و کمترین دما ($\sim 10^8$) در مقایسه با سایر واکنش ها نیازمند است. در این کار پژوهشی، ما معادلات تعادل چگالی و انرژی گرمایی را حل نموده و سپس پارامترهای مهم پلاسمای راکتور همجوشی هسته ای توکامک، پلاسمای تعادل، کسر تریتیوم.

کلید واژه: همجوشی هسته ای، توکامک، پلاسمای تعادل، کسر تریتیوم.

مقدمه

یکی از روشهای همجوشی هسته ای، همجوشی به روش محصورسازی مغناطیسی می باشد. در این روش برای محصورسازی ذرات پلاسمای از میدانهای مغناطیسی قوی استفاده می شود. راکتورهای همجوشی توکامک از جمله توکامک ITER در این زمینه طراحی شده اند [۱]. مناسبترین سوخت برای همجوشی ترکیب دوتریوم و تریتیوم می باشد. ترکیب یونهای تزریق شده می تواند تغییر کند. پارامتر p به عنوان کسر تریتیوم معرفی می شود. با فرض اینکه یونهای تزریق شده به پلاسمای سریعاً توسط برخورد آنها انرژی خود را به ذرات مشابه منتقل می کنند و به تعادل انرژی می رسند و همچنین با فرض اینکه ذرات آلفای تولید شده در واکنش همجوشی D-T سریعاً انرژی خود را در یونها و الکترونها توزیع می کنند، قادر خواهیم بود که انرژی میانگین هر نوع ذره را با پارامتر تکی دما که به انرژی توسط رابطه $E = \frac{3}{2}kT$ وابسته است تعیین کنیم [۲]. هنگامیکه کنترل وجود نداشته باشد، سیستم نقاط تعادل دلخواه (ناپایدار) را ترک می کند و روی یک نقطه با دمای بالاتر و چگالی پایین تر (پایدار) قرار می گیرد که غیر اقتصادی است [۳].

مدل محاسباتی

ترکیب یونهای تزریق شده دوتریوم و تریتیوم می تواند تغییر کند. معادله تعادل ذره سوخت یونیزه شده دوتریوم-تریتیوم به صورت زیر می باشد [۲]:



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$(۱) \frac{dn_{DT}}{dt} = I_0 - 2p(1-p)n_{DT}^2 \langle \sigma v \rangle - \frac{n_{DT}}{\tau_p}$$

که در آن چگالی سوخت دوتریوم-تریٹیوم، p کسر تریٹیوم، I_0 میزان تزریق یونها و τ_p زمان محصور سازی سوخت دوتریم-تریٹیوم است. معادله تعادل ذره آلفا به صورت زیر بیان می شود:

$$(۲) \frac{dn_{\alpha}}{dt} = p(1-p) \langle \sigma v \rangle n_{DT}^2 - \frac{n_{\alpha}}{\tau_{\alpha}}$$

n_{α} چگالی ذره آلفا و τ_{α} زمان محصورسازی ذره آلفا می باشد. در اینجا فرض می شود که ذرات آلفای تولید شده در برهم کنش دوتریوم-تریٹیوم به طور آنی انرژی خود را به یونها و الکترون ها منتقل می کنند. معادله توازن انرژی به صورت زیر می باشد [۳]:

$$(۳) \frac{dE}{dt} = P_{\alpha} - \frac{E}{\tau_E} - P_{rad} + P_{ohmic}$$

E انرژی پلاسما، τ_E زمان محصور سازی انرژی، $Q_{\alpha} = 3.52 MeV$ انرژی ذره آلفا می باشد. اتلاف تابشی با رابطه زیر داده می شود:

$$(۴) P_{rad} = P_{brem} = A_b Z_{eff} n_e^2 \sqrt{2}$$

در این رابطه T دمای پلاسما، دمای الکترون ها و یونها برابر در نظر گرفته می شود. A_b ضریب تابش برمشترلانگ، چگالی الکترون ها $n_e = n_{DT} + 2n_{\alpha}$ از شرط خنثایی بار معلوم می شود. Z_{eff} چگالی بار مؤثر به صورت زیر می باشد:

$$(۵) Z_{eff} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{n_e} = \frac{n_{DT} + 4n_{\alpha}}{n_e}$$

توان اهمی از رابطه زیر تعیین می شود:

$$(۶) P_{ohmic} = \eta j^2$$

η مقاومت اسپایتزر و j چگالی جریان پلاسما می باشد.

$$(۷) P_{\alpha} = Q_{\alpha} p(1-p) n_{DT}^2 \langle \sigma v \rangle$$

مجموعه معادلات بالا می تواند به صورت معادله زیر تغییر یابد [۴]:

$$(۸) \frac{dn_e}{dt} = I_0 - \left(\frac{2f}{\tau_{\alpha}} + \frac{1-2f}{\tau_p} \right) n_e$$

$$(۹) \frac{df_{\alpha}}{dt} = n_e (1 - 2f_{\alpha})^2 p(1-p) \langle \sigma v \rangle - \frac{f_{\alpha}}{n_e} I_0 + f_{\alpha} (1 - 2f_{\alpha}) \left(\frac{1}{\tau_p} - \frac{1}{\tau_{\alpha}} \right)$$



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2}{3} \frac{P_{ohmic}}{n_e(2-f_\alpha)} + p(1-p)n_e \frac{(1-2f_\alpha)^2}{2-f_\alpha} \langle \sigma v \rangle \left(\frac{2}{3} Q_\alpha + T \right) - \frac{2TI_0}{n_e(2-f_\alpha)} - \frac{2}{3} A_b \frac{1+2f_\alpha}{2-f_\alpha} n_e \sqrt{T} - \frac{T}{\tau_E} + \quad (10) \quad 2 \frac{1-2f_\alpha}{2-f_\alpha} \frac{T}{\tau_p} + \frac{3f_\alpha}{2-f_\alpha} \frac{T}{\tau_\alpha}$$

که در آن $f_\alpha = \frac{n_\alpha}{n_e}$ نسبت چگالی هلیوم به چگالی الکترون است. توان گرمایشی خالص پلازما از رابطه زیر به دست می آید:

$$(11) P_{net} = V_{core}(P_\alpha + P_{ohmic} - P_{rad})$$

در آن V_{core} حجم پلازما است.

در معادلات فوق زمان محصور سازی انرژی با توجه به پارامترهای توکامک ITER از رابطه زیر به دست می آید [۵]:

$$(12) \tau_E = 0.082 I_p^{1.02} R^{1.6} B_0^{0.15} A_i^{0.5} \kappa_x^{-0.19} P_{net}^{-0.47}$$

که در آن I_p جریان پلازما، B_0 میدان مغناطیسی، A_i عدد ایزوتوپیک، κ_x کشیدگی در x است. همچنین داریم:

$$(13) \tau_p = 3\tau_E \quad \text{و} \quad \tau_\alpha = 7\tau_E$$

کسر سوخت به صورت زیر تعریف می شود:

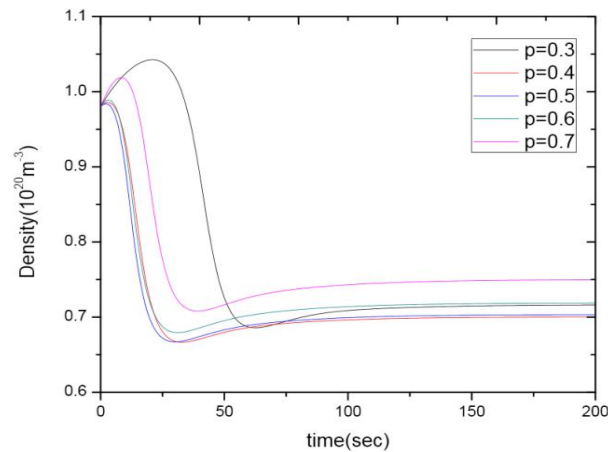
$$(14) f_b = \frac{2p(1-p)\langle \sigma v \rangle}{2p(1-p)\langle \sigma v \rangle + \frac{1}{n_D T \tau_p}}$$

با حل معادلات فوق نمودارهای چگالی، دما و توان خالص پلازما بر حسب زمان در کسرهای مختلف تریتیوم برابر با ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ رسم شده است. نمودارها نشان می دهند که سیستم پس از مختل شدن، با گذشت زمان از یک نقطه تعادل ناپایدار با دمای پایین و چگالی بالا به یک نقطه تعادل پایدار با دمای بالاتر و چگالی پایین تر حرکت می کند که از نظر اقتصادی نامطلوب است.



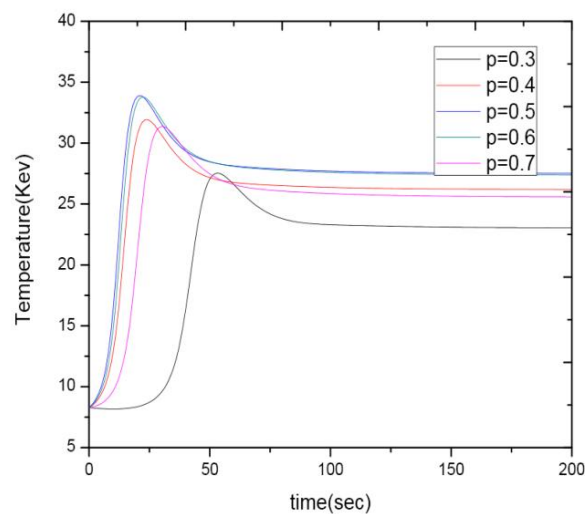
بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۱: نمودار چگالی بر حسب زمان در کسرهای مختلف تریوم.

با توجه به نمودار ۱ چگالی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و سرانجام ثابت می‌شود زمانی که کسر تریتیوم $0/3$ انتخاب شود در مقایسه با سایر کسرها چگالی به مقدار بیشتری افزایش یافته و پس از گذشت حدود ۶۰ ثانیه به حداقل مقدار خود می‌رسد اما در سایر کسرهای انتخاب شده چگالی پس زمان حدود ۳۰ ثانیه به حداقل مقدار خود می‌رسند.



شکل ۲: نمودار دما بر حسب زمان در کسرهای مختلف تریتیوم.

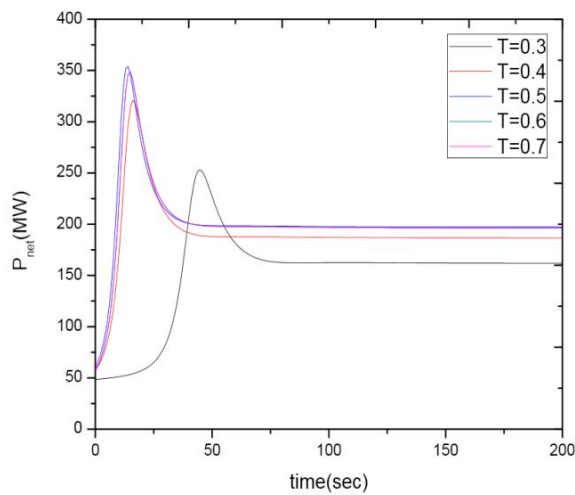


بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شکل ۲ نشان می دهد که دما در پلاسما نسبت به زمان ابتدا سیر نزولی دارد تا به مقدار بیشینه خود برسد و سپس کاهش پیدا می کند. زمانی که کسر تریتیوم $0/3$ انتخاب شده باشد مقدار بیشینه دما حدود 27keV است و در دمای حدود 24keV نیز به تعادل می رسد که در مقایسه با سایر کسرهای کمتر می باشد و این از نظر اقتصادی و تکنولوژیکی مساعدتر است.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که توان خالص پلاسما ابتدا سیر نزولی دارد و سپس به تعادل می رسد. زمانی که کسر تریتیوم مساوی $0/3$ انتخاب شود پس از گذشت 50 ثانیه توان خالص به مقدار ماکزیمم خود می رسد اما در سایر کسرهای پس از گذشت حدود 10 ثانیه، از طرفی در کسر $0/3$ مقدار بیشینه توان حدود برابر 250 MW است و مقدار تعادل آن نیز حدودا برابر 170 MW است که در مقایسه با سایر کسرهای کمتر می باشد.

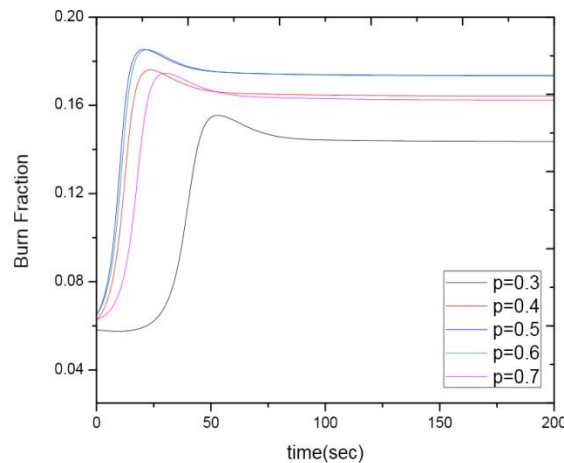


شکل ۳: نمودار توان خالص پلاسما بر حسب زمان در کسرهای مختلف تریتیوم.



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۴: نمودار کسر سوخت بر حسب زمان.

نمودار ۴ کسر سوخت را بر حسب زمان برای کسرهای مختلف تریتیوم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده میکنیم، کسر سوخت ابتدا روند صعودی دارد و سپس به مقدار ثابتی میرسد. هنگامیکه کسر تریتیوم ۰/۳ انتخاب شود، پس از گذشت حدود ۵۰ ثانیه کسر سوخت به مقدار بیشینه خود رسیده و سپس به مقدار ثابت ۰/۱۴ میرسد که نسبت به سایر کسرهای تریتیوم کمتر میباشد.

نتیجه گیری:

با تغییر در ترکیب یونهای سوخت تزریق شده مشاهده می‌شود که چگالی پلاسما کاهش و دما افزایش می‌یابد. زمانی که میزان تریتیوم تزریق شده ۳۰٪ و دوتریوم ۷۰٪ باشد نقطه تعادل جدید در مقایسه با سایر کسرهای انتخابی در دمای پایین تری قرار می‌گیرد و به نظر میرسد که این ترکیب مناسب ترین ترکیب برای سوخت دوتریوم-تریتیوم باشد. همچنین توان خالص و کسر سوخت نیز در این ترکیب کمترین مقدار را دارند.

مرجع‌ها

- [1] K. Ikeda, Progress in the "ITER Physics Basis" Nuclear Fusion 47, 6 (2007).
- [2] W. M. Stacy, "Operating Regimes Of Controlled Thermonuclear Reactors and Stability Against Fundamental-Mode In Particle Densities and Temperatures"; *ibid.*, 13, 843 (1973).
- [3] E. Schuster and M. Krstic, "Nonlinear Lyapunov-based burn control in fusion reactors"; *Fusion Energy* 63, 569 (2002).



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- ;"Robust burn control of fusion reactors with modulation of refueling rate".[4] W. Hui et al
Fusion Technology 26, 3 (1994).
- "Stabilization of burn conditions in a thermonuclear reactor [5] J. Vitela and J. Maritell,
using artificial neural networks", Plasma Phys. Control. Fusion 40, 295 (1998).