

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (GAN)

مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛
شبکه های توجه گرافی
(Graph Attention Networks)



آموزش استفاده از وب آو ساینس

کارگاه آنلاین آموزش استفاده از
وب آو ساینس



کارگاه آنلاین مقاله روزمره انگلیسی



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

تأثیر کسرهای تریتیوم بر پارامترهای پلاسمای راکتور همجوشی هسته‌ای نوع توکامک

سید محمد متولی، نوشین دشتیان

دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

برهم کنش دوتریوم-تریتیوم نوید بخش ترین برهم کنش همجوشی هسته‌ای می‌باشد که به کمترین انرژی ورودی ($\sim 10\text{KeV}$) و کمترین دما ($\sim 10^8$) در مقایسه با سایر واکنش‌ها نیازمند است. در این کار پژوهشی، ما معادلات تعادل چگالی و انرژی گرمایی را حل نموده و سپس پارامترهای مهم پلاسمای راکتورهای تریتیوم مختلف مورد بررسی قرار می‌دهیم.

کلید واژه: همجوشی هسته‌ای، توکامک، پلاسمای، معادله تعادل، کسر تریتیوم.

مقدمه

یکی از روشهای همجوشی هسته‌ای، همجوشی به روش محصورسازی مغناطیسی می‌باشد. در این روش برای محصورسازی ذرات پلاسمای از میدانهای مغناطیسی قوی استفاده می‌شود. راکتورهای همجوشی توکامک از جمله توکامک ITER در این زمینه طراحی شده اند [۱]. مناسبترین سوخت برای همجوشی ترکیب دوتریوم و تریتیوم می‌باشد. ترکیب یونهای تزریق شده می‌تواند تغییر کند. پارامتر p به عنوان کسر تریتیوم معرفی می‌شود. با فرض اینکه یونهای تزریق شده به پلاسمای سریعاً توسط برخوردها انرژی خود را به ذرات مشابه منتقل می‌کنند و به تعادل انرژی می‌رسند و همچنین با فرض اینکه ذرات آلفای تولید شده در واکنش همجوشی D-T سریعاً انرژی خود را در یونها و الکترونها توزیع می‌کنند، قادر خواهیم بود که انرژی میانگین هر نوع ذره را با پارامتر p 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 می‌کند و روی یک نقطه با دمای بالاتر و چگالی پایین تر (پایدار) قرار می‌گیرد که غیر اقتصادی است [۳].

مدل محاسباتی

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



بیست و یکمین کنفرانس هفتای 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 محصور سازی 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 الکترونها 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، $Q_{\alpha} = 3.52 \text{ MeV}$ 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 الکترونها و یونها برابر در نظر گرفته می شود. A_b ضریب تابش برمشترلانگ، چگالی الکترونها $n_e = n_{DT} + 2n_{\alpha}$ 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 اسپایترز 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 هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2}{3} \frac{P_{ohmic}}{n_e(2-f_\alpha)} + p(1-p)n_e \frac{(1-2f_\alpha)^2}{2-f_\alpha} \langle \sigma v \rangle \left(\frac{2}{3} Q_\alpha + T \right) - \frac{2T I_0}{n_e(2-f_\alpha)} - \frac{2}{3} A_b \frac{1+2f_\alpha}{2-f_\alpha} n_e \sqrt{T} - \frac{T}{\tau_E} + (10) 2 \frac{1-2f_\alpha}{2-f_\alpha} \frac{T}{\tau_p} + \frac{3f_\alpha}{2-f_\alpha} \frac{T}{\tau_\alpha}$$

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

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

در آن V_{core} حجم پلاسما است.

در معادلات فوق زمان محصور سازی انرژی با توجه به پارامترهای توکامک ITER از رابطه زیر به دست می‌آید [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 پلاسما، 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 می‌شود:

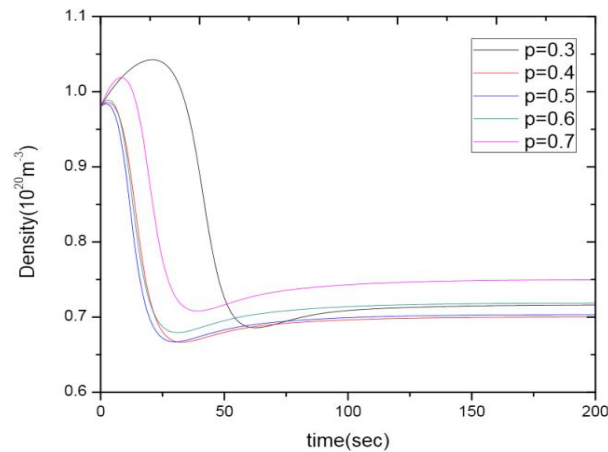
$$(14) f_b = \frac{2p(1-p)\langle \sigma v \rangle}{2p(1-p)\langle \sigma v \rangle + \frac{1}{n_D T \tau_p}}$$

با حل معادلات فوق نمودارهای چگالی، دما و توان خالص پلاسما 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 می‌دهند 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 پایین‌تر حرکت می‌کند که از نظر اقتصادی نامطلوب است.



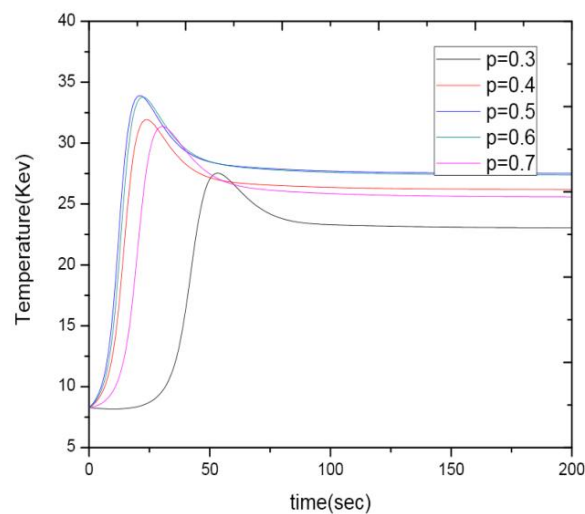
بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

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 از زمان حدود ۳۰ ثانیه به حداقل مقدار خود می‌رسند.



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

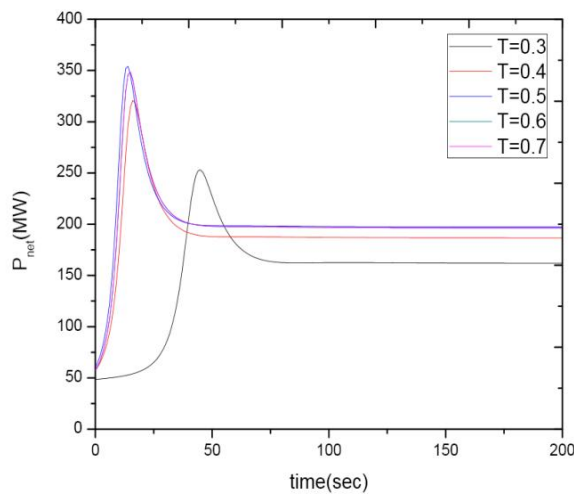


بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

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

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که توان خالص پلاسما ابتدا سیر نزولی دارد و سپس به تعادل می‌رسد. زمانی که کسر تریتیوم مساوی $0/3$ انتخاب شود پس از گذشت 50 ثانیه توان خالص به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد 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 می‌باشد.

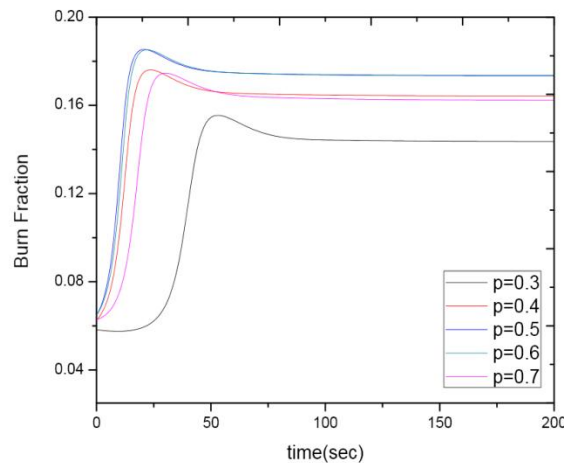


شکل ۳: نمودار توان خالص پلاسما بر حسب زمان در کسرهای مختلف تریتیوم.



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای 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 $0/3$ انتخاب شود، پس از گذشت حدود ۵۰ ثانیه کسر سوخت به مقدار بیشینه خود رسیده و سپس به مقدار ثابت $0/14$ 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 30% و دوتریوم 70% 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.

مرجع ها

- [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 هسته‌ای 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).

Archive of SID

SID



سرویس های
ویژه



سرویس ترجمه
تخصصی



کارگاه های
آموزشی



بلاگ
مرکز اطلاعات علمی



عضویت در
خبرنامه



فیلم های
آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛
شبکه های توجه گرافی
(Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین آموزش استفاده از
وب آوساینس



کارگاه آنلاین مقاله روزمره انگلیسی