



بررسی تاثیر غلظت هلیوم بر مکانیزم اتلاف تابشی در راکتور هم‌جوشی ITER

لیلا رجب‌لو^{۱*}، سید محمد متولی^۱، فرشته فدایی^۲

۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، صندوق پستی: ۴۷۴۱۵-۴۱۶، بابلسر-ایران
۲. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران-ایران

چکیده

اولین سوختی که در هم‌جوشی هسته‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد سوخت دوتریوم-تری‌تیوم است. در طی این واکنش دوتریوم و تری‌تیوم با یکدیگر واکنش داده و در نتیجه آن ذرات آلفا و نوترون تولید می‌شود. کل انرژی ناشی از این واکنش برابر با 18.3 MeV می‌باشد. انرژی ذرات آلفا تولید شده در این واکنش نیز معادل 3.52 MeV است. تجمع ذرات آلفا در پلاسمای هم‌جوشی موجب افزایش هدررفت انرژی از طریق مکانیزم تابش می‌شود. بررسی تاثیر میزان غلظت این ذرات نقش مهم و اساسی در مسیر دستیابی به تولید انرژی هم‌جوشی اقتصادی خواهد داشت. در این پژوهش، تحولات زمانی توان‌های اتلافی شامل تابش ترمزی، تابش خطی، تابش باز ترکیب، توان خالص پلازما و زمان محصورسازی انرژی با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف غلظت ذره آلفا بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. هدف اصلی در این پژوهش مطالعه و بهینه سازی عملکرد پلازما با بررسی مکانیزم‌های اتلافی در راکتورهای هم‌جوشی مانند توکامک ایتر است.

کلیدواژه‌ها: ذره آلفا، توان تابشی، توان خالص پلازما، زمان محصورسازی انرژی

Investigation of the effect of helium concentration on radiation loss mechanism in ITER fusion reactor

Leila Rajabloo^{1,*}, S. Mohammad Motevalli¹, Fereshteh Fadaei²

1. Department of Nuclear Physics, Faculty of Sciences, University of Mazandaran,
P.O.BOX: 44415-416, Babolsar, Iran.

2. Department of Physics, Payam Noor University, P.O.BOX: 19395-3697, Tehran, Iran.

Abstract

The first fuel to be considered in nuclear fusion is deuterium-tritium. In this reaction, deuterium and tritium react with each other to produce alpha and neutron particles. The total energy from this reaction is equal to 18.3 MeV. The energy of the produced alpha particles in this reaction is equivalent to 3.52 MeV. Accumulation of Alpha particles in fusion plasma enhances energy loss through the radiation mechanism. Investigating the effect of these particles will play a key role in the path towards achievement of economic fusion power production. In this study, the temporal evolution of radiation power including Bremsstrahlung radiation, Recombination and Line radiation, net plasma power and energy confinement time have been investigated by considering different ratios of alpha particles density. The main purpose of this study is to study and optimize plasma operation by investigating the radiation mechanisms in fusion reactors such as ITER tokamak.

Keywords: Alpha particle, Radiation power, Net plasma power, Energy confinement time.



۱. مقدمه

با توجه به این که در همجوشی هسته ای باید بر دافعه کولنی غلبه کرد اولین سوختی که مورد استفاده قرار میگیرد سوخت دوتریوم-تریتیوم است [۱]. یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از انرژی هم‌جوشی به کار بردن روشی است که بتواند پلاسما را تا دماهای بالا گرم کند و آن را برای مدت زمان کافی محصور سازد. هم‌چنین پلاسما را نمی‌توان به طور کامل محصور کرد، زیرا ذرات و حرارت از مرکز پلاسما به سمت خارج پخش می‌شود و این یکی از دلایل اتلاف انرژی در پلاسما است [۲]. در پلاسمای هم‌جوشی، شتاب گرفتن ذرات به دلیل اثرات متقابل و تعامل با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منجر به انتشار تابش‌های الکترومغناطیسی می‌شود. لازم به ذکر است که تشعشعات یک مکانیسم اصلی از هدررفت انرژی در پلاسما و هم‌چنین یک ابزار تشخیصی مفید است [۳]. تولید ذره آلفا به عنوان خاکستر ناشی از سوختن سوخت D-T معرفی می‌شود و تاثیر حضور آن بر شرایط سوختن در بسیاری از پژوهش‌ها مورد توجه است [۴]. عدم کنترل تجمع ذرات آلفا منجر به رشد نسبی غلظت ذره آلفا شده، و این رویداد موجب کارکرد نامطلوب اقتصادی راکتور می‌شود. در اینکار تحقیقاتی، با در نظر گرفتن غلظت‌های مختلف ذره آلفا و حل معادلات مربوط به چگالی توان‌های اتلافی، توان خالص پلاسما و زمان محصور سازی انرژی، تاثیر حضور این ذرات را بر عملکرد راکتور هم‌جوشی ایترا^۲ که یک راکتور توکامک هم‌جوشی با سوخت D-T است، مورد بررسی قرار می‌دهیم.

¹ Ash

²ITER

۲. روش کار

در این پژوهش، تاثیر نسبت های مختلف غلظت ذره آلفا در پلاسمای هم‌جوشی را با حل معادلات مربوط به توان‌های تابشی که شامل جملات مربوط به چگالی توان تابش ترمزی^۴، تابش خطی^۵، تابش بازترکیب^۶، هم‌چنین معادلات مربوط به چگالی توان خالص پلازما و زمان محصورسازی را با در نظر گرفتن دماهای یکسان برای یون و الکترون $T_i=T_e=T$ مورد بررسی قرار دادیم.

تابش ترمزی ناشی از حرکت شتابدار ذره باردار است، به ویژه اگر این تابش توسط یک الکترون که ذره باردار دیگر سبب انحراف آن شده باشد، تولید شود [۵]. چگالی توان تابش ترمزی به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$P_{Bremsstrahlung} (W / m^3) = A_b Z_{eff} n_e^2 T^{(1/2)} \quad (1)$$

در رابطه بالا، T ، دما و بر حسب keV و n_e چگالی الکترونی است که از رابطه $n_e = n_D + n_T + 2n_\alpha + Z_I n_I$ بدست می‌آید و A_b ضریب ثابت تابش ترمزی است. Z_{eff} نیز چگالی بار موثر است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Z_{eff} = \frac{\sum n_i Z_I}{n_i} \quad (2)$$

در رابطه فوق، Z_I عدد اتمی ناخالصی است و چگالی ذرات بر حسب m^{-3} می‌باشد [۶].

گذار الکترون‌های مداری در اتم‌های ناخالصی یونیزه در پلازما یکی از فرایندهای مهم تابش در پلازما محسوب می‌شود. در پی برانگیختگی تصادفی یک الکترون مداری در یک اتم ناخالصی یونیزه، حالت برانگیخته با انتشار فوتون به حالت پایه برمی‌گردد که انرژی آن معادل تفاوت سطح انرژی حالت پایه و برانگیخته است. بازگشت یک یون از حالت برانگیخته به حالت پایه از طریق تابش خطی است. به طور معمول چگالی توان هدررفت ناشی از این تابش خطی را می‌توان بر اساس رابطه زیر بیان کرد:

$$P_L (W / m^3) = 1.38 \times 10^{(-38)} (nD + nT + 16n\alpha + Z_I^4 n_I) n_e T^{(-1/2)} \quad (3)$$

هنگامی که یک یون و یک الکترون باهم برخورد کنند، خصوصاً در سرعت نسبی کم، احتمال دارد که از بازترکیب آن‌ها یک اتم خنثی به وجود آید و اگر به جهت پایستگی تکانه، یک فوتون گسیل شود، فرایند را بازترکیب تابشی می‌نامند. چگالی توان بازترکیب به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$P_{Rec} (W / m^3) = 4.1 \times 10^{(-40)} (nD + nT + 64n\alpha + Z_I^6 n_I) n_e T^{(-3/2)} \quad (4)$$

در این پژوهش، از تابش سیکلوترونی که در اثر حرکت ذرات باردار ساطع می‌شود چشمپوشی شده است [۷، ۸، ۹].

هم‌چنین چگالی توان گرمایش خالص پلازما از رابطه زیر به دست می‌آید.

⁴Bremsstrahlung radiation

⁵ Line radiation

⁶ Recombination radiation



$$P(MW) = V (P_{Alpha} + P_{Ohmic} + P_{Aux} - P_{Bremsstrahlung} - P_{Line} - P_{Recombination}) \quad (5)$$

که در عبارت فوق V ، حجم پلاسما و P_{Aux} ، چگالی توان کمکی است. چگالی توان ذره آلفا P_{Alpha} از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_{Alpha} (MW / m^3) = n_D n_T \langle \delta v \rangle_{DT} Q \quad (6)$$

همچنین $Q_\alpha = 3.52 \text{ MeV}$ ، انرژی ذره آلفا بعد از واکنش است [۱۰]. در رابطه فوق، $\langle \sigma v \rangle_{DT}$ سطح مقطع واکنش همجوشی D-T است و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\langle \delta v \rangle_{DT} (m^3 / s) = 10^{-6} \times C_1 \theta e^{(-3\xi)} \sqrt{\frac{\xi}{m_r c^2 T^3}} \quad (7)$$

ضرایب معادلات مربوط به سطح مقطع همجوشی از مرجع [۱۱] استخراج شده است.

چگالی توان اهمی P_{Ohmic} به عنوان یک منبع گرمایش برای پلاسما به شمار می‌آید و می‌تواند پلاسما را گرم کند. گرمایش اهمی از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

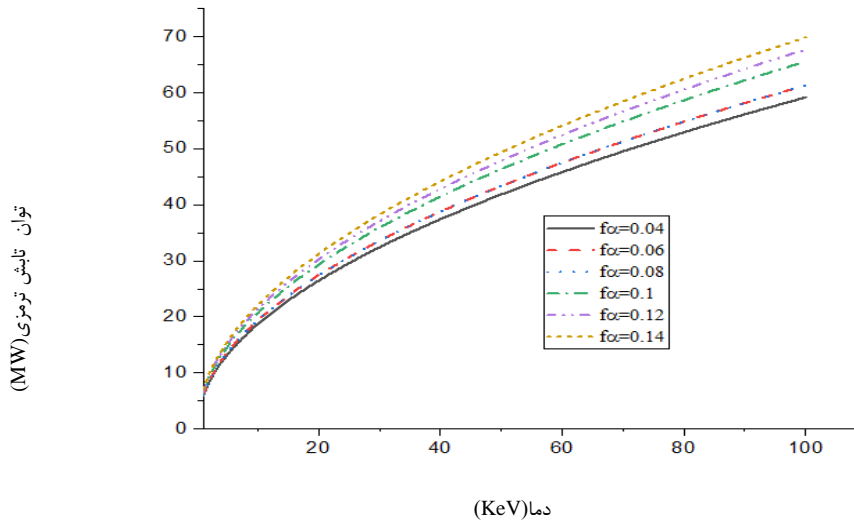
$$P_{Ohmic} \left(\frac{W}{m^3} \right) = 2.8 \times 10^{-9} \frac{Z_{eff} I^2}{a^4 T^{3/2}} \quad (8)$$

در عبارت فوق I جریان پلاسما و بر حسب امپر است [۸].

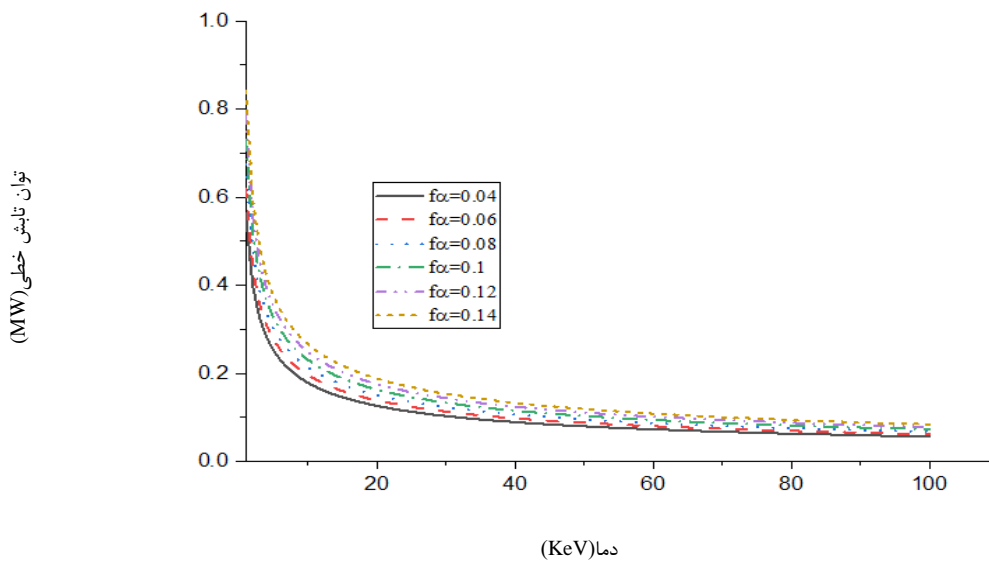
یکی دیگر از معیارهای مهم در سنجش کارایی یک توکامک، زمان محصورسازی انرژی است. زمان محصورسازی متوسط، زمانی است که ذرات (الکترون‌ها و یون‌ها) و یا انرژی در پلاسما سپری می‌کند [۱۲]. مقیاس محصورسازی انرژی استفاده شده در این پژوهش، توکامک ITER90H-P می‌باشد. این مقیاس به صورت زیر است:

$$\tau_E = f I^{1.02} R^{1.6} B^{0.15} A_i^{0.5} \kappa_x^{-0.19} P_{Net}^{-0.47} \quad (9)$$

و مقدار A_i برای ترکیبی ۵۰:۵۰ سوخت D-T برابر با ۲/۵ است و پارامتر f نیز به پارامترهای توکامک ایترو مقیاس محصورسازی بستگی دارد [۱۰]. محاسبات براساس پارامترهای ماشین ایترو [۶] انجام شده است. بنابراین با حل معادلات فوق، نمودارهای توان‌های اتلافی، توان خالص پلاسما و زمان محصورسازی انرژی بر حسب دما را با معرفی غلظت ذره آلفا، $f\alpha$ که برابر با نسبت چگالی ذره آلفا به چگالی الکترونی است [۴]، به ازای مقادیر مختلف ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۱، ۰/۱۲، ۰/۱۴ این پارامتر، رسم شده است و مقادیر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تحولات توان تابش ترمزی در شکل ۱ و تابش خطی بر حسب دما به ازای این مقادیر در شکل ۲ نشان داده شده است.

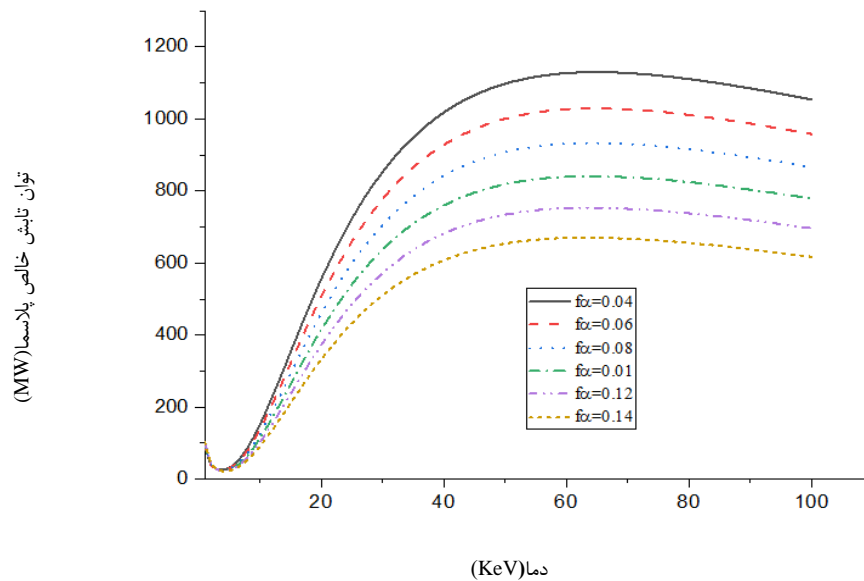


شکل ۱: نمودار تغییرات توان تابش ترمزی برحسب دما

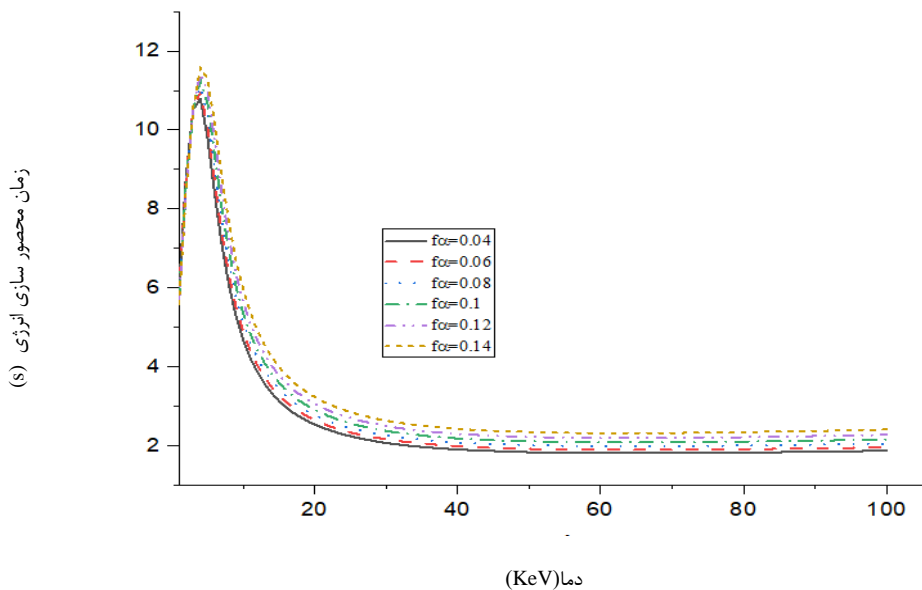


شکل ۲: نمودار تغییرات توان تابش خطی برحسب دما

نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد، توان تابش ترمزی که اصلی‌ترین مکانیزم‌های هدررفت انرژی در پلاسمای هم‌جوشی D-T است، با افزایش کسر چگالی ذره آلفا افزایش می‌یابد، به صورتیکه به ازای کسر 0.04 توان تابش ترمزی به مقدار بیشینه حدود 59 MW می‌رسد و به ازای کسر 0.14 به میزان بیشینه حدود 70 MW می‌رسد. با توجه به نمودارهای شکل ۲، توان تابش خطی در دماهای پایین دارای اهمیت است و با افزایش کسر ذره آلفا این توان افزایش می‌یابد.



شکل ۳: نمودار تغییرات توان خالص پلاسما بر حسب دما



شکل ۴: نمودار تغییرات زمان محصور سازی انرژی بر حسب دما

نمودار تغییرات توان خالص پلاسما بر حسب دما در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، توان خالص پلاسما با افزایش کسر چگالی آلفا کاهش یافته به طوری که برای کسر چگالی آلفا ۰/۱۴ در دمای حدود ۶۳ KeV به مقدار ۶۳ MW می رسد، در حالیکه برای نسبت ۰/۰۴ این مقدار به حدود ۱۱۲۹ MW در این دما افزایش می یابد. تغییرات زمان محصور سازی



انرژی برحسب دما در شکل ۴ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد، زمان محصور سازی انرژی بر حسب دما ابتدا سیر صعودی داشته و به یک مقدار بیشینه می‌رسد و سپس با افزایش دما این زمان کاهش یافته و حدوداً به مقدار ثابتی می‌رسد. هم‌چنین با کاهش غلظت ذرات آلفا مقدار زمان محصورسازی انرژی نیز کاهش می‌یابد به صورتیکه برای غلظت ذره آلفا 0.04 به مقدار بیشینه خود در حدود $10/9$ ثانیه می‌رسد.

۳. نتیجه گیری

در این مقاله، اثرات ناشی از حضور ذرات آلفا بر روی توان‌های تابشی شامل توان تابش ترمزی، توان تابش خطی و توان تابش باز ترکیب، که اطلاعات سودمندی در زمینه مکانیزم اتلاف انرژی در اختیار می‌دهد، به ازای مقادیر مختلف غلظت ذره آلفا α مورد بررسی قرار دادیم. هم‌چنین تاثیر این غلظت‌ها بر توان خالص پلازما و زمان محصور سازی انرژی با مقیاس ITER90H-P نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به نمودارها و نتایج به دست آمده مشخص گردید با افزایش کسر چگالی ذره آلفا، توان‌های اتلافی افزایش پیدا کرده به گونه‌ای که برای کسر 0.14 اتلاف انرژی از طریق مکانیزم تابش و هم‌چنین زمان محصور سازی انرژی به مقدار بیشینه خود می‌رسد. با توجه به نتایج به دست آمده برای غلظت ذره آلفا 0.14 توان تابش ترمزی برابر با 70 MW و برای غلظت آلفا 0.04 این مقدار به 59 MW کاهش می‌یابد. توان خالص پلازما با افزایش کسر چگالی ذره آلفا نیز کاهش می‌یابد به طوری که برای کسر چگالی آلفا 0.14 در دمای حدود 63 KeV به مقدار 670 MW می‌رسد و برای نسبت 0.04 این مقدار به حدود 1129 MW در این دما افزایش می‌یابد. از میان نسبت‌های در نظر گرفته شده غلظت 0.04 برای ذره آلفا، غلظت بهینه می‌باشد.

۴. مراجع

- 1 E. Schuster, M. Krstić, and G. Tynan, Burn control in fusion reactors via nonlinear stabilization techniques, *Fusion science and technology*.43(1),18 (2003).
- 2 S.Glasstone, R. Lovberg, Controlled Thermonuclear Reactions, (D.Van Nostrand Company, Inc, Princeton, New Jersey, 1960)
- 3 W. M. Stacey, in: *Fusion plasma physics*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, 2008)
- 4 D. Reiter, G. H. Wolf, and H. Keffer, Burn condition, helium particle confinement and exhaust efficiency, *Nuclear Fusion*. 30(10), 2141(1990).
- 5 J. P. Freidberg, *Plasma physics and fusion energy*, (Cambridge university press, 2008)
- 6 S. M. Motevalli, F. Fadaei, A Comparison Between the Burn Condition of Deuterium–Tritium and Deuterium–Helium-3 Reaction and Stability Limits, *Zeitschrift für Naturforschung A*.70(2), 79(2015).
- 7 W. M. Stacey, *Fusion: An introduction to the physics and technology of magnetic confinement fusion*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, 2010)
- 8 M. D. Boyer, E. Schuster, Nonlinear burn condition control in tokamaks using isotopic fuel tailoring, *Nuclear Fusion*. 55(8), 083021(2015).



9 F. F. Chen, *Introduction to plasma physics and controlled fusion*, (Plenum press, New York, 1984) Vol. 1, pp.19-51

10 S. M.Motevalli, F. Fadaei, Study of effects of different reactions on plasma parameters in D-T magnetic confinement fusion, *International Journal of Modern Physics E.21*(09), 1250078(2012).

11 H. S. Bosch, G. M. Hale, Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities, *Nuclear Fusion*. 32(4), 611(1992).

12 E.Rebhan, et al. "Effect of helium concentration on ignition curves with energy confinement time including radiation losses, *Nuclear fusion*. 36(2) , 264(1996).