

## پروفایل شعاعی تولید نوترون در دستگاه‌های گداخت محصورسازی الکتروستاتیکی لختی

افشارمنش، محسن\*<sup>(۱)</sup> - حبیبی، مرتضی<sup>(۱)</sup>

دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران

### چکیده:

در این مقاله پروفایل شعاعی تولید نوترون در دستگاه‌های گداخت محصورسازی الکتروستاتیکی لختی مورد مطالعه قرار گرفته است. پتانسیل الکتروستاتیکی با حل معادله پواسون به دست آمده است و با استفاده از این پتانسیل تابع توزیع یون در هر نقطه شعاعی به دست آمده است. از تابع توزیع، نرخ واکنش گداخت محاسبه شده است. وابستگی نرخ واکنش پرتو-پرتو و پرتو-زمینه به چند پارامتر مهم مانند انرژی زاویه ای یون، فشار کاری، شفافیت توری مورد بررسی قرار گرفته است.

### مقدمه:

در دستگاه محصورسازی الکتروستاتیکی لختی ذرات باردار به طور الکتروستاتیکی محصور شده اند و در اثر گیراندازی یون‌ها، چگالی پلاسما در مرکز دستگاه افزایش یافته و احتمال واکنش گداخت افزایش می‌یابد. این دستگاه به دلیل پائین بودن مقدار توان خروجی در مقایسه با توان ورودی به عنوان راکتور گداخت هسته ای مطرح نمی‌باشد. همچنین چگالی و دمای پلاسما برای رسیدن به معیار لاورسون به اندازه کافی بالا نیست. دستگاه‌های گداخت محصورسازی الکتروستاتیکی لختی (IECF) استفاده‌های زیادی، از جمله به عنوان چشمه نوترون دارند. از جمله کاربردهای این دستگاه می‌توان به: فعالسازی نوترونی، شتاب دهنده‌های فضائی، آنالیز مواد، تولید نیتروژن-۱۳ و تولید اشعه ایکس اشاره کرد [۵]-[۱]. مزیت دیگری که این دستگاه دارد این است که خطر تابش رادیواکتیویته وجود ندارد و در نتیجه نیاز به حفاظ‌سازی و تمهیدات خاصی در این زمینه وجود ندارد. با توجه به کاربردهائی که این دستگاه دارد، چندین مطالعه تجربی و تئوری برای به دست آوردن تابع پتانسیل و پروفایل شعاعی نوترون در این دستگاه صورت گرفته است. هیرسچ آزمایشهائی را بر روی این دستگاه انجام داد و بهره نوترون  $10^8$  نوترون در ثانیه را برای گاز کاری دوتریم به دست آورد [۶]. رسیدن به بهره  $10^{11}$  هدف تحقیقات IECF است. یکی از مراکز که در این زمینه فعالیت می‌کند دانشگاه سیکانسین است. از جمله کارهائی که در این مرکز برای افزایش بهره نوترون صورت گرفته است، می‌توان به افزایش ولتاژ کاری، افزایش طول عمر عایق و کاهش فشار با اضافه کردن چشمه یون هلیکون اشاره کرد. مطالعات زیادی به صورت تئوری و آزمایشگاهی صورت گرفته است که تشکیل یک، دو و یا چند چاه پتانسیل را به دلیل تشکیل شدن الکترون‌های مجازی در این دستگاه تایید کرده است [7]. با توجه به استفاده‌هائی که دستگاه IECF به عنوان چشمه نوترون دارد مطالعات تجربی و تئوری زیادی در ارتباط با اندازه‌گیری بهره نوترون خروجی دستگاه و همین‌طور بهینه کردن آن به ازای پارامترهای مختلف صورت گرفته است. از جمله این پارامترها می‌توان به جریان تخلیه، ولتاژ

اعمالی، ساختار چاه پتانسیل، فشار کاری، فاصله بین توری‌ها، استفاده از چشمه یون خارجی اشاره کرد [۱۰]-[۸]. قسمت عمده ی واکنش گداخت در این دستگاه مربوط به مکانیسم پرتو-پرتو و پرتو زمینه می باشد [۱۱]. در مرجع [۱۲] به مطالعه مکانیسم‌های تولید نوترون در دستگاه IECF پرداخته است. در حالت کلی می‌توان این مکانیسم‌ها را به پنج دسته زیر تقسیم بندی کرد: پرتو-پرتو، پرتو-هدف، پرتو-زمینه، مبادله بار و برخورد با دیواره. با توجه به نوع گاز، فشار کاری، توان منبع تغذیه و نوع یونیزاسیون هر کدام از این مکانیسم‌ها در تولید نوترون نقش خواهند داشت. طبق این اندازه گیری، مکانیسم پرتو-پرتو و پرتو-زمینه به تنهایی ۹۲-۸۷ درصد نوترون کل را تولید می‌کنند. در این مقاله با حل معادله پواسون به روش رانک - کوتا مرتبه چهارم تابع پتانسیل به آمده است و سپس با به دست آوردن تابع توزیع انرژی یون‌ها نرخ واکنش گداخت محاسبه شده است.

## روش شبیه سازی و نتایج

در این مقاله داخل کاتد دستگاه شبیه سازی شده است. این سیستم شامل دو توری کره ای داخل محفظه خلا می باشد. کاتد در مرکز قرار گرفته است و توسط آند احاطه شده است. ولتاژ کاری دستگاه ۱۰۰ کیلوولت در نظر گرفته شده است. میدان های الکتریکی و چاه پتانسیل موجود که توسط توری ها و همینطور الکترودهای مجازی ایجاد شده اند، باعث شتاب پیدا کردن یونها به سمت مرکز توری داخلی شده اند. یونها از مرکز کاتد عبور می کنند و دوباره به سمت کاتد شتاب می گیرند. این مکانیسم به طور پیوسته ادامه پیدا میکند تا یونها به کاتد و یا اینکه با ذرات دیگر برخورد انجام می دهند. چگالی یونها در مرکز افزایش می یابد.

در طی این فرایند یونها در میدان الکتریکی محصور شده و در اثر برخورد با یونهای که از جهت های دیگر نزدیک می شوند باعث واکنش گداخت می شوند. الکترونها ممکن است از سطح کاتد منتشر شوند یا اینکه در اثر یونیزاسیون داخل کاتد تولید شوند. در نتیجه یونها و الکترونها همزمان می توانند در کاتد وجود داشته باشند. در اثر تجمع یونها در مرکز کاتد، آند مجازی ایجاد می شود و به تبع آن در اثر شتاب پیدا کردن الکترونها به سمت آند مجازی، کاتد مجازی شکل خواهد گرفت.

در مرجع [۱۳] با استفاده از روش ذره در جعبه (PIC) به مطالعه تخلیه در دستگاه IECF پرداخته شده است. در این مقاله چاه پتانسیل ایجاد شده با فرکانس ۸۰ مگاهرتز نوسان می کند. برای سادگی در این مقاله فرض شده است که چاه پتانسیل پایدار است. علاوه بر این مسیر عبور جریان منبع تغذیه به توری مرکزی تقارن چاه پتانسیل به هم می خورد، اما در این شبیه سازی برای سادگی اثر آن در نظر گرفته نشده است. با توجه به فشار کاری دستگاه تعداد برخوردها

۱۳۹۴ و ۱۶ اسفندماه دانشگاه یزد

بسیار کم است. در نتیجه در این مقاله پلاسما بدون برخورد در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن تابع پتانسیل معادله پواسون را حل می‌کنیم:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dV(r)}{dr} \right) = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_e - \rho_i)$$

در این معادله  $\rho_e$  و  $\rho_i$  چگالی الکترون و یون و  $\epsilon_0$  ضریب نفوذپذیری الکتریکی خلأ است. انرژی کل یون و الکترون با استفاده از قانون پایستگی انرژی به دست می‌آید. جریان یون و الکترون عبارتند از:

$$I_e = 4\pi r^2 \rho_e v_{er}$$

$$I_i = 4\pi r^2 \rho_i v_{ir}$$

در نتیجه چگالی با یون و الکترون به صورت زیر خواهند بود:

$$\rho_e = \int_{-V_c}^V dW_e \int_0^{\left(\frac{r^2}{r_a^2}\right)(V-W_e)} dS_e \frac{I_e}{4\pi r^2} \left(\frac{m_e}{2e}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{(V-W_e - S_e \frac{r_a^2}{r^2})^{\frac{1}{2}}}\right)$$

$$\rho_i = \int_{-V_c}^{V_a} dW_i \int_0^{\left(\frac{r^2}{r_a^2}\right)(W_i-V)} dS_i \frac{I_i}{4\pi r^2} \left(\frac{m_i}{2e}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{(W_i-V - S_i \frac{r_a^2}{r^2})^{\frac{1}{2}}}\right)$$

که نشان دهنده ی شعاع آند است. مطابق روابط زیر، شعاع نسبت به شعاع کاتد که **cm ۱۰** است و انرژی به ولتاژ منبع تغذیه که **kV ۱۰۰** است نرمالایز شده است.

$$X = \frac{r}{r_c}, Y_{eE} = \frac{W_e}{V_c}, Y_{iE} = \frac{S_i}{V_c}, Y_{eQ} = \frac{W_e}{V_c}, Y_{iQ} = \frac{W_i}{V_c}$$

با در نظر گرفتن جریان الکترونها و یونها به صورت گاوسی و حل معادله پواسون و با استفاده از قانون پایستگی انرژی و تکانه زاویه ای شکل چاه پتانسیل را به دست می‌آوریم. تابع توزیع گاوسی برای یون و الکترون در نظر گرفته شده است.

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

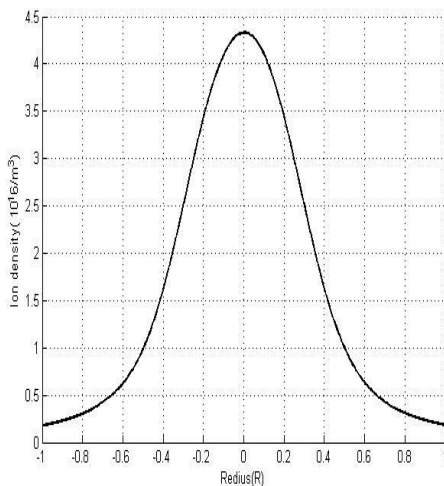
$$I_e = C_e \exp\left(\frac{Y_{eE} - 1}{\sigma_{eE}}\right) \exp\left(-\frac{Y_{eQ}}{\sigma_{eQ}}\right)$$

$$I_i = C_i \exp\left(-\frac{Y_{iE}}{\sigma_{iE}}\right) \exp\left(-\frac{Y_{iQ}}{\sigma_{iQ}}\right)$$

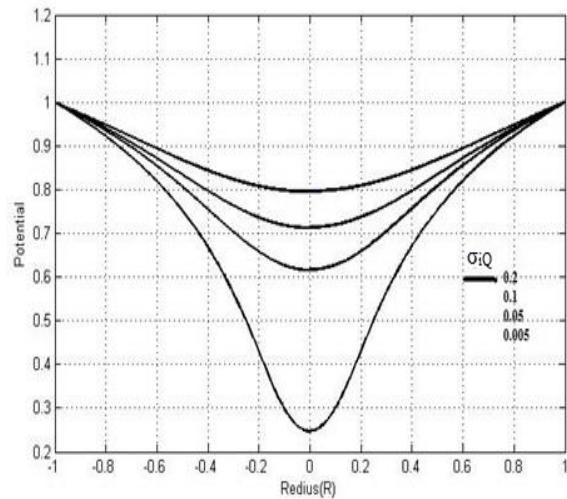
در این معادله  $\delta_{eE}$  و  $\delta_{eQ}$  نشان دهنده ی انرژی نرمالایز شده ی زاویه ای و کل الکترونها می باشد  $\delta_{iE}$  و  $\delta_{iQ}$  نشان دهنده ی انرژی نرمالایز شده ی زاویه ای و کل یونها می باشند. ضرایب  $C_e$  و  $C_i$  ضرایب نرمالایز کننده هستند که از مرجع [۱۳] گرفته شده اند. در شکل ۱. نمونه ای از شکل پتانسیل نشان داده شده است. تمامی پارامترها ثابت نگه داشته شده اند و تنها انرژی نرمالایز شده ی زاویه یون متغیر است و همانطور که مشخص است با کاهش این انرژی عمق چاه پتانسیل افزایش می یابد. در شکل ۲. چگالی شعاعی یون های دوترون نشان داده شده است. با داشتن تابع پتانسیل تابع توزیع انرژی یونها به دست می آید. سپس با استفاده از فرمول زیر نرخ واکنش گداخت مربوط به دو محاسبه می شود. در محاسبه چگالی ذرات گاز زمینه فرض گاز ایده آل لحاظ شده است.

$$\text{Reaction rate} = \int (n_{\text{back}} n_{\text{beam}} \delta_v + \frac{n^2}{4} \delta_v) dv$$

شبیه سازی با گاز کاری دوتریم صورت گرفته است. سطح مقطع گداخت هسته ای دوتریم-دوتریم که برای محاسبه نرخ واکنش در محاسبات لحاظ شده است در مرجع [۱۴] آمده است.

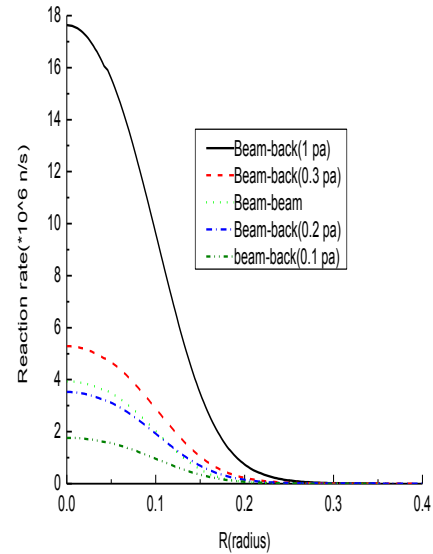
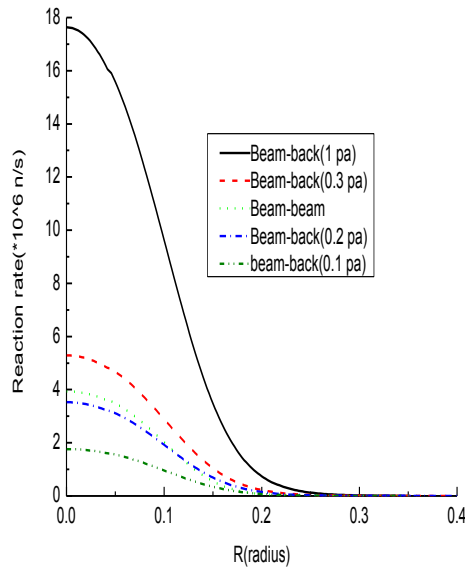


شکل ۲. چگالی شعاعی یون



شکل ۱. چاه پتانسیل حاصل برای انرژی زاویه ای یون مختلف

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



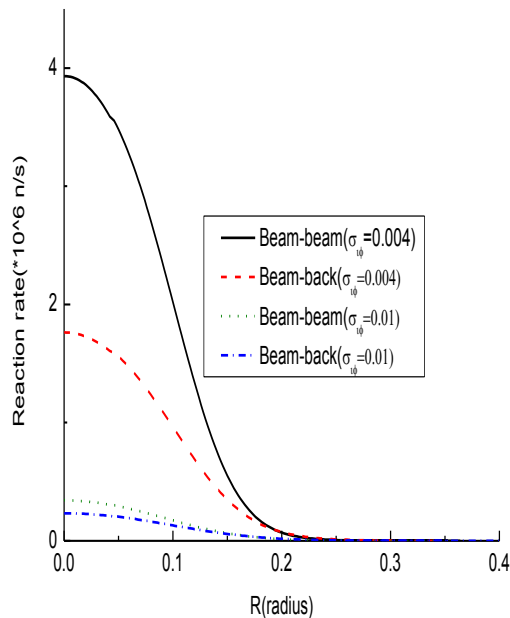
شکل ۴. مقایسه نرخ واکنش گداخت دو مکانیسم پرتو-پرتو و پرتو-زمینه در فشارهای مختلف

$$(\sigma_{iQ}=0.004, \sigma_{iE}=0.15, \sigma_{eE}=0.1, \sigma_{eQ}=0.01 \text{ and } \eta=0.88)$$

شکل ۳. نرخ واکنش گداخت پرتو-زمینه در فشارهای مختلف  
( $\sigma_{iQ}=0.004, \sigma_{iE}=0.15, \sigma_{eE}=0.1, \sigma_{eQ}=0.01$  and  $\eta=0.88$ )

برای شبیه سازی نرخ واکنش گداخت هسته ای دو مکانیسم پرتو-پرتو و پرتو-زمینه در نظر گرفته شد. در شکل ۳. در فشار کاری های مختلف واکنش پرتو زمینه با یکدیگر مقایسه شده است. بیشترین مقدار نرخ واکنش در مرکز کاتد می باشد و با افزایش فشار از مقدار ۰.۱ تا ۱ این مقدار حدوداً ۹ برابر افزایش پیدا کرده است. در فشارهای کاری بالا (از مرتبه پاسکال) گاز زمینه در مقایسه با واکنش پرتو-پرتو نقش بیشتری در نرخ واکنش خواهد داشت با کاهش فشار مکانیسم پرتو-پرتو بر مکانیسم پرتو-زمینه غالب خواهد شد. شکل ۴. مقایسه ای را بین این دو مکانیسم نشان می دهد. در فشار کاری ۰.۲ پاسکال نوترون ناشی از مکانیسم پرتو-پرتو در مرکز کاتد تقریباً برابر با مکانیسم پرتو-زمینه می باشد. در فشارهای کمتر از این مقدار مکانیسم پرتو-پرتو و در فشارهای بالاتر از این مقدار مکانیسم پرتو-زمینه غالب خواهد بود.

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل ۵. مقایسه نرخ واکنش گداخت دو مکانیسم پرتو-پرتو و پرتو-زمینه در انرژی‌های زاویه‌ای متفاوت یون  
 $(\sigma_{iE}=0.15, \sigma_{eE}=0.1, \sigma_{eQ}=0.01, p=0.1 \text{ Pa and } \eta=0.88)$ .

برخورد یونها با توری باعث کاهش بهره نوترون خروجی دستگاه می‌شود. در شکل ۵. مقایسه‌ای بین دو مکانیسم در انرژی‌های زاویه‌ای متفاوت صورت گرفته است. یکی دیگر از نتایجی که در این شبیه‌سازی به آن دست یافتیم این بود که هرچه مقدار شفافیت بالاتر باشد انرژی کمتری در اثر برخورد یونها به گرید کاتد تلف می‌شود و نتیجه بهره نوترون افزایش خواهد یافت.

### بحث و نتیجه‌گیری :

با کاهش انرژی شعاعی یونها عمق چاه پتانسیل و نرخ واکنش گداخت افزایش می‌یابد. یکی از پارامترهای مهم این دستگاه فشارکاری می‌باشد، با افزایش فشار کاری احتمال برخورد یونها با گاز زمینه افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه مکانیسم پرتو-زمینه نقش بیشتری را در مقایسه با پرتو-پرتو ایفا می‌کند. هرچه مقدار شفافیت توری بیشتر باشد برخورد یونها به توری کمتر خواهد بود و بهره نوترون هم افزایش خواهد یافت.

مراجع :

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

- [1] L. Chacon and G. H. Miley, "Inertial electrostatic confinement He breeder for D- He satellite systems," Fusion Technol., vol. 33, p. 182, Mar. 1998.
- [2] J. B. Javedani, Y. B. Gu, M. J. Williams, J. Hartwell, R. L. Anderl, G. H. Miley, J. H. Nadler, J. L. Jones, R. A. Nebel, and D. C. Barnes, "Studies of the IEC accelerator-plasma target fusion neutron source for activation analysis," Bull. Amer. Phys. Soc., vol. 39, no. 7, p. 1768, 1994.
- [3] R. W. Bussard, "An advanced fusion energy system for outer-planet space propulsion," Space Technol. Appl. Int. Forum-STAF 2002, pp. 768-779, 2002.
- [4] J. W. Weidner, "The Production of N from inertial electrostatic confinement fusion," M.S. thesis, Univ. Wisconsin, Madison, WI, 2003.
- [5] J. W. Weidner, G. L. Kulcinski, J. F. Santarius, R. P. Ashley, G. Piefer, B. Cipiti, R. Radel, and S. K. Murali, "Production of  $^{13}\text{N}$  via inertial electrostatic confinement fusion," Fusion Sci. Technol., vol. 44, p. 539, 2003.
- [6] R. L. Hirsch, "Inertial electrostatic confinement of ionized fusion gases," J. Appl. Phys., vol. 38, p. 4522, Oct. 1967.
- [7] Ryan M. Meyer, Member, IEEE, Sudarshan K. Loyalka, and Mark A. Prelas, "Potential Well Structures in Spherical Inertia Electrostatic Confinement Devices" IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 33, NO. 4, AUGUST 2005.
- [8] H. Matsuura, T. Takaki, K. Funakoshi, Y. Nakao, K. Kudo, "Ion distribution function and radial profile of neutron production rate in spherical inertial electrostatic confinement plasmas" Nuclear Fusion, Vol. 40, No. 12.
- [9] MATSUO Takashi, MATSUURA Hideaki, NAKAO Yasuyuki and KUDO Kazuhiko, "Dependence of Neutron/Proton Production Rate on Discharged Current in Spherical Inertial Electrostatic Confinement Plasmas", J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 6 (2004).
- [10] MATSUURA Hideaki, NAKAO Yasuyuki and KUDO Kazuhiko, "Potential Structure and Radial Profile of Neutron Production Rate in Spherical Inertial Electrostatic Confinement Plasmas", J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol.4 (2001) 289-292.
- [11] H. George et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 25(4), 733-739 (1997)
- [12] S.K. Murali, B.B. Cipiti, J.F. Santarius, G.L. Kulcinski, Phys. Plasmas 13, 053111 (2006).
- [13] Ryan M. Meyer, S.K. Loyalka, M.A. Prelas, IEEE Trans. Plasma Sci. 33, 1377 (2005).
- [14] Xing Z. Li, Qing M. Wei and Bin Liu, "A new simple formula for fusion cross-sections of light nuclei", Nucl. Fusion, pp.48-52, 2008.