

بررسی تاثیر شعاع کاند بر نرخ تولید نوترون در دستگاه IECF کروی

رضایی، عماد^(۱) - زاهدنیا، نیره^(۱) - اصل زعیم، علیرضا - صدیق زاده، اصغر*^(۱) - دامپیده، وحید^(۱)

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

یکی از سیستم‌هایی که در زمینه تحقیقات گداخت هسته‌ای در سطح بین‌المللی مطرح می‌باشد سیستم محصورسازی الکترواستاتیکی-اینرسی (IECF) است که در میان روش‌های مختلف گداخت هسته‌ای این روش دارای ویژگی منحصر به فرد انجام گداخت هسته‌ای به طور پیوسته است. در این مقاله، به بررسی تاثیر تغییرات شعاع کاند بر روی نرخ تولید نوترون پرداخته شده است. نتایج بدست‌آمده حاکی از آن است که عمق چاه پتانسیل و چگالی‌های الکترون و یون بسیار وابسته به شعاع کاند می‌باشد. بطوری‌که با کاهش شعاع کاند، عمق چاه بیشتر شده و مقدار چگالی افزایش پیدا کرده و شرایط بهتری برای انجام واکنش همجوشی فراهم شده است و این امر باعث افزایش نرخ تولید نوترون می‌گردد.

کلمات کلیدی: (همجوشی هسته‌ای، نرخ تولید نوترون، محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی، دستگاه IECF)

مقدمه :

دستگاه همجوشی هسته‌ای با روش محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی (IECF^۱) به علت ویژگی‌های منحصر به فرد، از جمله قابلیت انجام گداخت هسته‌ای به صورت پیوسته، یکی از سیستم‌های کارآمد در زمینه مطالعات پلاسما همجوشی می‌باشد. در سال‌های اخیر تلاش‌های چشمگیری در زمینه همجوشی کنترل شده گرما هسته‌ای صورت گرفته است. سیستم محصورسازی الکترواستاتیکی IECF، به دلیل ساده و کم هزینه بودن طراحی و ساخت آن و همچنین کاربردهای متعدد در زمینه‌های گسترده صنعتی، پزشکی و دفاعی به عنوان یکی از بهترین دستگاه‌های گداخت هسته‌ای به شمار می‌رود. از دیگر قابلیت‌های ارزشمند دستگاه IECF می‌توان به فعال‌سازی نوترونی، فعال‌سازی پروتونی، ردیابی مواد منفجره پیشرفته، از بین بردن پسماندها و زباله‌های هسته‌ای با نیمه عمر بالا حاصل از فرایندهای شکافت هسته‌ای، پرتو درمانی، بررسی خواص الکتریکی، اپتیکی و مکانیکی جامدات، استریلیزه کردن تجهیزات پزشکی و صنایع غذایی، شناسایی و از بین بردن زباله‌ها و پسماندهای شیمیایی که به روش‌های دیگر امکان پذیر نمی‌باشد، نیروی پیشران سفینه‌های فضایی که در صنایع هوا فضا و موشکی کاربرد فراوانی دارد و راکتور تحقیقاتی گداخت هسته‌ای اشاره کرد [۵و ۶].

¹ Inertial Electrostatic Confinement Fusion

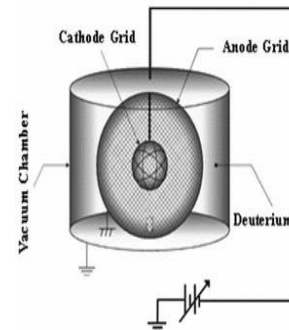
دستگاه IECF شامل دو الکتروود کروی مشبک هم‌مرکز بوده که الکتروود مرکزی (کاتد) به ولتاژ بالای منفی و الکتروود بیرونی (آند) به زمین متصل شده و دو الکتروود در داخل یک محفظه خلاء بطور ثابت قرار می‌گیرند. در این دستگاه پس از تزریق گاز کاری به داخل محفظه، بر اثر تخلیه‌ی الکتریکی در فشار پایین، یونیزاسیون رخ داده و یون‌های تولید شده بین دو الکتروود کروی مشبک شتاب داده می‌شوند. یون‌ها به سمت مرکز الکتروود کروی شتاب گرفته و در اثر برخورد‌های پی در پی در مرکز کره، انجام واکنش هم‌جوشی هسته‌ای را سبب می‌شوند. میدان الکتریکی کروی بین دو الکتروود باعث شکل‌گیری پلاسمای نسبتاً چگال و داغ در مرکز الکتروود مرکزی شده و شرایط مناسبی برای واکنش‌های گداخت هسته‌ای پیوسته فراهم می‌شود [۱]. شکل ۱ پیکربندی کلی دستگاه IECF را نشان می‌دهد. اولین دستگاه ایرانی IR-IECF در سال ۲۰۱۱ در پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای طراحی و ساخته شد. برای این دستگاه با مشخصات ابعادی $13/5$ و 41 cm که به ترتیب شعاع کاتد و آند می‌باشد، در ولتاژ 140 kV و جریان 70 mA و استفاده از گاز کاری دوتریوم، آهنگ تولید 10^7 نوترون $2/5$ MeV در ثانیه گزارش شده است. جنس آند و کاتد در این سیستم استیل ۳۱۶ است [۱]. در شکل ۲ نمایی از دستگاه IR-IECF نشان داده شده است. در حال حاضر به‌منظور بالا بردن نرخ واکنش هم‌جوشی هسته‌ای و افزایش شار نوترون تا 10^9 (n/s)، طراحی و ساخت یک نمونه ارتقاء یافته از دستگاه IECF در این مرکز در حال انجام است.



شکل ۲- محفظه اصلی و سیستم کنترل دستگاه

IR-IECF

آسان بودن کار با دستگاه، سایز نسبتاً کوچک آن و ارزان بودن دستگاه نسبت به سایر روش‌های پر هزینه هم‌جوشی هسته‌ای، مانند دستگاه توکامک و هم‌جوشی لیزری، این دستگاه را به عنوان یکی از بهترین دستگاه‌های گداخت هسته‌ای برای رسیدن به کاربردهای مختلفی همچون، تولید رادیوایزوتوپ، ردیابی مواد جاسازی شده از طریق فعال سازی نوترونی و امکان استفاده به عنوان دستگاه کوچک تولید توان الکتریکی، معرفی می‌کند. در این تحقیق، پیکربندی شکل ۱ برای دستگاه IECF کروی در نظر گرفته شده است و پروفایل پتانسیل الکتروستاتیکی و چگالی یونها در دستگاه IECF کروی با حل عددی معادله پواسون با



شکل ۱- پیکربندی کلی دستگاه IECF

روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار MATLAB محاسبه شده است. سپس وابستگی نرخ تولید نوترون به تغییرات شعاع کاتد مورد بررسی قرار گرفته است.

روش کار :

با توجه به شکل ۱ کاتد به پتانسیل منفی بالا و آند به زمین متصل شده است. برای مدل‌سازی، ابتدا باید پتانسیل الکتروستاتیکی را با حل معادله پواسون بدست بیاوریم.

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

حل معادله Vlasov برای یون‌ها و الکترون‌ها، همانطور که همه به خوبی می‌دانند، می‌تواند توسط تابع اختیاری مرتبط با ثابت‌های حرکت تک ذرات بیان شود. در تقارن کروی ثابت‌های حرکت انرژی کل

$$\epsilon_s = \frac{1}{2} m_s v_s^2 + q_s \phi(r) \quad (2)$$

و مربع اندازه حرکت زاویه‌ای ذرات است،

$$l_s^2 = (m_s v_s \times r)^2 \quad (3)$$

به طوریکه q_s ، m_s و v_s به ترتیب جرم، بار و سرعت یون‌ها و الکترون‌ها هستند. $\phi(r)$ پتانسیل الکتروستاتیکی را مشخص می‌کند [۲]. گداخت محصورسازی الکتروستاتیکی اینرسی یک سیستم برخورد ضعیف است، به طوریکه فرکانس برخوردی و آهنگ واکنش گداخت در مقایسه با فرکانس عبور در دیوار پتانسیل کوچک است. تابع توزیع یون‌ها و الکترون‌ها در IECF توسط توابع اختیاری وابسته به انرژی و اندازه حرکت زاویه‌ای مانند $f_s = c_s f_s(\epsilon_s, l_s^2)$ بیان می‌شوند. ما توزیع یون‌هایی را که تقریباً تک انرژی هستند و در مرکز کره متمرکز شده‌اند را در نظر می‌گیریم. از طرف دیگر، الکترون‌ها نسبت به یون‌ها برخوردهای بسیار بیشتری دارند. ما فرض می‌کنیم که توابع توزیع الکترون و یون به صورت تقریبی به شکل زیر بیان می‌شوند:

$$f_i = c_i \delta(\epsilon_i - \epsilon_{i0}) H(l_{i0}^2, l_i^2) \quad (4)$$

و

$$f_e = c_e \exp\left(-\frac{\epsilon_e}{kT_e}\right) \exp\left(-\frac{l_e^2}{l_{e0}^2}\right) \quad (5)$$

در اینجا l_{i0} و ϵ_{i0} به ترتیب تکانه زاویه‌ای و انرژی یون‌ها و تکانه زاویه‌ای الکترون‌ها بر روی کاتد می‌باشند، δ و H نیز به ترتیب معرف دلتا دیراک و تابع پله‌ای Heaviside هستند و k و T_e نشان دهنده ثابت بولتوزمن و دمای الکترون هستند. چگالی ذرات در شعاع r از رابطه زیر بدست می‌آید [۳]:

$$n_s = \pi \int_{-\infty}^{\infty} d\epsilon_s \int_0^{\infty} dl_s^2 \frac{f_s(\epsilon_s, l_s^2)}{m_s^3 r^2 v_r(\epsilon_s, l_s^2)} \quad (6)$$

به طوریکه

$$v_r(\epsilon_s, l_s^2) = \sqrt{\frac{2}{m_s} (\epsilon_s, q_s \Phi) - \frac{l_s^2}{m_s^2 r^2}} \quad (7)$$

برای محاسبه نرخ تولید نوترون از معادله ۸ استفاده شده است.

$$\dot{N} = \int d^3r n_i(r)^2 \langle \sigma v \rangle_{DD}(r) \quad (8)$$

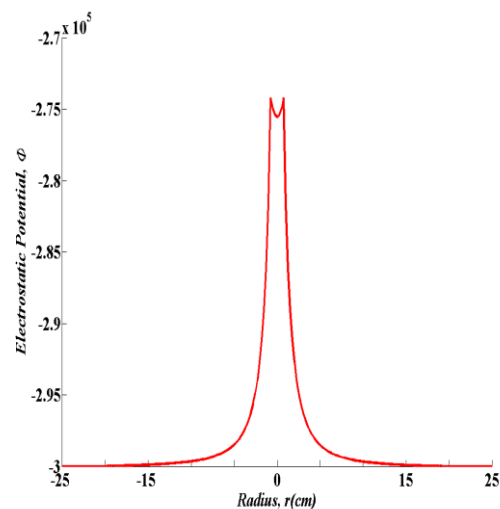
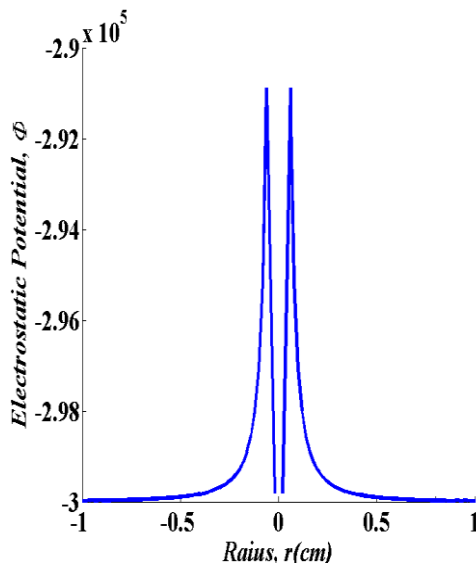
که در آن $\langle \sigma v \rangle$ راکتیویته میباشد و از رابطه ۹ قابل محاسبه است.

$$\langle \sigma v \rangle = \int_0^\infty f(v) \sigma(v) dv \quad (9)$$

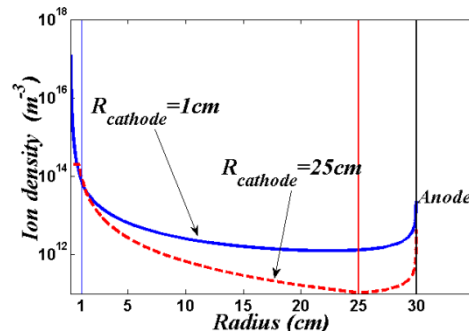
پس از محاسبه نرخ تولید نوترون، چگونگی وابستگی نرخ تولید نوترون به تغییرات شعاع کاتد، مورد بررسی قرار داده شده است.

نتایج:

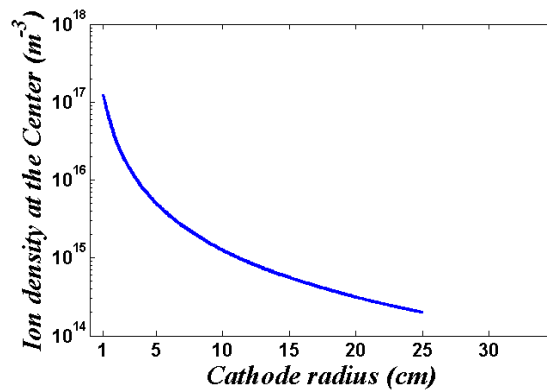
در این تحقیق شعاع آند $r_{anode} = 30 \text{ cm}$ در نظر گرفته شده است. همچنین پتانسیل کاتد برابر با $o = 30 \text{ kv}$ در این تحقیق شعاع آند $r_{anode} = 30 \text{ cm}$ در نظر گرفته شده است. شکل ۳ پروفایل پتانسیل الکترواستاتیکی بر حسب شعاع به ازای شعاع های کاتد ۱ سانتیمتر و ۲۵ سانتیمتر را نشان می دهد. چنانکه از این شکل پیداست با کاهش شعاع کاتد، عمق چاه پتانسیل دوگانه بیشتر می شود.



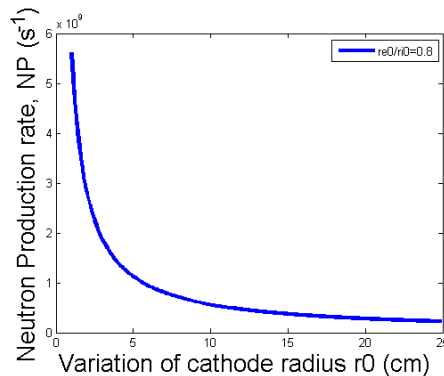
شکل ۳- پروفایل پتانسیل الکترواستاتیکی بر حسب شعاع به ازای شعاع کاتد ۱ سانتیمتر نمودار آبی رنگ و ۲۵ سانتیمتر نمودار قرمز رنگ.



شکل ۴- پروفایل چگالی یونی بر حسب شعاع به ازای شعاع کاتد ۱ سانتیمتر نمودار آبی رنگ و شعاع کاتد ۲۵ سانتیمتر نمودار قرمز رنگ.



شکل ۵- پروفایل تغییرات چگالی یون در مرکز دستگاه بر حسب تغییرات شعاع کاتد.



شکل ۶- پروفایل تغییرات نرخ تولید نوترون بر حسب تغییرات شعاع کاتد.

در شکل ۴ پروفایل چگالی یون‌ها بر حسب شعاع به ازای شعاع‌های کاتد مختلف نشان داده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، هنگامی که شعاع کاتد کوچکتر می‌شود، چگالی یون‌ها در مرکز دستگاه افزایش چشمگیری پیدا کرده است که افزایش برای انجام واکنش همجوشی بسیار مطلوب می‌باشد.

در شکل ۵ روند تغییرات چگالی یونها در نقطه‌ای خیلی نزدیک به مرکز دستگاه بر حسب شعاع به ازای تغییرات شعاع کاتد در بازه بین ۱ سانتیمتر تا ۲۵ سانتیمتر نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع کاتد از میزان چگالی بیشینه در مرکز کاسته می‌شود. شکل ۶ نرخ تولید نوترون برای دستگاه را به ازای تغییرات شعاع کاتد نشان می‌دهد. از این نمودار پیداست که با کوچکتر نمودن شعاع کاتد با فرض ثابت بودن شعاع آند به افزایش چشمگیری در میزان نرخ تولید نوترون دست خواهیم یافت. رفتار مجانبی در نزدیکی مبدا به دلیل در نظر گرفتن توزیع بولتزمن می‌باشد. فرض توزیع بولتزمن فقط برای مقیاس‌های بزرگتر از طول دبای معتبر است (طول دبای در حدود ۱ میکرومتر می‌باشد) و برای شعاع‌های کوچکتر از این مقدار به بحث‌های پیچیده شبه تعادل نیاز است. در اینجا حد پایین که برای شعاع دستگاه در نظر گرفته شده است ۱ cm می‌باشد. این مقدار طوری انتخاب شده است که هم از طول دبای بزرگتر باشد و هم امکان ساخت آن ممکن باشد.

بحث و نتیجه گیری :

به منظور مطالعه تحلیلی پلاسما در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی از روش تحلیلی المان محدود به حل معادله پواسون پرداخته شده است. سپس با محاسبه سطح مقطع واکنش دوتریوم-دوتریوم راکتیویته محاسبه شده است. در نهایت نرخ تولید نوترون محاسبه شد. با در نظر گرفتن شعاع‌های مختلف برای کاتد به ازای یک شعاع آند ثابت، به بررسی رفتار پتانسیل، چگالی یونها و نرخ تولید نوترون در دستگاه پرداخته شده است. نتایج محاسبات نشان دهنده وابستگی شدید چگالی و عمق چاه پتانسیل و نرخ تولید نوترون نسبت به تغییرات شعاع کاتد می‌باشد. همانطور که از نمودارها پیداست شعاع کاتد تاثیر بسزای بر این سه عنصر دارد. به نحوی که با انتخاب شعاع کاتد کوچکتر، به چاه پتانسیل عمیقتر و چگالی یون بالاتر در مرکز دستگاه دست پیدا خواهیم کرد. در نتیجه این عوامل شرایط بسیار بهتری برای انجام واکنش همجوشی هسته-ای فراهم خواهد کرد و نرخ‌های تولید نوترون بسیار بالاتری بدست خواهد آمد.

مراجع :

[1] V. Damideh, "Experimental Study of the Iranian Electrostatic Confinement Fusion as a Continuous Generator," Journal of Fusion Energy, 2011.



بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران



۱۵ و ۴ اسفندماه ۱۳۹۵، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

- [2] ELMORE, W.C. “On the Inertial-Electrostatic Confinement of a Plasma” , et al., Phys. Fluids 2 (1959) 239.
- [3] M. OHNISHI, Uji. Kyoto, Correlation “Between Potential Well Structure And Neutron Production In Inertial Electrostatic Confinement Fusion”. NUCLEAR FUSION, Vol. 37, No. 6 (1997.)
- [4] Kunihito Yamauchi et al “Pulsed Operation of a Compact Fusion Neutron Source Using a High-Voltage Pulse Generator Developed for Landmine Detection” Fusion Science and Technology, vol.47, pp.1229-1232(2005)
- [5] Kiyoshi Yoshikawa et al “Research and development of the humanitarian landmine detection system by a compact fusion neutron source” Nuclear Science ,vol 50(2009)