



شبیه‌سازی اثر صفحه‌های بازتاباننده بر عملکرد دستگاه هم‌جوشی پلی‌ول PR-IR50

فاطمه کاظمی‌زاده، علی باقری، وحید دامیده، اصغر صدیق‌زاده*

پژوهشکده‌ی پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله دستگاه هم‌جوشی پلی‌ول PR-IR50، دستگاه هم‌جوشی هسته‌ای در دست طراحی، معرفی و فیزیک حاکم بر آن با استفاده از کد آپیک شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این دستگاه خصوصیت‌های منحصر به فردی را در تولید انرژی و محصورسازی ذره‌ها دارا بوده، و امکان دستیابی به هم‌جوشی هسته‌ای با آن وجود دارد. در این مقاله هم‌چنین آهنگ هم‌جوشی رآکتور پلی‌ول PR-IR50 در حضور و عدم حضور صفحه‌های بازتاباننده مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌های به دست آمده اثبات می‌کنند که آهنگ هم‌جوشی با حضور صفحه‌های بازتاباننده در دستگاه نسبت به حالت نبود آن‌ها تقریباً دو برابر می‌شود. این افزایش به دلیل بازتاب الکترون‌ها به داخل دستگاه، کاهش اتلاف ذره‌ها و افزایش چگالی الکترون و یون در مرکز است. نتیجه‌های به دست آمده می‌تواند برای بهینه‌سازی دستگاه‌های پلی‌ول مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: پلی‌ول، صفحه‌های بازتاباننده، آهنگ هم‌جوشی

Simulation of the effects of reflective plates on the performance of PR-IR50 polywell device

F. Kazemyzade, A. Bagheri, V. Damideh, A. Sadighzadeh*

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399-51113, Tehran – Iran

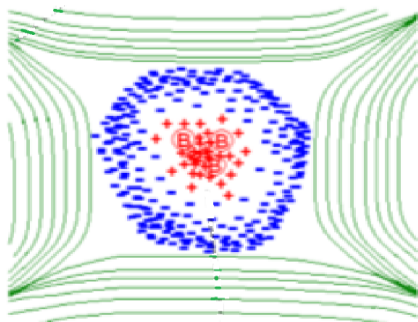
Abstract: In this research, the PR-IR50 polywell device is introduced and its physical processes are simulated using the OOPIC code. The results of the simulation showed that the device reveals special characteristic features for energy particle trapping, and the nuclear fusion is feasible by it. In addition, the nuclear fusion rate, with and without reflective plates, has been studied. The results proved that this rate, in the presence of the plates, is almost doubled compared with the case when the plates are absent. This increase is due to the reflection of electrons on the inner section of the device, reduction of particle loss, and the increase in density of ions and electrons in the center of the device. The derived results corresponding to this research may be useful for optimization of polywell devices.

Keywords: Polywell, Reflective plates, Fusion rate

۱. مقدمه

زیربنای اصلی طراحی پلی‌ول، افزایش انرژی الکترون‌ها به کمک میدان‌های الکتریکی و محصورسازی و کنترل ذره‌ها با میدان مغناطیسی است. ابتدا الکترون‌ها به کمک میدان الکتریکی به مرکز پیچه‌ها شتاب می‌گیرند و میدان مغناطیسی اعمال شده از پیچه‌ها مانع حرکت آن‌ها از مرکز دستگاه به سمت دیواره‌ها می‌شود. الکترون‌های پُرانرژی به دام افتاده در میدان مغناطیسی به تدریج یک کاتد مجازی تشکیل می‌دهند. این کاتد مجازی نقش کاتد دستگاه‌های هم‌جوشی محصورساز الکترواستاتیکی را دارد، با این تفاوت که در این جا افت شار یونی بالایی که در اثر برخورد آن به شبکه‌ی الکترودها ایجاد می‌شد وجود ندارد. ورود الکترون‌های پُرانرژی به مرکز دستگاه موجب ایجاد یک چاه پتانسیل می‌شود که به تدریج با ورود الکترون تقویت می‌شود. یون‌ها تحت تأثیر چاه پتانسیل ایجاد شده توسط کاتد مجازی شتاب گرفته و می‌توانند در مرکز دستگاه با برخورد با یک‌دیگر ادغام و یا پراکنده شوند که در این حالت دوباره توسط چاه پتانسیل به داخل برگردانده می‌شوند و این همان مفهوم محصورسازی است.

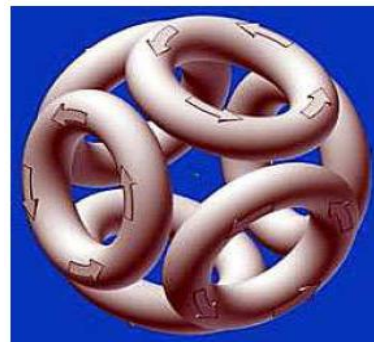
به دلیل تشکیل میدان‌های مغناطیسی موضعی در اطراف پیچه‌ها، شدت برخورد یون‌ها و الکترون‌ها با آن‌ها بسیار کم می‌شود. علاوه بر این، هندسه‌ی میدان مغناطیسی در پلی‌ول به لحاظ هیدرودینامیکی ذاتاً پایدار است. زیرا نسبت به مرکز محذب بوده و مقدار آن در مرکز صفر است. در سیستم‌هایی که در آن‌ها راستای میدان‌ها به سمت پلاسما محذب است همیشه پلاسما پایدار بوده و بالعکس، هنگامی که میدان مقعر است پلاسما ناپایدار می‌شود. در نتیجه در رآکتورهای پلی‌ول مشکل ناپایداری پلاسما وجود ندارد. در شکل ۲ میدان مغناطیسی محذب و تشکیل کاتد مجازی نشان داده شده است [۴].



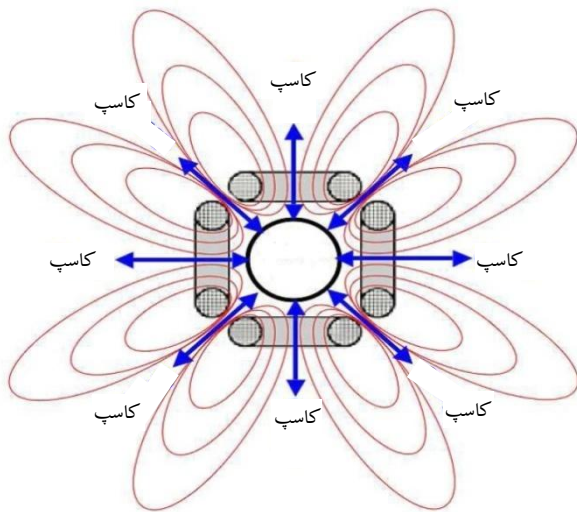
شکل ۲. میدان‌های مغناطیسی محذب و کاتد مجازی در دستگاه پلی‌ول [۴].

دستگاه‌های محصورساز الکترودینامیکی جرمی به دلیل داشتن هندسه‌ی ساده، توانایی سوخت‌سوزی پروتون-بور، توانایی دست‌یابی به ضریب Q انرژی هم‌جوشی سربه‌سر^(۱) و کاربردهای فراوان، از اهمیت ویژه‌ای در حوزه‌ی هم‌جوشی هسته‌ای برخوردار هستند. تاکنون چندین مطالعه‌ی تجربی و نظری بر روی این دستگاه‌ها در داخل کشور انجام شده است [۱، ۲]. دستگاه پلی‌ول به دلیل به کارگیری هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و نحوه‌ی آرایش آن‌ها دارای میدان مغناطیسی محذب است که باعث پایداری پلاسما می‌شود. این شبیه‌سازی در راستای طراحی و ساخت دستگاه پلی‌ول PR-IR۵۰ انجام شده است. دستگاه پلی‌ول PR-IR۵۰ در دست طراحی شامل محفظه‌ی خلأ به حجم تقریبی ۳ مترمکعب بوده و از شش پیچه‌ی مغناطیسی، چهار تفنگ الکترونی و چهار تفنگ یونی تشکیل شده است.

مفهوم پلی‌ول اولین بار توسط دکتر رابرت بوسارد^(۲) در سال ۱۹۸۳ معرفی شد و در سال‌های ۱۹۸۹، ۱۹۹۲ و ۲۰۰۶ نمونه‌های مختلف آن به ثبت رسید. در دستگاه هم‌جوشی پلی‌ول، مفهوم‌های محصورسازی الکترواستاتیکی و محصورسازی مغناطیسی ترکیب می‌شوند. این دستگاه به این دلیل پلی‌ول نامیده شده است که محصورسازی مغناطیسی در یک چندوجهی منظم با گوشه‌های بریده شده، که وجوه آن را پیچه‌های مغناطیسی تشکیل می‌دهند، انجام می‌شود. طرح‌واره‌ی این چندوجهی می‌تواند یک هرم، یک مکعب و یا یک ۱۲ وجهی باشد. شکل ۱ پیچه‌های ۶ وجهی پلی‌ول را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱. طرح‌واره‌ی پیچه‌های پلی‌ول ۶ وجهی [۳].



شکل ۳. نمایش کاسپ‌ها (ناحیه‌ی بین جفت حلقه‌های ناهم‌نام هم‌جوار، مرکزهای پیچ) در پلی‌ول [۳].

۲. شبیه‌سازی محیط دستگاه

کد آپیک که توسط گروه پلاسمای نظری و شبیه‌سازی دانشگاه کالیفرنیا توسعه داده شده است در محیط ++C که یک زبان برنامه‌نویسی شی‌گرا است نوشته شده و در نتیجه تمام مزیت‌های یک برنامه‌ی شی‌گرا را دارا است. در این کد لازم است ابتدا هندسه‌ی رآکتور مدل‌سازی شود و چون این مدل‌سازی در دو بعد انجام شده است می‌باید سطح مقطع هر کدام از مؤلفه‌های دخیل دستگاه شبیه‌سازی می‌شود. محورهای مختصه‌های راست‌گرد انتخاب شدند. با توجه به این که این کد از روش ذره در جعبه استفاده می‌کند، شبکه‌بندی فضای شبیه‌سازی به عنوان اولین قدم انجام و محور افقی و عمودی هر کدام به ۱۴۰ قسمت تقسیم‌بندی شد. هر نقطه‌ای که در فضای شبیه‌سازی برای ذره‌ها در نظر گرفته می‌شود نماینده‌ی 10^8 ذره بود. ابعاد محفظه‌ی خلأ طراحی شده در کد ۱/۴ متر \times ۱/۴ متر بود. پتانسیل اعمال شده به دیواره‌ی محفظه‌ی خلأ صفر در نظر گرفته شد. همان‌طور که به وسیله‌ی روزه [۸] پیشنهاد شده است، به دلیل مدل‌سازی در دو بعد، میدان مغناطیسی حاصل از هر پیچ‌های مغناطیسی با میدان مغناطیسی حاصل از دو سیم راست عمود بر صفحه معادل‌سازی و جای‌گزین شد. بدین ترتیب، میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضا مجموع میدان‌های مغناطیسی حاصل از هشت عدد سیم راست بود. جریان‌های هر کدام از سیم‌ها که در کنار یک‌دیگر قرار داشتند مخالف یک‌دیگر در نظر گرفته شد. راستای جریان‌های الکتریکی باید به گونه‌ای انتخاب می‌شد که میدان مغناطیسی در مرکز دستگاه صفر می‌شد. این امر نکته‌ی اساسی این گونه

دست‌یابی به دماهای بالا در این نوع دستگاه به هیچ وجه مشکل نبوده و به راحتی با اعمال میدان الکتریکی فراهم می‌شود. ولی در عوض به دست آوردن چگالی‌های بالا با چالش همراه است. مهم‌ترین عامل کاهش چگالی ذره‌ها در دستگاه پلی‌ول فرار آن‌ها از ناحیه‌های موسوم به کاسپ^(۳) است [۵]. هر جفت حلقه یک کاسپ ایجاد می‌کند. کاسپ به مکان‌هایی گفته می‌شود که راستای میدان مغناطیسی در آن به گونه‌ای است که نمی‌تواند ذره‌ها را محصور کرده و مانع خروج آن‌ها از دستگاه شود؛ در نتیجه ذره‌ها به راحتی فرار می‌کنند. در شکل ۳ کاسپ‌های خط‌های میدان مغناطیسی، تشکیل شده از جفت حلقه‌های ناهم‌نام، نشان داده شده‌اند. پراکندگی در اثر برخورد و نشت مستقیم از ناحیه‌ی کاسپ از اصلی‌ترین سازوکارهای اتلاف الکترون در پلی‌ول محسوب می‌شوند.

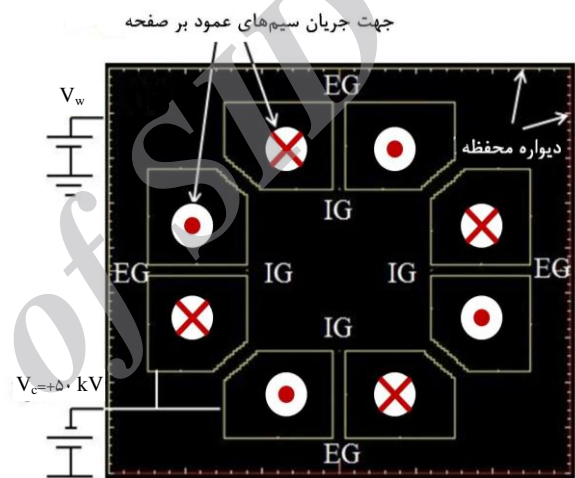
برای جلوگیری از جرقه‌زنی لازم است چگالی خارج پیچ‌های مغناطیسی به اندازه‌ی کافی کوچک، و چگالی مرکز دستگاه بالا باشد [۳]. از این‌رو برای افزایش آهنگ هم‌جوشی و از آن مهم‌تر امنیت کار با دستگاه لازم است کاسپ‌های خروجی مسدود شوند. دکتر بوسارد در ساخت دستگاه‌های WB-۵ و PXL-۱ با تعبیه‌ی صفحه‌های بازتابنده سعی کرد افت ناشی از کاسپ را به حداقل برساند [۳، ۶]. اما از طرف دیگر وجود این صفحه‌های بازتابنده همان‌طور که از خروج الکترون‌ها جلوگیری می‌کند با جذب یون‌ها میزان اتلاف آن‌ها را افزایش می‌دهد. ولی اتلاف یون‌ها به دلیل سنگین بودن این ذره‌ها می‌تواند نادیده انگاشته شود. بنابراین مسأله قابل توجه در این جا بررسی دقیق نقش این صفحه‌های بازتابنده به کمک شبیه‌سازی است تا بتوان در عمل در مورد تعبیه و یا عدم تعبیه‌ی آن‌ها در دستگاه تصمیم‌گیری نمود.

تأثیر میدان مغناطیسی بر عمق چاه پتانسیل با استفاده از کد آپیک^(۴) (OOPIC) پیش از این بررسی شد [۷]. با توجه به نتایج حاصل از این بررسی، در این شبیه‌سازی جریان پیچ‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که میدان مغناطیسی در وجوه هر پیچ برابر با ۰/۷ تسلا شود. تحت این شرایط، تأثیر الکترودها بر محصورسازی ذره‌ها در دستگاه پلی‌ول و هم‌چنین تغییر چگالی الکترونی و یونی، عمق چاه پتانسیل و انرژی ذره‌ها در مرکز مورد بررسی قرار گرفت.

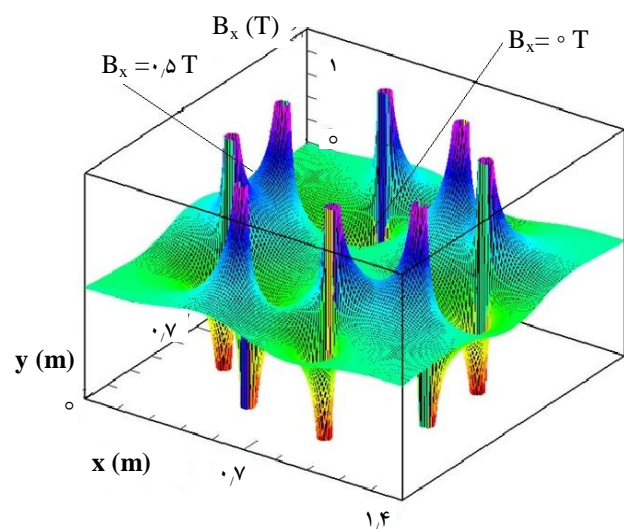
الکترودها که تعداد آن‌ها چهار عدد در نظر گرفته شد، به صورت صفحه‌های تختی در گوشه‌های محفظه‌ی خلأ و عمود بر محور کاسپ‌های خطی در دستگاه قرار گرفته بودند (شکل ۶). پتانسیل (V_E) اعمال شده به هر الکتروده ۵۰- کیلوولت بود. اعمال ولتاژ منفی در واقع برای راندن الکترون‌ها به سمت مرکز دستگاه و افزایش چگالی الکترون است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، پتانسیل اعمال شده به هر کدام از پیچه‌ها که با V_c در شکل ۴ نشان داده شده است نیز برابر ۵۰ کیلوولت در نظر گرفته شد. بدین ترتیب اختلاف پتانسیل بین صفحه‌های دیواره‌ی پیچه و الکتروده ۱۰۰ کیلوولت بود. برای جلوگیری از ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی، فاصله‌ی بین دو صفحه با اختلاف پتانسیل هزار ولت باید حداقل ۱ میلی‌متر می‌بود [۳]. با توجه به این که در این شبیه‌سازی، میزان خلأ دستگاه برابر با 10^{-6} تور در نظر گرفته شد و فاصله‌ی بین پیچه‌های مغناطیسی و الکترودها ۲۰ سانتی‌متر بود، الزام‌های ایمنی دستگاه در رابطه با عدم جرقه‌زنی برآورده شد.

چشمه‌های الکترونی که در شکل ۴ با نماد EG نشان داده شده است، در وسط هر دیواره‌ی محفظه‌ی خلأ به گونه‌ای قرار گرفته بودند که الکترون گسیل شده از آن‌ها به مرکز دستگاه شلیک می‌شد. وقتی تراکم الکترون‌ها بیش‌تر می‌شد به خط‌های میدان فشار آورده و آن‌ها را به سمت خارج حرکت می‌داد. در این حالت علاوه بر ایجاد کاتد مجازی، مسیر فرار الکترون‌ها از ناحیه‌ی کاسپ نیز فشرده شده و مکان‌های نشت الکترون، به وسیله‌ی میدان‌های مغناطیسی شبه‌کروی، کوچک و کوچک‌تر می‌شد. البته با تزریق الکترون با تفنگ‌های الکترونی به داخل سامانه، جلوگیری از خروج الکترون‌ها سخت‌تر می‌شد تا در نهایت الکترون‌های تزریق شده شروع به باز کردن سوراخ‌های کاسپ می‌کردند. بنابراین لازم بود که تعداد الکترون‌های داخل دستگاه کنترل شود. از این‌رو جریان و ولتاژ کاری هر چشمه‌ی الکترونی در شبیه‌سازی به ترتیب، برابر ۲۰ آمپر و ۱۰۰ ولت در نظر گرفته شد. تعداد چشمه‌های الکترونی مدل‌سازی شده در دستگاه چهار عدد بود. در مورد قرارگیری چشمه‌های یونی دستگاه که در شکل ۴ با نماد IG مشخص شده‌اند نیز وضع به همین ترتیب بود. با این تفاوت که چشمه‌های یونی بر روی دیواره‌ی محفظه‌ی خلأ قرار نداشتند بلکه در مرکز هر پیچه‌ی مغناطیسی و نزدیک به مرکز دستگاه قرار گرفته بودند. جریان و ولتاژ کاری چشمه‌های یونی به ترتیب، برابر ۱٫۵ آمپر و ۱۰۰ ولت و تعداد چشمه‌های یونی نیز همانند چشمه‌های الکترونی چهار عدد بود.

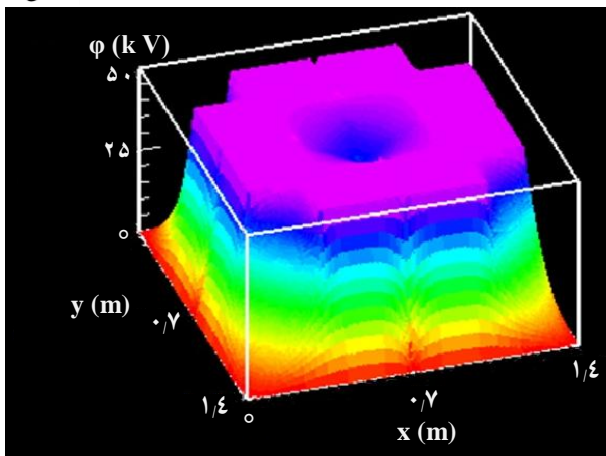
دستگاه‌ها است. هندسه‌ی راکتور، پیچه‌ها و راستای جریان سیم‌های معادل در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل EG و IG به ترتیب، محل قرارگیری تفنگ‌های الکترونی و یونی را نشان می‌دهند و V_m و V_c به ترتیب، ولتاژ اعمال شده به دیواره‌ی محفظه و پیچه‌ها و برابر با صفر و ۵۰ کیلوولت هستند. مؤلفه‌ی افقی میدان مغناطیسی شبیه‌سازی شده‌ی حاصل از پیچه‌های مغناطیسی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود بزرگی میدان در مرکز راکتور، صفر و اندازه‌ی مؤلفه‌ی افقی آن در مرکز هر پیچه برابر ۰٫۵ تسلا است؛ در نتیجه بزرگی میدان مغناطیسی در مرکز هر پیچه برابر ۰٫۷ تسلا است.



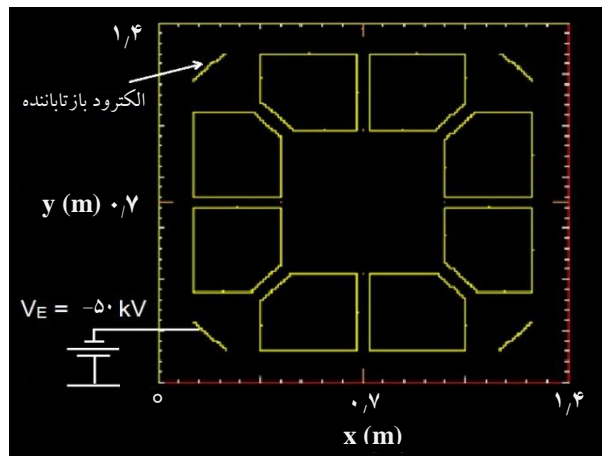
شکل ۴. سطح مقطع راکتور شامل پیچه‌ها، تفنگ‌های الکترونی (EG) و یونی (IG)، و سیم‌های معادل جریان؛ V_m : ولتاژ دیواره‌ی محفظه‌ی دستگاه؛ V_c : ولتاژ پیچه‌ها؛ \odot : برون‌سو؛ \otimes : درون‌سو.



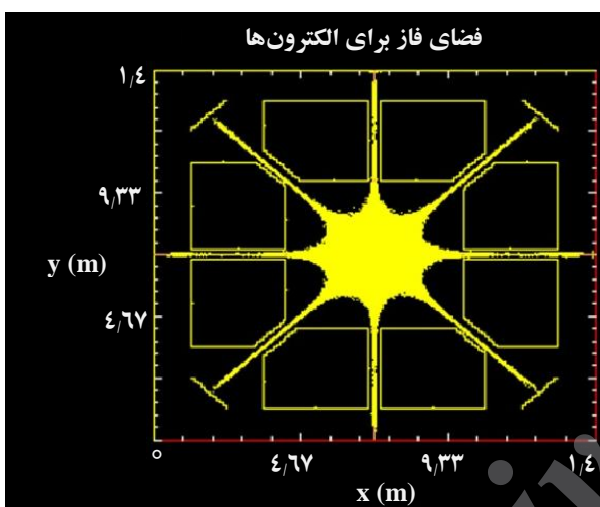
شکل ۵. بزرگی مؤلفه‌ی افقی میدان مغناطیسی در داخل راکتور.



شکل ۷. چاه پتانسیل تشکیل شده به وسیله‌ی الکترون‌ها در مرکز دستگاه پلی‌ول.



شکل ۶. سطح مقطع پیچ‌ها و الکترودهای بازتابنده در دستگاه پلی‌ول؛ V_E ولتاژ الکترودهای بازتابنده.



شکل ۸. طرح کلی چگالی الکترون در داخل رآکتور و بازتاب الکترون‌ها به مرکز رآکتور توسط الکترودهای بازتابنده.

با تشکیل چاه پتانسیل و شتاب گرفتن یون‌ها به طرف مرکز رآکتور چگالی یون‌ها و احتمال برخورد سر به سر آن‌ها به یک‌دیگر افزایش می‌یابد و در صورتی که چگالی یون به مقدار بحرانی برسد هم‌جوشی هسته‌ای رخ می‌دهد. مقدار بحرانی چگالی یون‌ها (n_i^*) چنین محاسبه می‌شود [۹]

$$n_i^* = \frac{B^2}{16\pi E_i} \quad (1)$$

که در آن B شدت میدان مغناطیسی خارجی و E_i انرژی یون‌ها در مرکز رآکتور است.

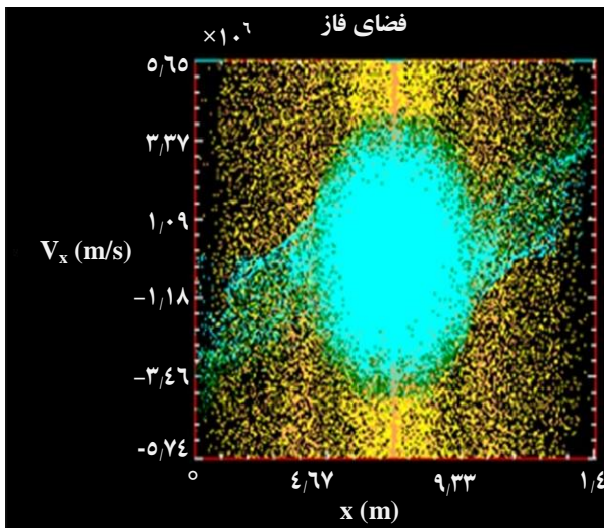
از دیگر مواردی که در این کد لحاظ شد پدیده‌ی یونش گاز موجود در محفظه‌ی خلأ بود. گاز موجود در محفظه‌ی خلأ، دوتریم در نظر گرفته شد. لذا برخورد الکترون-دوتریم و ایجاد دوتریون در این کد با وارد کردن دستور مرتبط شبیه‌سازی شد. ذره‌هایی که در کد وارد شدند شامل الکترون، دوتریم و دوتریون بودند.

۳. نتایج شبیه‌سازی و بحث و بررسی آن‌ها

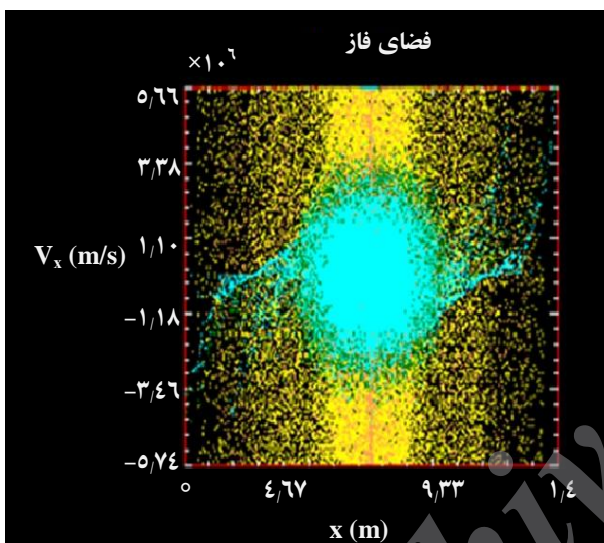
بازه‌ی زمانی اجرای برنامه‌ی شبیه‌سازی ۹ میکروثانیه بود. هر گام زمانی برابر با ۱۵۰ نانوثانیه بوده و در هر گام، برنامه مکان ذره‌های باردار را به روزرسانی می‌کرد.

وجود اختلاف پتانسیل ۵۰ کیلوولتی بین دیواره‌ی محفظه‌ی خلأ و پیچ‌ها و هم‌چنین شکل خط‌های میدان مغناطیسی موجب هدایت الکترون‌های خارج شده از تفنگ‌های الکترونی به مرکز رآکتور می‌شد. برخورد الکترون‌ها به ذره‌های گاز باعث یونش گاز شده و یون‌های مثبت تشکیل می‌شد. چون الکترون‌ها نسبت به یون‌ها سبک‌تر هستند زودتر به مرکز رآکتور رسیده و یک کاتد مجازی و چاه پتانسیل تشکیل می‌دادند که یون‌های مثبت را به سمت دستگاه جذب می‌کرد. چاه پتانسیل تشکیل شده در مرکز دستگاه در شکل ۷ نشان داده شده است.

در این شبیه‌سازی بعد از گذشت ۹ میکروثانیه سیستم به حالت تعادل رسیده و فشار رو به داخل میدان مغناطیسی با فشار رو به خارج الکترون‌های پرچگال برابر شده و عمق چاه پتانسیل تقریباً ثابت می‌ماند. طرح کلی چگالی الکترون‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹. الکترون‌ها و یون‌ها بعد از ۹ میکروثانیه در فضای فاز دستگاه (الف) بدون الکتروود و (ب) با الکتروود (رنگ سبز: یون‌های تزریق شده از تفنگ‌های یونی؛ رنگ آبی: یون‌های تولید شده از برخورد؛ رنگ زرد: الکترون‌های تزریق شده از تفنگ‌های الکترون).

جدول ۱. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی پلی‌ول و آهنک هم‌جوشی

بدون الکتروود	با الکتروود	
6.3×10^{15}	9.1×10^{15}	چگالی الکترون‌ها در مرکز (cm^{-3})
7.0×10^{15}	9.7×10^{15}	چگالی یون‌ها در مرکز (cm^{-3})
۱۴.۵	۱۳	عمق چاه در حالت تعادل (kV)
۲۵	۳۰	قطر پلاسما در مرکز (cm)
3.5×10^6	2.5×10^6	سرعت یون‌ها در مرکز (m s^{-1})
۵۱	۲۶	انرژی یون‌ها (keV)
128×10^{-7}	9.0×10^{-7}	سطح مقطع واکنش (b)
3.4×10^7	5.7×10^7	آهنک هم‌جوشی (s^{-1})

آهنک هم‌جوشی تابعی از چگالی n یون‌ها، سرعت v یون، سطح مقطع $\sigma(v)$ ، و قطر پلاسما تشکیل شده در مرکز دستگاه a ، و برابر است با [۱۰]

$$P = n^2 \langle \sigma(v)v \rangle a^2 / 2 \quad (2)$$

سرعت v یون، با استفاده از نمودار فضای فاز تعیین می‌شود. شکل ۹ فضای فاز به دست آمده در دو حالت با و بدون الکتروودهای بازتاباننده را با یکدیگر مقایسه می‌کند. مطابق شکل ۹ الف سرعت یون‌ها به $3.5 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ رسیده و انرژی هر یون برابر با ۵۱ کیلو الکترون ولت است. در حالی که در وضعیت دوم و با تعبیه‌ی الکتروودهای بازتاباننده سرعت یون‌ها مطابق شکل ۹ ب برابر با $2.5 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ و انرژی هر یون در حدود ۲۶ کیلو الکترون ولت به دست می‌آید. به نظر می‌رسد وجود الکتروودهای بازتاباننده با پتانسیل منفی باعث شده است که نیرویی به سمت خارج دستگاه به یون‌ها وارد شود. اگرچه این نیرو آنقدر نیست که یون‌ها را جذب الکتروود کرده و از رآکتور خارج کند، اما موجب کاهش انرژی آن‌ها در مرکز رآکتور شده است. افزایش چگالی یون در مرکز رآکتور در حضور الکتروودهای بازتاباننده نیز نشان می‌دهد که یون‌ها از رآکتور خارج نشده‌اند و تنها سرعت آن‌ها در مرکز کاهش یافته است (جدول ۱).

چنان‌که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، حتی در نبود الکتروودهای بازتاباننده چگالی یون‌ها در مرکز رآکتور تا 10^{15} یون در هر سانتی متر مکعب افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، طبق معادله‌ی ۱ چگالی لازم برای رسیدن به شرایط تعادل و انجام گداخت هسته‌ای در میدان مغناطیسی ۰.۷ تسلا از مرتبه‌ی 10^{13} یون در سانتی متر مکعب است. بنابراین اثبات می‌شود که در دستگاه پلی‌ول PR-IR50 هم‌جوشی هسته‌ای قابل انجام است. با استفاده از معادله‌ی ۲ آهنک هم‌جوشی برای دستگاه پلی‌ول PR-IR50 بدون الکتروود بازتاباننده $3.4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ است که در صورت تعبیه‌ی الکتروودهای بازتاباننده به $5.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد. این واقعیت نشان می‌دهد که با وجود کاهش انرژی یون‌ها در مرکز، به دلیل افزایش چگالی و افزایش قطر پلاسما مرکزی، آهنک هم‌جوشی در نهایت افزایش یافته و مقدار آن در مقایسه با حالت نبود الکتروود بازتاباننده تقریباً دو برابر شده است. بنابراین نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وجود این صفحه‌های بازتاباننده در دستگاه پلی‌ول به افزایش آهنک هم‌جوشی کمک کرده و باعث بهبود عملکرد آن می‌شود.



مرجع‌ها

- [1] E. Haji Ebrahimi, R. Amrollahi, A. Sadighzadeh, M. Torabi, M. Sedaghat, R. Sabri, B. Pourshahab, V. Damideh, The influence of cathode voltage and discharge current on neutron production rate of inertial electrostatic confinement fusion (IR-IECF), *Journal of Fusion Energy*, 32 (1) (2013) 62-65.
- [2] V. Damideh, A. Sadighzadeh, A. Koochi, A. Asalezaem, A. Heidarnia, N. Abdollahi, F. Abbasi Davani, R. Damideh, Experimental study of the iranian inertial electrostatic confinement fusion device as a continuous neutron generator, *Journal of Fusion Energy*, 31 (2) (2012) 109-111.
- [3] W.W. Flint, Safe, Green, Clean-the p-B Polywell: A Different Kind of Nuclear, (2008).
- [4] T. Ligon polywell interview, 21 (2009), Transcript by Matt Moynihan, April 29 (2010).
- [5] M. Duncan, Should Google Go Nuclear? Inertial electrostatic confinement fusion provides a potential breakthrough in designing and implementing practical fusion power plants, 24, November (2008).
- [6] R.W. Bussard, The advent of clean nuclear fusion: superperformance space power and propulsion, in 57th International Astronautical Congress (IAC, Valencia, Spain, 2006).
- [7] F. Kazemyzade, H. Mehdipoor, A. Bagheri, S. Khademzade, E. Hajiebrahimi, Z. Gheisari, A. Sadighzadeh, V. Damideh, Dependence of Potential Well Depth on the Magnetic Field Intensity in a Polywell Reactor, *Journal of Fusion Energy*, 31 (4) (2012) 341-345.
- [8] J.G. Rogers, PIC Simulation of Polywell, in 11th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion (Madison, Wisconsin, USA, 2009).
- [9] J.D. Huba, Revised NRL Plasma Formulary (2002), http://wwwppd.nrl.navy.mil/nrlformulary/NRL_FORMULARY_02.pdf. Accessed 10 Jul 2011.
- [10] J.G. Rogers, Steady state polywell fusion device designed using 2D simulation, in 10th Annual US-Japan IEC Conference, Kyoto University (2008).

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد دستگاه پلی‌ول PR-IR50 در حضور و عدم حضور الکترودهای بازتاباننده با استفاده از کد آپیک شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای اثرگذار رآکتور پلی‌ول شامل چگالی الکترون‌ها و یون‌ها، عمق چاه پتانسیل، انرژی یون‌ها، قطر پلاسما در مرکز دستگاه و آهنگ هم‌جوشی در این شبیه‌سازی محاسبه شدند. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که چگالی الکترون‌ها در مرکز دستگاه برابر با $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ است. این چگالی از مقدار بحرانی مورد نیاز برای انجام هم‌جوشی هسته‌ای بالاتر است و در نتیجه امکان انجام واکنش هم‌جوشی هسته‌ای در PR-IR50 اثبات می‌شود. آهنگ هم‌جوشی آن بدون نصب الکترودهای بازتاباننده برابر 3.4×10^7 واکنش در ثانیه است. علاوه بر این نتیجه‌ها، این بررسی نشان داد که در حضور الکترودهای بازتاباننده چگالی یون‌ها در مرکز دستگاه افزایش یافته و آهنگ هم‌جوشی به $5.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ارتقا می‌یابد.

پی‌نوشت‌ها

1. Breakeven fusion energy gain factor
2. R. Bussard
3. Cusp
4. Object oriented particle-in-cell



Archive of SID