

شبیه‌سازی ذره در سلول مشخصات فیزیکی پلاسما در محفظه تراستر هال

پریا ابوحمزه^۱، فاطمه اسدی^{۲*}، علیرضا نیکنام^۳

^۱ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران Parvaabouhamzeh@gmail.com

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران fateameasadi@gmail.com

^۳ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران a-niknam@sbu.ac.ir

* آدرس رایانامه نویسنده مسئول: fateameasadi@gmail.com

کلید واژه: پلاسما، تراستر هال، شبیه‌سازی ذره در سلول

چکیده:

تراستر هال یکی از امید بخش‌ترین سیستم‌ها برای نگهداشت مداری ماهواره‌ها می‌باشد. ایده اصلی تراسترهای هال شامل تولید میدان الکتریکی قوی در پلاسما همراه با میدان مغناطیسی عمود بر آن و کاهش رسانندگی الکترون‌ها می‌باشد. این میدان الکتریکی یون‌ها را از پلاسما جدا کرده و به سمت خروجی با سرعت‌های بالا شتاب می‌دهد و در نتیجه تولید تراستر می‌کند. در این پژوهش بر پایه برنامه شبیه‌سازی ذره در سلول (PIC) الکترواستاتیک 2D-3V توسط زبان برنامه نویسی پایتون، پارامترهای اساسی در محفظه یک تراستر هال مورد بررسی قرار گرفته است. این شبیه‌سازی در مختصات استوانه‌ای ($r-z$) با تقارن محوری می‌باشد. ما نمودارهای فضای فاز الکترون‌ها و یونها در دو راستا، تحول زمانی میدان الکتریکی و همچنین تحول زمانی چگالی کل را رسم کرده ایم.

Particle-in-cell simulation of physical characteristics of plasma in Hall thruster chamber

Parya Abouhamzeh, Fatemeh Asadi*, Ali Reza Niknam

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

*corresponding e-mail: fateameasadi@gmail.com

Abstract:

Hall thruster is one of the most promising systems for satellites circular orbit keeping. The basic idea of Hall thrusters is to produce a large electric field in plasma by applying a transverse magnetic field to reduce the electrons conductivity. This electric field separates the positive ions from the plasma and accelerates them to high velocity without extracting grids, thus producing a thrust. In this research, based on the 2D-3V electrostatic particle-in-cell (PIC) simulation program by Python programming language, the basic parameters in the chamber of Hall thruster are investigated. This simulation is in a cylindrical coordinate system ($r-z$) with axial symmetry. We have plotted the phase-space diagrams for electrons and ions in two directions, the temporal evolution of the electric field and also the temporal evolution of total density.

Keywords: Plasma, Hall thruster, Particle-in-cell simulation

مقدمه:

امروزه بخش وسیعی از پژوهش‌های مراکز مهم فضایی دنیا به پیشران‌های فضایی اختصاص یافته است. سامانه پیشران‌ها، وظیفه تامین تراست مورد نیاز برای انجام یک ماموریت فضایی را بر عهده دارد. سیستم‌های پیشران‌های فضایی به دو دسته الکتریکی و شیمیایی تقسیم بندی می‌شوند. پیشران‌های الکتریکی، هر نوع تکنولوژی پیشران‌ها را که در آن از الکتریسیته برای افزایش سرعت آگروز (خروجی) استفاده شود، در بر می‌گیرد. عمده‌ترین سیستم‌های پیشران‌های الکتریکی شامل: رانشگرهای الکتروترمال، الکترواستاتیک و الکترومغناطیس هستند [۱]. تراسترهای هال، از نوع تراسترهای الکترواستاتیک هستند که از یک تخلیه میدان عرضی که توسط اثر هال برای تشکیل پلازما توصیف می‌شود، بهره می‌برند. این تراستر اولین بار در سال ۱۹۰۶ توسط رابرت گدارد پیشنهاد شد [۲]. در تراستر هال، سوخت تراستر که معمولاً گاز زنون است از روزنه‌ای روی آند وارد محفظه شده و یک میدان مغناطیسی شعاعی توسط مگنت‌ها یا کویل‌های مغناطیسی اطراف، اعمال می‌شود. میدان مغناطیسی سرعت محوری الکترون‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. یون‌های بسیار ضعیف نیز تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند و اگر چگالی به اندازه کافی کم باشد، به طوری که برخوردها بسیار محدود باشند، یون‌ها توسط میدان الکترواستاتیک با سرعت به سمت خروجی محفظه شتاب می‌گیرند. فرآیند اصلی در تراستر هال تولید جریان هال می‌باشد که به آن اثر هال می‌گویند. اثر هال عبارت است از اختلاف پتانسیلی که درون یک رسانا توسط اعمال یک میدان مغناطیسی یکنواخت عمود بر جریان ایجاد می‌شود [۱]. پیچیدگی فیزیک تراسترهای هال در کنار مشکلات و سختی‌های آزمایشگاهی در تحقیقاتی با مقیاس‌های به این کوچکی، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی

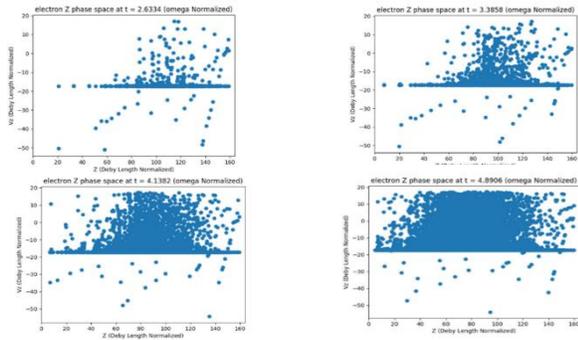
را تبدیل به یک ابزار اساسی برای فهم و بهینه سازی این تراسترها کرده است.

مواد و روش‌ها:

برنامه شبیه‌سازی طراحی شده در این پژوهش، شبیه‌سازی محفظه‌ی یک تراستر هال و بررسی پارامترهای موجود در آن است. با توجه به هندسه در نظر گرفته شده، مسئله در مختصات استوانه‌ای با تقارن محوری نسبت به محور Z حل شده است. در حالت دوبعدی، مسئله اصلی شامل یک مستطیل که نشانگر قطاعی از محفظه تراستر خواهد بود، می‌باشد که سمت چپ آن آند با پتانسیل مشخص قرار داشته و سمت چپ همان خروجی تراستر با پتانسیل صفر است که از طرفی محل ورود الکترون‌ها از کاند خارجی می‌باشد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی از روش ذره در سلول (PIC) استفاده شده است [۳ و ۴]. کد نوشته شده در دسته‌ی کد 2D3V PIC-MCC قرار می‌گیرد، این بدان معناست که ذرات در فضای فاز ۵ بعدی با دو بعد مکانی و سه بعد سرعت توصیف می‌شوند. برای وارد کردن برخورد ها و بررسی یونیزاسیون ذرات از روش مونت کارلو (MCC) استفاده شده است [۵].

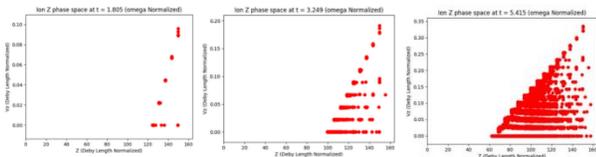
شبیه‌سازی با انتخاب پارامترهای آن چیده می‌شود که این پارامترها شامل: اندازه مش‌ها، گام‌های زمانی، توزین سوپرپارتیکل‌ها می‌باشد. برای حل مسئله از یک چرخه‌ی PIC-MCC، پس از حل معادلات ماکسول به سراغ بدست آوردن میدان‌ها و نیروها موثر روی ذره می‌رویم. سپس ذرات را با حل معادله حرکت آن‌ها، حرکت داده و برخورد ها و شرایط مرزی را وارد می‌کنیم. در انتها مقادیر ماکروسکوپی، مانند چگالی را که ورودی معادلات ماکسول هستند، به روز رسانی می‌کنیم [۶]. برای حل معادله‌ی پواسون، که بخش اصلی حل معادله میدان در چرخه‌ی روش ذره در سلول را تشکیل می‌دهد، از روش تفاضل محدود (FDM) استفاده می‌شود [۴]. اگرچه مسئله در حالت

تزریق آنها فقط با سرعت محوری می باشد. سپس تحت تاثیر میدان مغناطیسی حرکت آنها کند شده و به دام می افتند، سپس سرعت آنها در جهت محور Z کاهش می یابد. طبق شکل ۲ کاهش مقدار سرعت محوری الکترون محسوس است.



شکل ۲. تحول زمانی نمودار فضای فاز الکترون ها با سرعت محوری نرمال در راستای Z

فضای فاز یون ها در راستای محور Z: در شکل ۳ نمودار فضای فاز یون های تولیدی در راستای محور Z مشاهده می شود. یون ها در ابتدا ساکن و با سرعت صفر دیده می شوند. با گذشت زمان و تحت تاثیر میدان الکتریکی قوی، در راستای محور شتاب گرفته و شروع به افزایش سرعت می کنند. نمودار نشان می دهد همان طور که انتظار می رفت، یون های نزدیک به خروجی دارای سرعت بیشتری هستند. خروج این یون ها با بیشترین سرعت در نزدیکی انتهای محفظه یا به عبارتی آگزوز تراستر، نشان دهنده درست کار کردن برنامه ی شبیه ساز می باشد.



شکل ۳. تحول زمانی نمودار فضای فاز یون ها با سرعت محوری نرمال در راستای Z

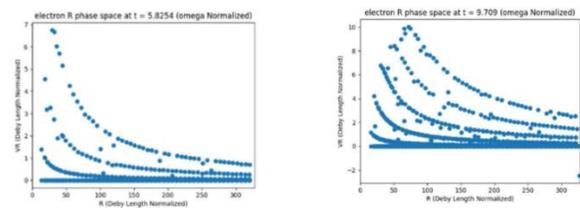
تحولات میدان الکتریکی محوری: با ورود اولیه ی الکترون ها، میدان الکتریکی یکنواختی در جهت محور Z خواهیم داشت. با ورود الکترون های بیشتر، این میدان نیز

الکترواستاتیک است و میدان فقط شامل معادله پواسون می باشد، ولی کد دارای یک میدان مغناطیسی خارجی است که منجر به استفاده از روش بوریس جهت حل معادله حرکت ذرات می شود [۷].

بحث و نتایج:

از آنجایی که در تراستر ها، الکترون ها نقش تولید جریان ها و شتابدهی یون ها را دارند، مکان، حرکت و فضای فاز آن ها در دو راستای شعاعی و محوری دارای اهمیت است. همچنین از آنجا که عامل ایجاد تراست و ضربه ویژه در تراسترها، یون های سنگین و شتاب گرفته هستند، در نتیجه بررسی و دنبال کردن مکان و فضای فاز آن ها از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین جهت، خروجی های اولیه برنامه شبیه سازی نوشته شده شامل تمامی موارد مذکور هستند که در ادامه به بررسی مهم ترین آن ها می پردازیم.

فضای فاز الکترون ها در راستای شعاعی ۴: در شکل ۱، نمودار تحولات فضای فاز الکترون ها را در راستای شعاعی مشاهده می کنید. الکترون ها در هنگام تزریق رندوم به محفظه، دارای سرعت شعاعی نیستند و فقط در جهت محور Z دارای سرعت گرمایی از مرتبه ی میلیون هستند. پس از قرارگیری در میدان مغناطیسی، نمودار فضای فاز آنها نشان می دهد که سرعت شعاعی پیدا نموده و شروع به چرخیدن در راستای خطوط میدان مغناطیسی می کنند.



شکل ۱. تحول زمانی نمودار فضای فاز الکترون ها با سرعت شعاعی نرمال در راستای شعاعی ۴

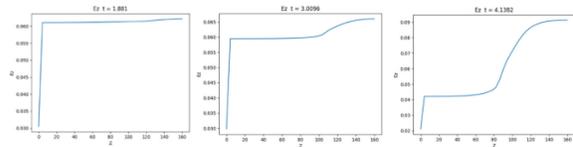
فضای فاز الکترون ها در راستای محور Z: الکترون ها به صورت یکنواخت از سمت راست محفظه در هر چند گام زمانی با سرعت های ماکسولی به سیستم تزریق میشوند که

همچنین امکان اجرا برای زمان‌های طولانی‌تر را دارد. همچنین با کمک این برنامه و با گذشت زمان بیشتر و نزدیک شدن به حالت پایدار سیستم، می‌توان به بررسی ناپایداری‌های موجود در محفظه، بررسی نقش پروفایل و طراحی میدان مغناطیسی، بررسی حرکت الکترون‌ها در حالت پایدار سیستم، بررسی گسیل الکترون‌های ثانویه و کندو پاش دیواره و همین‌طور اهمیت جنس دیوارهای سرامیکی اشاره کرد.

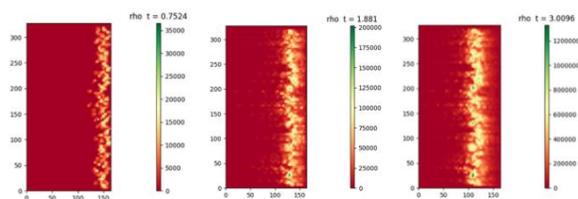
مرجع‌ها:

- [1] Goebel, D. M., & Katz, I. (2008). *Fundamentals of electric propulsion: ion and Hall thrusters* (Vol. 1). John Wiley & Sons.
- [2] Choueiri, E. Y. (2004). A critical history of electric propulsion: The first 50 years (1906-1956). *Journal of Propulsion and Power*, 20(2), 193-203.
- [3] Liu, H., & Duan, P. (2010). Particle-in-cell simulation of a Hall thruster. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(16), 165202.
- [4] Lapenta, G. (2012). Particle simulations of space weather. *Journal of Computational Physics*, 231(3), 795-821.
- [5] Vahedi, V., & Surendra, M. (1995). A Monte Carlo collision model for the particle-in-cell method: applications to argon and oxygen discharges. *Computer Physics Communications*, 87(1-2), 179-198.
- [6] Timkó, H. (2011). *2D Arc-PIC code description: methods and documentation* (No. CERN-OPEN-2011-027).
- [7] Birdsall, C. K. (1991). Particle-in-cell charged-particle simulations, plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC. *IEEE Transactions on plasma science*, 19(2), 65-85.
- [8] Croes, V. & Chabert, P. (2017). 2D particle-in-cell simulations of the electron drift instability and associated anomalous electron transport in Hall-effect thrusters. *Plasma Sources Science and Technology*, 26(3), 034001.

شروع به تغییر می‌کند. در شکل ۴، تحولات میدان الکتریکی با گذشت زمان و با تحول سیستم مشاهده می‌شوند. در تراستر هال، میدان الکتریکی در خروجی باید ماکزیمم مقدار را داشته باشد که همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در سمت راست تصویر (خروجی تراستر) مقدار میدان الکتریکی ماکزیمم است و مقدار این میدان که در حال شتاب دهی یون‌ها است با گذشت زمان در حال افزایش می‌باشد.



شکل ۴. تحولات زمانی میدان الکتریکی در راستای محور Z -تحولات زمانی چگالی کل سیستم: طبق شکل ۵، با گذشت زمان، چگالی سیستم در حال افزایش است زیرا به طور همزمان هم تزریق الکترون و هم یونیزاسیون اتفاق می‌افتد. تغییرات رنگ در شکل به خوبی نمایانگر این موضوع می‌باشد. تغییرات مشاهده شده در چگالی سیستم اگرچه پس از مدت زمان کم و تعداد گام‌های زمانی کوتاهی مشاهده شد، اما در تطابق خوبی با مشاهدات مقالات مشابه [۸] می‌باشد.



شکل ۵. تحولات چگالی کل سیستم

نتیجه‌گیری:

برنامه شبیه‌سازی ارائه شده در این تحقیق بر مبنای شبیه‌سازی یک تراستر هال و شبیه‌سازی پتانسیل فضا در این منطقه و همچنین بررسی پارامترهای موجود با موفقیت انجام گرفت. همانطور که مشاهده شد، با گذشت زمان میدان الکتریکی و چگالی کل سیستم افزایش یافتند. این برنامه امکان توسعه به هندسه‌های متفاوت، شرایط مرزی متفاوت و