



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 37-47
2022

DOI:

10.22034/jssta.2022.365419.1093

Article Info

Received: 2022-10-15
Accepted: 2022-12-05

Keywords

Hall thruster, Hollow
cathode, PIC simulation

How to Cite this article

Masumeh Kiantaj, Morteza Farhid, Mohammad Mehdi Shafie, Mohammad Reza Morad, "Simulation of Hollow Cathode in the Hall Thruster by Particle in Cell (PIC) Method", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 2 (2), p.: 37-47, 2023.

Simulation of Hollow Cathode in the Hall Thruster by Particle in Cell (PIC) Method

Masumeh Kiantaj^{*1}, Morteza Farhid²
Mohammad Mehdi Shafie³, Mohammad Reza Morad⁴

1,*. Space Thrusters Research Institute, Tabriz, Iran
m.kiantaj@gmail.com, Corresponding author

2. Space Thrusters Research Institute, Tabriz, Iran, farhid@isrc.ac.ir

3. Space Thrusters Research Institute, Tabriz, Iran, Mehdishafie@Tabrizu.ac.ir

4. Aerospace Group, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, morad@sharif.ir

Abstract

The this article the characteristics of the hollow cathode plasma particles in the spt-100 hall effect thruster have been investigated by two-dimensional particle-in-cell simulation. One of the main and important components of the hall thruster is hollow cathode which plays two important tasks: one part of the electrons that come from the cathode used for anode propellant ionization, and the other part plays an important role of neutralizing the ion beam coming out of the thruster. Therefore, the study of the hollow cathode characteristic is importance. Krypton is used as fuel in this system. Potential changes, density of electrons, ions and temperature of particles have been studied throughout the simulation area. The results show that corresponding to the electrons, the ion density also decreases from the maximum value in the cathode ionization region exponentially through outer chamber. Also, analyzing normalized radius regard to electron density shows that the cathode effective area in which the radius electron temperature reaches maximum value is located about 1.5mm from the center line of the hallow cathode.



شبیه‌سازی کاتد توخالی در رانشگر اثر هال به روش ذره در سلول (PIC)

معصومه کیانتاژ^{۱*}، مرتضی فرهید^۲، محمدمهدی شفیعی^۳، محمدرضا مراد^۴

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۳۷-۴۷
باییز و زمستان ۱۴۰۱

۱. *، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، تبریز، ایران، m.kiantaj@gmail.com (نویسنده مسئول)

۲. پژوهشکده رانشگرهای فضایی، تبریز، ایران، m.farhid@isrc.ac.ir

۳. پژوهشکده رانشگرهای فضایی، تبریز، ایران، Mehdishafie@Tabrizu.ac.ir

۴. گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، morad@sharif.ir

چکیده

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی ذره در سلول (PIC)، مشخصات ذرات پلاسمای کاتد توخالی رانشگر اثر هال SPT-100، مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از اجزای اصلی و مهم رانشگر اثر هال، کاتد توخالی است که دو وظیفه مهم برعهده دارد: بخشی از الکترون‌هایی که از سمت کاتد می‌آیند باعث یونیزاسیون ماده پیشران در آند می‌شوند و بخشی دیگر نقش مهم خنثی کردن باریکه یونی خارج شده از رانشگر را برعهده دارند. از این‌رو، مطالعه کاتد توخالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سوخت مورد استفاده در این سیستم، کریپتون است. تغییرات پتانسیل، چگالی الکترون‌ها، یون‌ها و دمای ذرات در سراسر ناحیه شبیه‌سازی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، متناظر با الکترون‌ها، چگالی یون نیز از مقدار بیشینه در ناحیه یونش کاتد به شکل نمایی در طول محفظه کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین، بررسی شعاع نرمالیزه، بر حسب چگالی الکترون‌ها نیز بیانگر آن است که ناحیه موثر کاتد یا شعاعی که دمای الکترون‌ها به میزان بیشینه خود می‌رسد، در حدود ۱/۵ میلی‌متری خط مرکز کاتد توخالی قرار دارد.

DOI:

10.22034/jssta.2022.365419.1093

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴

واژه‌های کلیدی

رانشگر اثر هال، کاتد توخالی،
شبیه‌سازی ذره در سلول

نحوه استناد به این مقاله

معصومه کیانتاژ، مرتضی فرهید،
محمدمهدی شفیعی، محمدرضا مراد.
"شبیه‌سازی کاتد توخالی در رانشگر
اثر هال به روش ذره در سلول
(PIC)"، دو فصلنامه علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره
دوم، صفحات ۳۷-۴۷، ۱۴۰۱.

ترمیونی در گسیلنده کاتد توخالی رانشگر اثر هال وجود دارد. گسیلنده تنگستنی بارور شده با اکسید باریوم و گسیلنده‌های لانتانیم هگزابوراید. گسیلنده‌های تنگستنی در ایالات متحده در رانشگرهای یونی [۶]XIPS، [۷]NSTAR و رانشگر اثر هال Aerojet XR5 [۸]، Busek BHT200 [۹] مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از تنگستن متخلخل بارور شده با اکسید باریوم و کلسیم و آلومینا تشکیل شده است. اکسید باریوم اضافه شده به تنگستن متخلخل، باعث کاهش تابع کار تنگستن از $4/5$ الکترون ولت به $2/06$ الکترون ولت در دمای 1000°C می‌شود. با وجود کارکرد در دمای نسبتاً پایین این گسیلنده‌ها نسبت به گسیلنده‌های لانتانیم هگزابوراید^۷ (1600°C)، نسبت به ناخالصی‌ها بسیار حساس هستند زیرا تابع کار پایین در اثر واکنش شیمیایی ایجاد می‌شود. بنابراین، کاتدهای BaO-W، به روش‌های دقیق‌تری نیاز دارند زیرا بخار آب و ناخالصی‌های گاز پیشران باعث کاهش عمر کاتد یا اتلاف گسیل الکترون می‌شوند. هم‌چنین، بیشینه چگالی جریان انتشاری از این نوع کاتد به دلیل کاهش سطح در اثر تبخیر بیش از حد به 20 A/cm^2 محدود می‌شود [۱۰]. بیشینه جریان تخلیه در این کاتد نباید بیشتر از ۱۰۰ آمپر باشد تا از گرم شدن بیش از حد و کاهش طول عمر کاتد جلوگیری کند.

لانتانیم هگزابوراید نوع دیگری از گسیلنده‌های ترمیونی هستند که به طور گسترده در رانشگرهای اثر هال روسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مقایسه با کاتدهای BaO-W، کاتدهای LaB6 دمای کارکردی بالایی در حدود 1700°C نیاز دارند. طراحی گرمکن الکتریکی، یکی از مسئله‌های مهم در این نوع کاتدها است. اما با وجود کارکرد در دمای بالا، استحکام قابل توجهی در برابر ناخالصی، قابلیت انتشار چگالی جریان بالاتر و طول عمر بیشتری دارند. گسیلنده الکترون LaB6، یک ماده پلی کریستالی با تابع کار حدود $2/67\text{ eV}$ است. هیچ واکنشی در فرایند انتشار دخیل نیست زیرا انتشار الکترون ترمیونی در حجم ماده تولید می‌شود [۵].

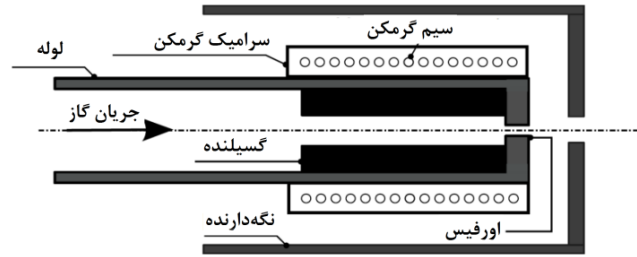
رانشگر اثر هال، پرکاربردترین نوع رانشگر الکتریکی است که روند استفاده از این رانشگر در ماهواره‌ها برای اهداف ارتقای مداری، کنترل وضعیت، اکتشافات بین ستاره‌ای رو به افزایش است. یکی از اجزای اصلی و مهم رانشگر اثر هال، کاتد توخالی است که در خروجی کانال تخلیه نصب شده و به عنوان منبع تولید الکترون برای رانشگر عمل می‌کند. بخشی از این الکترون‌ها، وارد محفظه تخلیه رانشگر شده و باعث یونیزاسیون سوخت در آند می‌شود و بخش دیگر، نقش مهم خنثی کردن باریکه یونی خارج شده از رانشگر را برعهده دارد. از این‌رو، مطالعه کاتد توخالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. شماتیک کاتد توخالی در شکل ۱ نشان داده شده است. کاتد، لوله‌ای نازک و بلند است که از ماده‌ای با مقاومت حرارتی بالا و مقاوم در برابر اکسید شدن ساخته می‌شود که گسیلنده^۱ را در خود جای می‌دهد. در این پژوهش، جنس لوله کاتد، مولیبدن^۲ است. گسیلنده الکترون، از موادی با تابع کار پایین^۳ ساخته می‌شود که تحت مکانیسم ترمیونی^۴، باعث گسیل الکترون می‌شود. گرمکن الکتریکی، در خارج گسیلنده، دور لوله کاتد قرار می‌گیرد که متشکل از سیم تنگستنی دور عایق الکتریکی سرامیکی است و باعث گرمایش ماده گسیلنده می‌شود. دور لوله کاتد، لوله رسلنای استولنه‌ای به نام نگه‌دارنده^۵ قرار دارد که فلزی نسوز از گرافیت یا مولیبدن است که با فاصله چندین میلی‌متر و به صورت هم محور با کاتد قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی الکتروود نگه‌دارنده، تسهیل شروع تخلیه کاتد و شتاب دادن الکترون‌ها برای شروع تخلیه است. نگه‌دارنده به طور معمول نسبت به کاتد دارای ولتاژ مثبت است تا باعث شروع تخلیه هنگام راه‌اندازی کاتد شود. هم‌چنین نگه‌دارنده، کاتد را در برابر بمباران یونی که از پلاسمای رانشگر حاصل شود محافظت می‌کند. صفحه روزنه^۶، فلزی نسوز است که در انتهای لوله کاتد، جوش داده می‌شود. دلیل استفاده از روزنه نگه‌داشتن فشار داخلی لوله کاتد در حدود $10^3 - 10^4\text{ pa}$ و هم‌چنین، کمک به گرم شدن گسیلنده‌ها است [۲-۵]. دو نوع فناوری گسیل

5 keeper
6 orifice
7 Lanthanum hexaboride

1 dispenser
2 Molybdenum
3 low work function materials
4 Thermionic emission

۳- معادلات شبیه‌سازی

شبیه‌سازی ذره در سلول مبتنی بر بیان جنبشی از پلازما است. در این روش، تابع توزیع ذرات با استفاده از مجموعه‌ای از ذرات گسسته در فضای فاز تقریب زده می‌شود که این ذرات در واقع تعداد زیادی ذرات فیزیکی موسوم به ابرذرات^۴ هستند که از مسیر یکسانی در فضای فاز پیروی می‌کنند. این ذرات نمی‌توانند به صورت مستقیم از ذرات مشابه نیرو دریافت کنند بلکه همدیگر را از طریق شبکه احساس می‌کنند (سهمی از چگالی بار و جریان که در نقاط توری ذخیره شده‌اند). میدان‌ها نیز تنها روی نقطه‌های شبکه‌ها محاسبه می‌شوند. در شبیه‌سازی ذره در سلول، بارها در لحظه اول دارای موقعیت و سرعت مشخصی هستند. با توجه به موقعیت و سرعت اولیه، از حل معادلات چگالی بار و جریان، این دو کمیت به دست خواهند آمد. در مرحله بعد، با حل معادلات ماکسول^۵، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به دست می‌آوریم و با داشتن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و حل معادله نیوتون موقعیت و سرعت در لحظه بعدی به دست می‌آید که این چرخه پیوسته در حال تکرار است [۱۲]. در این روش، شبیه‌سازی بر اساس اثر هر ذره بر روی گره‌های اطراف آن انجام می‌شود. محاسبه چگالی بار ناشی از هر ذره، بر روی گره‌های اطراف با استفاده از مکان و سرعت اولیه ذرات انجام می‌شود. در شبیه‌سازی دو بعدی، ذره می‌تواند بر چهار گره اطراف خود وزن ایجاد کند. در شکل ۲، شبکه‌بندی فضای دو بعدی نشان داده شده است که گره‌ها در راستای x در $X_j = j\Delta x$ و در راستای y در $Y_k = k\Delta y$ قرار دارند.



شکل ۱. ساختار کاتد توخالی

در این پژوهش، جنس گسیلنده، $BaO-W$ است. کاتد توخالی به روش ذره در سلول^۱ شبیه‌سازی شده و چگالی الکترون و یون، تغییرات پتانسیل و دمای ذرات در ناحیه شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل گسیل الکترون

عمر کاتد از میزان تبخیر سطح ماده گسیلنده در دمای مورد نظر T که برای گسیل ترمیونیک لازم است، تعیین می‌شود. چگالی جریان گسیلی ترمیونی^۲ از قانون ریچادرسون^۳ به صورت زیر در محاسبات لحاظ شده است [۱۱].

(۱)

$$j_e = DT_{wall}^2 \exp(-e_{wf} / KT_{wall}) \exp(e\phi_{sh} / kT_{wall})$$

$$\phi_{sh} = \sqrt{(eE_{wall} / 4\pi\dot{Q}_0)} \quad (۲)$$

$$D = 1.2 \times 10^6 \quad (۳)$$

T_{wall} به ترتیب میدان الکتریکی و دمای گسیلنده است. E_{wall} در هر گام زمانی در کد محاسبه شده و فرض شده که گسیلنده در طول شبیه‌سازی دارای توزیع یکنواخت دما است (حدود ۱۴۰۰ درجه کلونین). ϕ_{wf} ، تابع کار گسیلنده و D ثابتی است که به ماده گسیلنده بستگی دارد. میدان شاتکی^۳، باعث افزایش گسیل الکترون می‌شود.

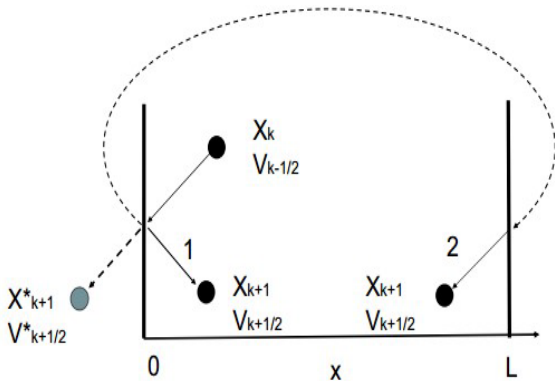
4 Macro particles
5 Maxwell's equations

1 PIC
2 Richardson
3 Schottky field

$$\nabla^2 \varphi(x, y) = -\frac{\rho(x, y)}{\epsilon_0} \quad (8)$$

$$\frac{\varphi_{j-1} - 2\varphi_j + \varphi_{j+1}}{\Delta X^2} + \frac{\varphi_{k-1} - 2\varphi_k + \varphi_{k+1}}{\Delta Y^2} = -\frac{\rho_{j,k}}{\epsilon_0} \quad (9)$$

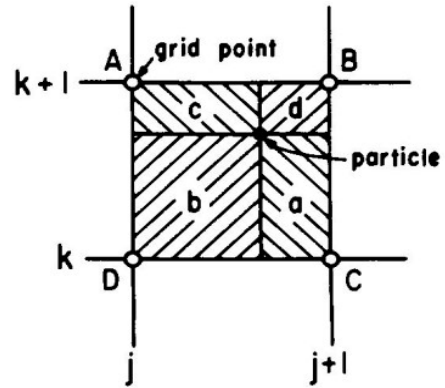
برای این که یک سیستم فیزیکی به خوبی نشان داده شود، باید شرایط مرزی مناسبی برای ذرات و میدان‌ها انتخاب شود. در شبیه‌سازی پلاسمایی که مرزهای آن بسته است، ذرات در برخورد با مرز جذب شده و از بین می‌روند. بنابراین، باید از حافظه شبیه‌سازی پاک شوند اما ذرات در برخورد با مرزهایی که بسته نیستند، می‌توانند بازتاب شوند یا این که از طرف مخالف دوباره وارد محدوده شبیه‌سازی شوند که در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۳. شرط مرزی ذرات: (۱) بازتاب ذرات، (۲) تزریق دوباره ذره از سرعت مجازی ذرات است اگر هیچ $V_{k+1/2}^*$ و X_{k+1}^* طرف مخالف، گونه مرزی وجود نداشت [۱۳].

مدل بازتابی که اغلب استفاده می‌شود، مدل بازتاب آینه‌ای است که در آن سرعت و مکان جدید ذره به صورت زیر است:

$$X_{n+1}^{ref} = -X_{n+1} \quad (10)$$



شکل ۲. وزن دهی خطی ذرات بر نقاط شبکه در دو بعد [۱۳]

به این ترتیب، در شبیه‌سازی دو بعدی، سهم بار بر گره‌های اطراف برابر است با:

$$\rho_{j,k} = \rho_c \frac{(\Delta X - x_i)(\Delta Y - y_i)}{\Delta X \Delta Y} \quad (4)$$

$$\rho_{j+1,k} = \rho_c \frac{x_i(\Delta Y - y_i)}{\Delta X \Delta Y} \quad (5)$$

$$\rho_{j+1,k+1} = \rho_c \frac{x_i y_i}{\Delta X \Delta Y} \quad (6)$$

$$\rho_{j,k+1} = \rho_c \frac{(\Delta X - x_i) y_i}{\Delta X \Delta Y} \quad (7)$$

که ρ_c چگالی بار یکنواختی است که سلول را پر کرده و برابر q/area است. بعد از محاسبه چگالی‌های بار و جریان در نقاط شبکه، مرحله بعد محاسبه میدان‌ها است. بدین منظور، باید از معادلات ماکسول، انتگرال‌گیری کرد تا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به دست آیند. در کد الکترواستاتیک، تنها حل معادله پواسون^۱ کافی است. با حل معادله پواسون (۸) به روش تفاضل محدود در دو بعد و اعمال شرایط مرزی، پتانسیل در هر نقطه شبکه محاسبه شده است:

$$Q = -((5/2)D_e)\nabla(n_e T_e) - ((5/2)\mu_e)En_e T_e \quad (17)$$

جمله اول در معادله (۱۶) هدایت حرارتی، جمله دوم انتقال حرارت به خاطر سوق الکترون در میدان الکتریکی E، جمله اول سمت راست معادله (۱۶) بیانگر گرمایش ژول الکترون‌ها در میدان الکتریکی E، جمله دوم اتلاف انرژی الکترون‌ها در برخوردهای الاستیک با اتم‌ها و مولکول‌ها را بیان می‌کند که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$S_{elastic}^{T_e} = (3/2)\delta v_{ea} n_e (T_e - T_g) \quad (18)$$

که $(\delta = 2m_e/M_a)$ و v_{ea} ، فرکانس موثر برخوردهای الکترون-اتم را بیان می‌کند. جمله سوم که اتلاف‌های غیرالاستیک الکترون را نشان می‌دهد، برابر است با:

$$S_{inelastic}^{T_e} = \sum_k \Delta \varepsilon_k R_k \quad (19)$$

در این رابطه، $\varepsilon_k \Delta$ انرژی اتلافی یا کسب شده توسط الکترون در K امین واکنش و R_k نرخ واکنش است.

۴- مشخصه‌های شبیه‌سازی

در این تحقیق، برای مطالعه و بررسی پلاسمای تشکیل شده در کاتد توخالی، از کد دو بعدی XOOPIC استفاده شده است. این کد در سال ۱۹۹۵، توسط گروه تئوری و شبیه‌سازی پلاσμα (PTSG)^۱ دانشگاه برکلی کالیفرنیا^۲ تحت مدیریت پروفیسور بردسل^۳ و پس از او پروفیسور وربونکور^۴ [۱۴، ۱۵] شده است این کد با استفاده از زبان برنامه نویسی شیء‌گرای C++ نوشته شده و تحت سیستم عامل لینوکس قابل اجراست. تعداد گره‌های محاسباتی بهینه در راستای افقی ۱۰۰۰ و در راستای شعاعی ۹۰۰ انتخاب شده است. برای کاهش تعداد معادلات، ابر ذره-هایی^۵ (np2c) در نظر گرفته شده و با توجه به تعداد ذرات واقعی موجود در سیستم، هر کدام از این ابرذرات شامل تعدادی از ذرات است و معادلات به جای ذرات واقعی سیستم برای این ابرذره‌ها

$$V_{n+1/2}^{x,ref} = -V_{n+1/2}^x \quad (11)$$

در این مدل، زمان و سرعت دقیق ذره هنگامی که به مرز می‌رسد برابر است با:

$$t^0 = t^n + \left| \frac{X^n}{V_x^{n-1/2}} \right| \quad (12)$$

$$V^0 = V^{n-1/2} + \frac{e}{m} \left| \frac{X^n}{V_x^{n-1/2}} \right| E_x^n \quad (13)$$

زمانی که شرایط مرزی متناوب باشد، مدل دوباره وارد کردن ذرات از طرف مخالف به کار گرفته می‌شود، که در آن سرعت و مکان ذره جدید برابر است با:

$$X_{n+1}^{rej} = L - X^{n-1} \quad (14)$$

$$V_{(n+1/2)}^{(x,rej)} = V_{(n+1/2)}^x \quad (15)$$

که L طول محدوده شبیه‌سازی است. در این شبیه‌سازی، جذب و تزریق از دیوارها در نظر گرفته شده ولی در برهم‌کنش پلاσμα با سطح، به خاطر استفاده از لوله مولیبدن، مواردی مانند تولید الکترون‌های ثانویه و ناخالصی‌های پلاσμα به خاطر ناچیز بودن در نظر گرفته نشده است.

برای محاسبه دمای الکترون‌ها، از معادله تعادل انرژی الکترون‌ها (۱۶) استفاده شده است:

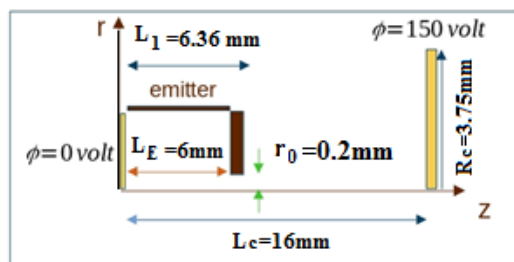
$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \frac{\partial(n_e T_e)}{\partial t} + (\nabla \cdot Q) + (u \cdot \nabla)(n_e T_e) \\ & = -e(\Gamma_e \cdot E) + S_{elastic}^{T_e} + S_{inelastic}^{T_e} \end{aligned} \quad (16)$$

که T_e دمای الکترون و Q شار حرارتی است که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

4 Verboncoeur
5 Number of particles per super-particles

1 Plasma theory and simulation Group
2 University of California, Berkeley
3 Birdsall

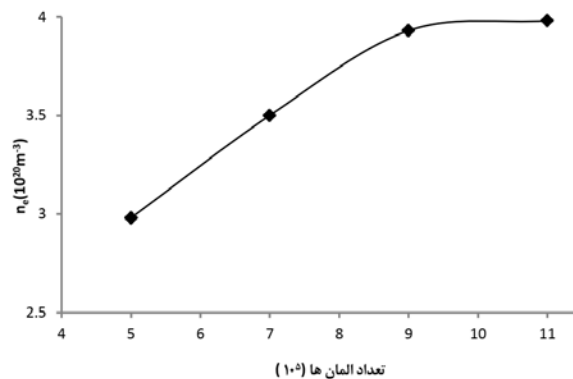
پتانسیل اعمالی به آند هستند. شکل، دارای تقارن محوری است. برای راه‌اندازی کاتد توخالی، ابتدا گرمکن الکتریکی ۲۰ دقیقه روشن می‌شود تا گسیلنده گرم شده و طبق فرایند گسیل ترمیونی شروع به گسیل الکترون کند. در غیاب میدان خارجی، الکترون‌ها در نزدیکی سطح انباشته شده و میدان این بار فضا، از خروج الکترون‌های بیشتر از گسیلنده جلوگیری می‌کند. بار فضایی، به راحتی توسط میدان الکتریکی ضعیفی از بین می‌رود. در همین راستا، پتانسیل ۱۵۰ ولت به آند اعمال می‌شود تا طبق گسیل میدانی^۲، تعداد الکترون‌ها در لوله کاتد افزایش یابد، سپس گرمکن الکتریکی خاموش می‌شود، در داخل لوله مولیدنی کاتد، پلاسما به حالت خودنگهدار^۳ می‌رسد و حالت پایا حاصل می‌شود. مشخصات پلاسما تولیدی در شرایط گذرا بعد از رسیدن سیستم به حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته است. رانشگرهای اثر هال، دارای تقارن محوری هستند. به همین دلیل، معادلات در شرایط تقارن محوری حل شده است.



شکل ۵. شماتیک محیط شبیه‌سازی

هندسه و الزامات رانشگر اثر هال مورد بررسی، مربوط به رانشگر SPT-100 است. گاز پیشران، کریپتون است. چگالی گاز خنثی، یک بار 10^{21} بر متر مکعب و بار دیگر 10^{19} بر متر مکعب در نظر گرفته شده و در حالت پایا گاز کریپتون در لوله کاتد تقریباً به طور کامل یونیزه شده و از دهانه به بیرون و به فضای آزاد که تحت اثر پتانسیل ۱۵۰ ولت است، قرار می‌گیرد. شکل ۶، تغییرات پتانسیل در محور کاتد را نشان می‌دهد. طبق شرایط مرزی در سمت چپ، پتانسیل صفر ولت (کمینه مقدار) و در سمت راست پتانسیل ۱۵۰ ولت (بیشینه مقدار) قرار دارد.

حل شده است. برخورد‌ها با استفاده از الگوریتم مونت-کارلو^۱ مدل شده‌اند. بررسی استقلال از شبکه (انتخاب بهینه‌ترین شبکه ممکن برای دریافت نتایج صحیح)، یکی از بخش‌های بسیار مهم در شبیه‌سازی ذره در جعبه است. در صورتی نتایج شبیه‌سازی قابل اطمینان است که عدم وابستگی حل به شبکه حاصل شده باشد. در این شبیه‌سازی نیز، به این مورد توجه شده است. بیشینه چگالی الکترون‌ها را در محور کاتد و در فشار گاز پیشران 10^{21} بر متر مکعب به عنوان متغیر انتخاب کرده و در دامنه محاسباتی، در هر گام شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در قدم اول، شبیه‌سازی با یک شبکه نسبتاً سبک انجام گرفته و داده‌های این متغیر در طول محور لوله کاتد استخراج و نمودار آن ترسیم شده است. در مرحله بعد، شبکه ریزتر انتخاب شده و همین مراحل تکرار شده است. این کار تا زمانی انجام شده که متغیر مورد مطالعه تغییرات محسوسی نداشته باشد و نتایج حاصل در نمودار شکل ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که در مشاهده می‌شود، با افزایش بیشتر سلول‌ها، به جوابی می‌رسیم که مستقل از تعداد شبکه است.

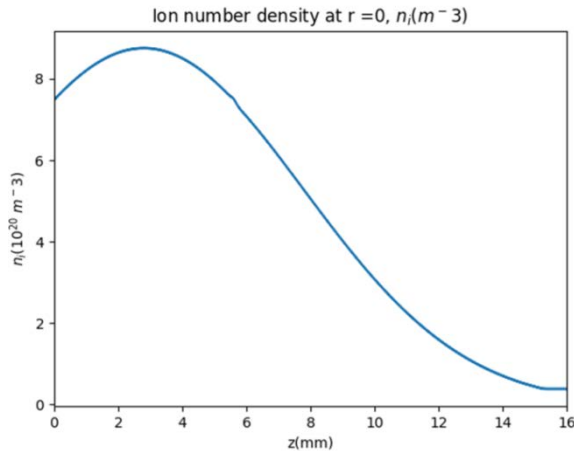


شکل ۴. شماتیک محیط شبیه‌سازی

۵- شبیه‌سازی کاتد توخالی

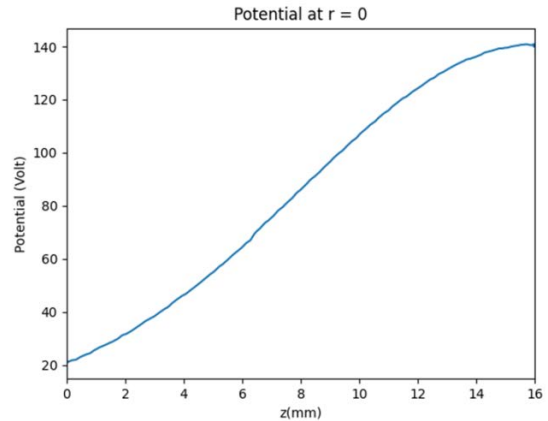
در این بخش، نتایج شبیه‌سازی کاتد ارائه شده است. در شکل ۵، هندسه دوبعدی شبیه‌سازی ترسیم شده که L_C ، L_E ، L_1 ، r_0 ، R_C و ϕ به ترتیب شعاع آند، شعاع اورفیس کاتد، طول گسیلنده + ضخامت اورفیس، طول گسیلنده، فاصله ابتدای گسیلنده تا آند و

پلازما به اندازه‌ای بالاست که محدودیت بار فضایی در انتشار جریان الکترون در کل ناحیه گسیلنده از بین می‌رود. اختلاف فضایی زیادی بین الکترون‌ها و یون‌ها از نظر توزیع فضایی وجود ندارد و پتانسیل غالب، پتانسیل دیواره‌ها است.



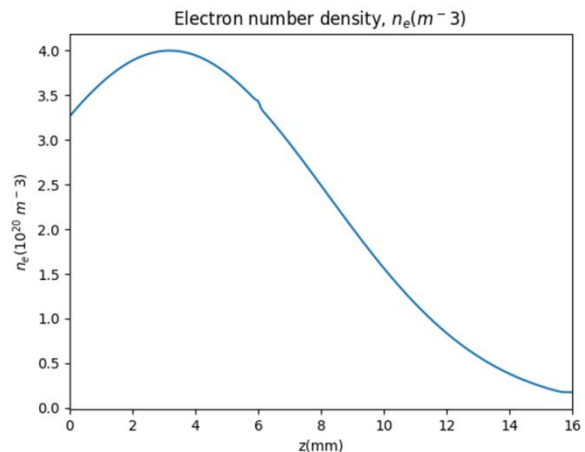
شکل ۸. منحنی چگالی یونی در محور کاتد

در شکل ۹، توزیع فضایی دمای کاتد ترسیم شده است. علاوه بر مرزها و وابستگی ذرات به مرزها و کاهش دمای آن‌ها در نزدیکی مرزهای پتانسیل، وجود دهانه کانال یونش در منحنی دمایی سیستم مورد مطالعه، بسیار مشهود است. دمای سیستم در ناحیه یونش به دلیل گیر افتادن ذرات باردار بین دیواره‌ها، در حدود ۲ الکترون ولت است. با خروج ذرات از این ناحیه و حرکت آزادانه ذرات، دمای سیستم به نزدیکی ۱۰ الکترون ولت افزایش پیدا می‌کند و با نزدیک شدن به پتانسیل انتهایی، این مقدار یک الکترون از میزان ماکزیمم خود کاهش پیدا می‌کند که با نتایج گزارش شده در مقالات کاتد توخالی رانشگر اثر حال SPT-100 در توافق است [۲، ۶، ۱۱-۱۷].



شکل ۶. تغییرات پتانسیل در محور کاتد

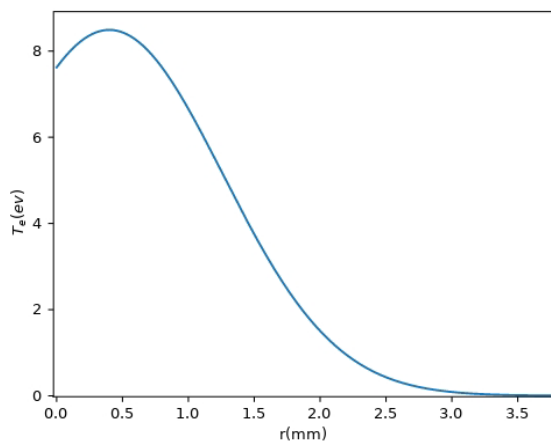
در شکل ۷، منحنی (محوری) چگالی الکترون در محیط کاتد نمایش داده شده است. این منحنی دارای گرادیان قابل توجهی در طول گسیلنده است و در نزدیک روزنه به مقدار بیشینه خودش می‌رسد. در مقالات گزارش شده از کاتد توخالی رانشگر، SPT-100 بیشینه چگالی الکترونی در محدوده چندین 10^{20} بر متر مکعب قرار دارد [۲، ۶، ۱۱-۱۷].



شکل ۷. نمایه دو بعدی چگالی الکترون در محور کاتد

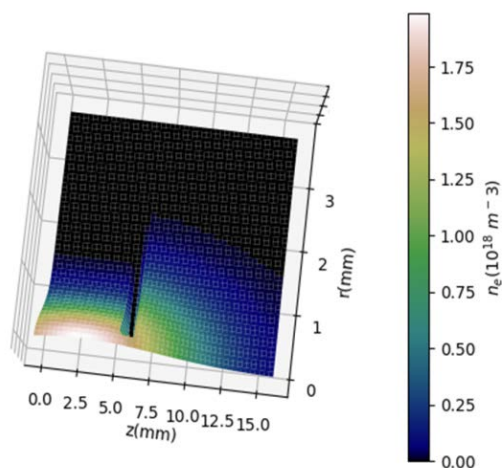
در شکل ۸، منحنی چگالی یون در محور کاتد ترسیم شده است. متناظر با الکترون‌ها، چگالی یونی نیز دارای گرادیان قابل توجهی است. چگالی یون‌ها نیز از مقدار بیشینه در ناحیه یونش کاتد به شکل نمایی در طول محفظه بیرونی کاهش پیدا می‌کند. چگالی

می‌رسد، به عنوان ناحیه موثر کاتد تعریف می‌شود. ناحیه بیشینه دمای الکترونی، در $z=16$ mm قرار دارد. برای تعیین ناحیه موثر در طول r یک برش در $z=16$ mm انجام شده و شکل ۱۱ به دست آمده است. با محاسبه $1/e$ ماکزیمم منحنی حاصله، مکان هندسی ناحیه موثر کاتد توخالی در $r=1.5$ mm استخراج می‌شود.

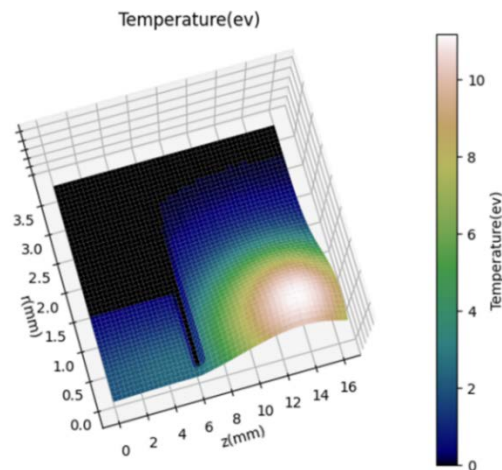


شکل ۱۱. دمای الکترون در عرض محیط ($z = 16$ mm)

در این بخش از پژوهش، با تنظیم فشار گاز ورودی، چگالی گاز خنثی 10^{19} بر متر مکعب در نظر گرفته شده و تاثیر این پارامتر روی تخلیه الکتریکی کاتد بررسی شده است.

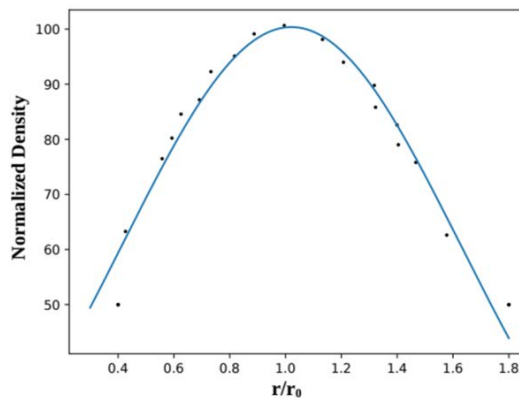


شکل ۱۲. توزیع فضایی چگالی الکترون در کاتد



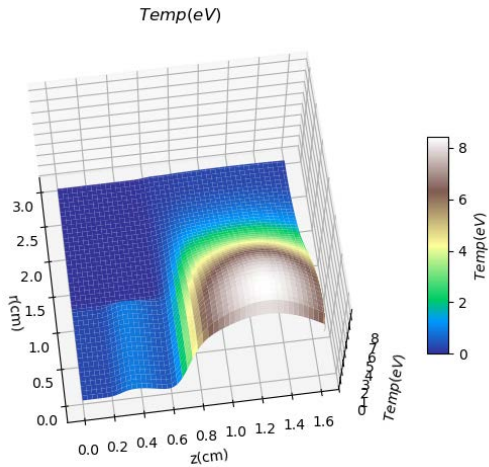
شکل ۹. توزیع فضایی دمای کاتد

در شکل ۱۰، محور عمودی، تغییرات چگالی الکترونی نسبت به چگالی گاز ورودی خنثی، نرمالیزه شده است. این شکل نشان می‌دهد، تقریباً تمام گاز خنثی در محل اورفیس کاتد توخالی یونیزه شده است. r_0 شعاع اورفیس کاتد توخالی است (0.2 mm). بر اساس محاسبات انجام شده، کاهش شعاع نرمالیزه به 0.4 باعث کاهش 50% چگالی متوسط می‌شود. از طرفی، افزایش این مقدار به $1/8$ نیز باعث کاهش چگالی 50% می‌شود.



شکل ۱۰: تغییرات چگالی نرمالیزه شده به تغییر شعاع دهانه کاتد

ناحیه موثر کاتد، بر اساس دمای الکترون خروجی از سیستم تعیین می‌شود. شعاعی که دمای الکترون‌ها به میزان بیشینه خود



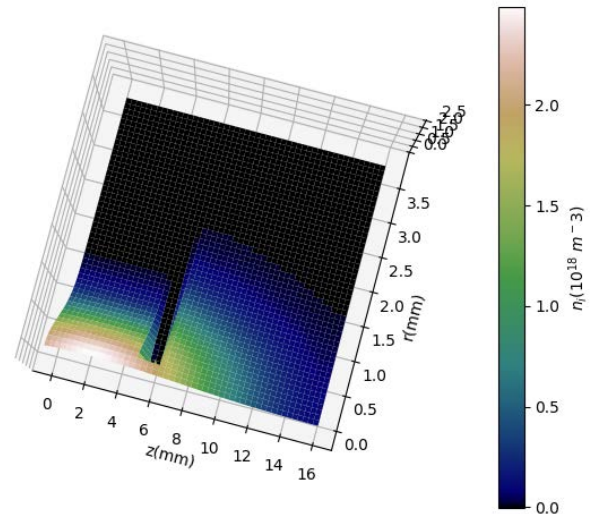
شکل ۱۴. توزیع فضایی دمای الکترون در کاتد

در شکل ۱۴، توزیع فضایی دما در کاتد ترسیم شده است. بیشینه دمای الکترون، $8/5$ الکترون ولت است که نسبت به مورد قبلی، $1/5$ الکترون ولت کاهش پیدا کرده است. شکل منحنی توزیع فضایی، مشابه مورد قبل (چگالی گاز خنثی 10^{21} بر مترمکعب) را دارد و ناحیه موثر یکسانی برای هر دو مورد به دست آمده است ($r=1.5$ mm).

۶- نتیجه گیری

کاتد توخالی، یکی از اجزای اصلی پیشران اثر هال است که دو وظیفه مهم یونیزاسیون سوخت و خنثی کردن باریکه یونی خارج شده از پیشرانه را برعهده دارد. در این پژوهش، کاتد توخالی به روش ذره در سلول شبیه سازی شده است. بررسی رفتار الکترون ها و یون ها نشان می دهد، متناظر با الکترون ها، چگالی یونی نیز از مقدار بیشینه در ناحیه یونش کاتد به شکل نمایی در طول محفظه بیرونی کاهش پیدا می کند. هم چنین، نتایج نشان می دهد، دمای سیستم در ناحیه یونش به دلیل گیر افتادن ذرات باردار بین دیوارها، در محدود 2 الکترون ولت است. با خروج ذرات از این ناحیه و حرکت آزادانه ذرات، دمای سیستم به نزدیکی 10 الکترون ولت افزایش پیدا کرده و با نزدیک شدن به پتانسیل انتهایی، دما از میزان ماکزیمم خود کاهش پیدا می کند و بر اساس شعاعی که دمای الکترون ها به میزان بیشینه خود می رسد، ناحیه موثر کاتد $1/5$ میلی متر به دست می آید. از نتایج این شبیه سازی، در طراحی کاتد توخالی استفاده شد. هم چنین، بیشینه چگالی و دمای

شکل ۱۲، توزیع فضایی چگالی الکترونی کاتد در چگالی گاز خنثی 10^{19} بر مترمکعب را نشان می دهد. این منحنی، شماتیک کلی شکل ۹ را به همراه دارد. مقدار بیشینه و کمینه سیستم در داخل ناحیه یونش به مقداری بیش تر از یک دهم چگالی گاز ورودی رسیده و در ناحیه بیرونی، پخش شدگی ذرات دقیقا مانند شکل ۹ است. هر چقدر چگالی ذرات افزایش می یابد، بیشینه چگالی پلاسما به صفحه اورفیس نزدیک تر می شود.



شکل ۱۳. توزیع فضایی چگالی یون در کاتد

شکل ۱۳ توزیع فضایی چگالی یون در طول کاتد توخالی را نشان می دهند. ذرات در کانال ابتدا بین دو پتانسیل مرزی تولید و از دهانه به بیرون از کاتد تزریق می شوند. منحنی مورد نظر الگوی الکترون ها را حفظ کرده است.

- [10] J. E. Polk, I. G. Mikellides, A. M. Capece, and I. Katz, "Barium depletion in hollow cathode emitters," *Journal of Applied Physics*, vol. 119, no. 2, p. 023303, 2016.
- [11] S. Cao *et al.*, "Numerical simulation of plasma power deposition on hollow cathode walls using particle-in-cell and Monte Carlo collision method," *Physics of Plasmas*, vol. 25, no. 10, p. 103512, 2018.
- [12] M. Shahraki Pour, M. Hosseinpour "Investigation of Formation and Growth Dynamics of Magnetic Islands in Solar Plasma by Particle-in-cell Simulation," *Iranian Journal of Applied Physics* 11.4 , 90-104, 2021.
- [13] D. Tskhakaya, K. Matyash, R. Schneider, and F. Taccogna, "The Particle In Cell Method," *Contributions to Plasma Physics*, vol. 47, no. 8-9, pp. 563-594, 2007.
- [14] H. Usui, J. P. Verboncoeur, and C. K. Birdsall, "Development of 1D object-oriented particle-in-cell code (1d-XOOPIC)," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. 83, no. 6, pp. 989-992, 2000.
- [15] J. Verboncoeur, "OOPIC: object oriented particle-in-cell code," in *International Conference on Plasma Science (papers in summary form only received)*, 1995: IEEE, p. 244.
- [16] D. Y. Oh, D. E. Hastings, C. M. Marrese, J. M. Haas, and A. D. Gallimore, "Modeling of stationary plasma thruster-100 thruster plumes and implications for satellite design," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 15, no. 2, pp. 345-357, 1999.
- [17] N. Gascon, M. Dudeck, and S. Barral, "Wall material effects in stationary plasma thrusters. I. Parametric studies of an SPT-100," *Physics of Plasmas*, vol. 10, no. 10, pp. 4123-4136, 2003.

الکترون به دست آمده، باعث بهینه شدن اندازه اورفیس لوله کاتد، انتخاب ماده گسیلنده با تابع کار پایین شد. حدود ۲۰ درصد از الکترون‌های خروجی از کاتد توخالی، وارد آند می‌شوند و وظیفه یونیزاسیون ماده پیشران داخل آند را برعهده دارند. بقیه الکترون‌ها، وظیفه خنثی‌سازی بار فضایی فضاپیما را دارند. از نتایج این شبیه‌سازی، هم‌چنین در انتخاب مناسب‌ترین موقعیت قرارگیری کاتد استفاده شد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] A. Morozov, "The conceptual development of stationary plasma thrusters," *Plasma Physics Reports*, vol. 29, no. 3, pp. 235-250, 2003.
- [2] H. Liu *et al.*, "2-D modeling of orificed hollow cathodes of stationary plasma thrusters SPT-100," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 12, pp. 4024-4033, 2015.
- [3] J.-P. Boeuf, "Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters," *Journal of Applied Physics*, vol. 121, no. 1, p. 011101, 2017.
- [4] D. M. Goebel, G. Becatti, J. E. Polk, and P. Guerrero, "Life Model for Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High-Power Hall Thrusters," in *35th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2017-276, Atlanta, GA, 2017*.
- [5] D. M. Goebel and E. Chu, "High-current lanthanum hexaboride hollow cathode for high-power Hall thrusters," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 30, no. 1, pp. 35-40, 2014.
- [6] C. E. Garner, J. C. Polk, K. M. Goodfellow, L. C. Pless, and J. R. Brophy, "Performance evaluation and life testing of the SPT-100," 1993.
- [7] G. Sary, L. Garrigues, and J.-P. Boeuf, "Hollow cathode modeling: II. Physical analysis and parametric study," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 26, no. 5, p. 055008, 2017.
- [8] G. Becatti, D. M. Goebel, J. E. Polk, and P. Guerrero, "Life evaluation of a lanthanum hexaboride hollow cathode for high-power Hall thruster," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 34, no. 4, pp. 893-900, 2018.
- [9] W. Hargus and M. Nakles, "Evolution of the Ion Velocity Distribution in the Near Field of the BHT-200-X3 Hall Thruster," in *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006*, p. 4991.



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)