



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)
Vol. 4, No. 2, pp.: 105-113
2025

DOI:
10.22034/jssta.2024.468699.1196

Article Info

Received: 2024-07-20
Accepted: 2025-01-06

Keywords

Hall effect thruster,
Cathode position,
Magnetic field,
Performance parameters

How to Cite this article

Morteza farhid, et al.,”
Investigating the
neutralizer cathode
location in the SPT type
Hall Effect thruster” ,
Journal of Space Science,
Technology and
Applications, vol.4(2),
p.:105-113, 2025.

Investigating the neutralizer cathode location in the SPT type Hall Effect thruster

Morteza farhid¹, Mohammad Mehdi shafie^{2*}, masumeh kiantaj³,
Samira Mir mazhari Anvar ⁴, Leili mahmoudi⁵

¹ Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
m.farhid@isrc.ac.ir

^{2*}Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
m.shafi@isrc.ac.ir

³ Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
m.kiantaj@isrc.ac.ir

⁴ Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
s.mazhari@tabrizu.ac.ir

⁵Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran
l.mahmoudi@isrc.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

The position of the cathode concerning the magnetic field map inside the discharge channel affects the performance and lifetime of the Hall effect thruster. The neutralizer cathode has two important functions in the Hall effect thruster. Almost %18 cathode electrons enter the discharge channel of the Hall thruster and provide the necessary electrons for ionization. The rest of the electrons neutralize the ions coming out from the thruster and the spacecraft remains neutral regarding electric charge. In this article, the map of the magnetic field and separatrix lines inside the thruster are simulated with FEMM software. According to the position of the magnetic field separatrix lines, the neutralizer cathode is placed in three different positions, and the Hall effect thruster performance is simulated using the XOOPIC code and the PIC-MCC method. Shifting the position of the cathode relative to the magnetic field lines and the field separatrix line, significant changes were observed in the parameters of the cathode voltage, the thrust force, and the thruster's specific impact, which improves the thruster's performance. The results of this research show that the performance parameters of the thruster are optimized due to increasing the lifetime of the cathode when the cathode is placed between the first and second separatrix lines.



دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه علوم، فناوری

و کاربردهای

فضایی

سال چهارم، شماره ۲، صفحه ۱۱۳-۱۰۵

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

واژه‌های کلیدی

رانسگر اثر هال، موقعیت کاتد،

میدان مغناطیسی، پارامترهای

عملکردی

نحوه استناد به مقاله

مرتضی فرهید و همکاران،

بررسی محل کاتد خنثی ساز در

رانسگر اثر هال نوع "SPT"،

دوفصلنامه علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی، جلد چهارم،

شماره دوم، صفحات ۱۰۵-۱۱۳،

۱۴۰۳.

بررسی محل کاتد خنثی ساز در رانسگر اثر هال نوع

SPT

مرتضی فرهید^۱، محمدمهدی شفیق^{۲*}، معصومه کیانتاژ^۳، سمیرا میرمظهری انور^۴، لیلی

محمودی^۵

۱- پژوهشکده رانسگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران m.farhid@isrc.ac.ir

۲- پژوهشکده رانسگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران m.shafi@isrc.ac.ir

۳- پژوهشکده رانسگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران m.kiantaj@isrc.ac.ir

۴- پژوهشکده رانسگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران s.mazhari@tabrizu.ac.ir

۵- پژوهشکده رانسگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران l.mahmoudi@isrc.ac.ir

*نویسنده‌ی مسئول

چکیده

موقعیت کاتد نسبت به نقشه میدان مغناطیسی داخل کانال تخلیه بر عملکرد و طول عمر رانسگر اثر هال تاثیر می‌گذارد. کاتد خنثی‌ساز در رانسگر اثر هال دو وظیفه مهم برعهده دارد. حدود ۱۸٪ از الکترون‌های کاتد وارد کانال تخلیه رانسگر اثر هال شده و الکترون‌های لازم برای یونیزاسیون را تامین می‌کنند. بقیه الکترون‌ها، یون‌های خروجی از رانسگر را خنثی کرده و فضاپیما از نظر بار الکتریکی خنثی باقی می‌ماند. در این مقاله با استفاده از نرم افزار FEMM نقشه میدان مغناطیسی و خطوط جداکننده میدان در داخل رانسگر شبیه‌سازی شده سپس با توجه به موقعیت خطوط جداکننده میدان مغناطیسی، کاتد خنثی‌ساز در سه موقعیت متفاوت قرار گرفته و با استفاده از کد XOOPI و روش PIC-MCC عملکرد رانسگر اثر هال شبیه‌سازی شده است. با جابجایی موقعیت کاتد نسبت به خطوط میدان مغناطیسی و خط جدایی میدان، تغییرات قابل توجهی در پارامترهای ولتاژ کاتد، نیروی رانش و ضربه ویژه رانسگر مشاهده شد که باعث بهبود عملکرد رانسگر می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که پارامترهای عملکردی رانسگر با توجه به افزایش طول عمر کاتد زمانی بهینه می‌شود که کاتد بین خطوط جداکننده اول و دوم قرار گیرد.

۱- مقدمه

مغناطیسی بر روی آنها متفاوت است. به دلیل شتاب زیاد الکترون‌ها، برهم‌کنش‌های پلاسما با محیط اطراف تحت سلطه الکترون‌ها است. در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به علت جرم کم الکترون‌ها شتاب حاصل از نیروی لورنتس^۵ بسیار حائز اهمیت است. با این حال، میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی متعامد باعث ایجاد حرکت سوقی^۶ الکترون‌ها و یون‌ها مستقل از جرمشان می‌شود که می‌تواند با پیش‌بینی فوق متناقض باشد، اما با محاسبه شعاع لارمور در میدان مغناطیسی یکنواخت می‌توان شدت میدان مغناطیسی لازم برای به دام انداختن الکترون را به دست آورد. از آنجایی که شعاع لارمور متناسب با جرم ذره است، یون‌ها شعاع لارمور بسیار بزرگتری نسبت به الکترون‌ها دارند. بنابراین، یون‌ها می‌توانند از کانال تخلیه رانشگر اثر هال خارج شوند، الکترون‌ها در میدان مغناطیسی به دام می‌افتند و از طرف دیگر با حرکت لارمور باعث یونیزاسیون بهمنی گاز خنثی ورودی به کانال تخلیه می‌شوند، این یون‌ها باید به وسیله کاتد خنثی شوند. راندمان رانشگر از سه طریق با کاتد خنثی‌ساز مرتبط است. متمرکز کردن پرتوهای یونی برای ایجاد نیروی رانش بالاتر، تولید مقدار مساوی از الکترون نسبت به یون و تنظیم ولتاژ جفت شدگی در کاتد، تمام اجزای الکتریکی رانشگر با توجه به یک ولتاژ مشترک تنظیم می‌شوند. این ولتاژ مشترک، در فضا، ولتاژ بدنه‌ی فضاپیما و در آزمایشگاه تست رانشگرهای الکتریکی، ولتاژ دیواره‌های محفظه خلاء است [۲]. ولتاژ جفت‌شدگی کاتد (V_c) میزان کار مورد نیاز برای حرکت الکترون‌ها از کاتد به آند را ارائه می‌دهد. بنابراین ولتاژ جفت‌شدگی منفی بزرگتر نشان می‌دهد که مقاومت بیشتری بین آند و کاتد وجود دارد [۱]. برای درک اینکه چرا V_c معیار صحیح راندمان جفت‌شدگی است، یونی‌هایی را در نظر بگیرید که به سمت دهانه رانشگر شتاب می‌گیرند. بیشترین افت پتانسیل در داخل رانشگر در مسیر این یون‌ها اتفاق می‌افتد (مقدار کمی افت پتانسیل نیز در طول غلاف دیواره محفظه خلاء در انتهای مسیر یون‌ها وجود دارد). یون‌ها از طریق این افت پتانسیل شتاب گرفته و نیروی رانش را ایجاد می‌کنند. لازم به ذکر است که آند نسبت به کاتد با ولتاژ V_d بایاس می‌شود. ولتاژ کاتد (V_{cg}) یکی از پارامترهای مهم در مسئله جفت‌شدگی کاتد به آند است و برابر با اختلاف پتانسیل بین کاتد و زمین در آزمایشگاه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین این پارامتر اختلاف پتانسیل بین کاتد و دیواره محفظه خلا است

رانشگرهای اثر هال^۱ دسته‌ای از رانشگرهای الکتریکی هستند که از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای تشکیل پلاسما و شتابدهی یون‌ها جهت رسیدن به سرعت بالا به منظور تولید نیروی رانش استفاده می‌کنند. یکی از اجزای اصلی رانشگر اثر هال، کاتد خنثی‌ساز^۲ است. کاتد با فراهم آوردن الکترون‌های آزاد دو کارکرد مهم را انجام می‌دهد. اولین عملکرد آن، خنثی‌سازی الکتریکی باریکه یون خروجی از رانشگر برای متعادل کردن بار الکتریکی فضاپیما یا ماهواره است و کارکرد دوم، تامین الکترون‌های لازم برای آند رانشگر می‌باشد که تخلیه پلاسما را در نزدیکی خروجی کانال حفظ می‌کند. این اهداف با قرار دادن کاتد روی پایه‌ای نزدیک صفحه خروجی رانشگر اثر هال حاصل می‌شود [۱]. رسیدن به هر دو هدف بصورت همزمان به موقعیت و نحوه‌ی قرارگیری کاتد نسبت به آند رانشگر، وابسته است. از طرف دیگر موقعیت کاتد روی عمر رانشگر نیز تأثیر می‌گذارد. معمولاً فاصله بین کاتد و کانال تخلیه رانشگر زیاد نیست تا شروع و حفظ تخلیه رانشگر به راحتی انجام گیرد. در طی عملکرد رانشگر، کاتد در معرض برخورد و فرسایش مدام با یون‌های پراورژی در ناحیه‌ی ستون خروجی^۳ رانشگر قرار گرفته و عمر مفید رانشگر کاهش می‌یابد. کاتد معمولاً در خارج از رانشگر و بصورت شعاعی یا محوری قرار می‌گیرد [۲]. بطور کلی برای برقراری تمام ملاحظات، کاتد با پلاسمای تخلیه برهمکنش انجام می‌دهد. این برهمکنش بر اساس پدیده‌ای به نام جفت‌شدگی کاتد^۴ بررسی می‌شود. از آنجایی که الکترون‌ها در رانشگر اثر هال بخاطر انرژی کم توسط میدان مغناطیسی محبوس می‌شوند، در مراحل اولیه، یونیزاسیون فقط در ستون خروجی رانشگر اتفاق می‌افتد. با گذشت زمان الکترون‌های بیشتری انرژی کافی بدست آورده و گاز پیشران یونیزه می‌شود. منطقه اصلی یونیزاسیون به سمت دهانه‌ی رانشگر انتقال می‌یابد. بدلیل نحوه‌ی توزیع پتانسیل در کانال، منطقه یونیزاسیون بعدی، نزدیک آند، جایی که یونیزاسیون شدیدی اتفاق می‌افتد، است. در این حالت الکترون‌های کافی وجود دارد و خنثی‌سازی کم است. در نهایت، هنگامی که این انتقال به پایان می‌رسد، رانشگر در یک شرایط پایدار کار می‌کند [۳]. از آنجایی که جرم الکترون در مقایسه با جرم یون بسیار کوچکتر است، تأثیر میدان‌های الکتریکی و

¹ Hall effect thrusters

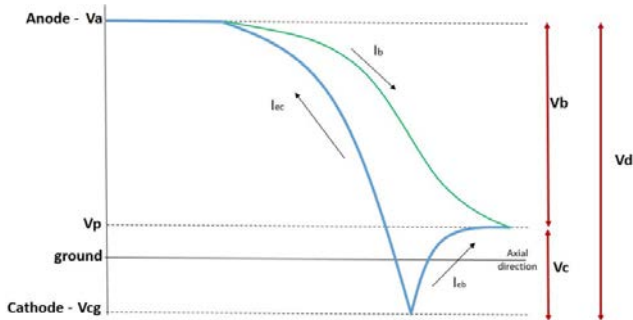
² Neutralizer cathode

³ Plume

⁴ Cathode coupling

⁵ Lorentz Force

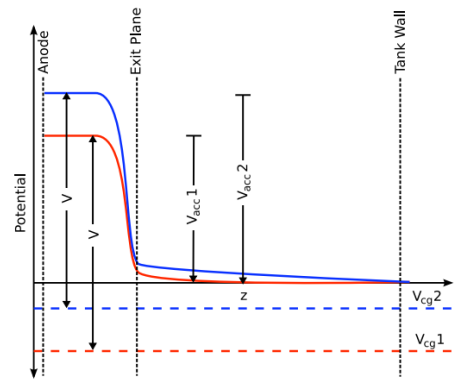
⁶ Drift



شکل (۲): شماتیک ولتاژ رانشگر اثر هال

موقعیت کاتد خنثی‌ساز به دو روش در منابع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است: در روش اول به صورت تجربی از طریق قرار دادن پروب‌ها و اندازه‌گیری مشخصات رانشگر و در روش دوم از طریق شبیه‌سازی و توپولوژی میدان مغناطیسی رانشگر [۵]. از اندازه‌گیری‌هایی که به وسیله پروب انجام شده است، اینگونه برداشت می‌شود که موقعیت قرارگیری و تعداد کاتد در مجموعه‌ای از رانشگرهای اثر هال بر راندمان کل رانشگر تأثیر می‌گذارد [۶]. سومرویل و همکاران [۱] به افزایش ولتاژ جفت‌شدگی کاتد با نزدیک شدن به صفحه خروجی رانشگر اشاره می‌کنند. از روی شبیه‌سازی توپولوژی میدان مغناطیسی رانشگر اثر هال و تأثیر موقعیت قرارگیری کاتد خنثی‌ساز در داخل یا خارج جداکننده^۷ میدان مغناطیسی، مشخصات رانشگر مورد بررسی قرار گرفته است. جداکننده، خط یا سطحی است که از نقاط تهی^۸ مغناطیسی عبور کرده و میدان مغناطیسی را به مناطق مستقل خطوط شار مشابه تقسیم می‌کند [۷]. در مطالعه بچتل^۹ [۸] جریان نگهدارنده، دبی جرمی جریان پیشران و ولتاژ جفت‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده می‌شود که جریان نگهدارنده بالاتر در کاتد توخالی ولتاژ کولپینگ را به طور قابل توجهی افزایش نمی‌دهد. با افزایش جریان، دبی جرمی پیشران کاتد کاهش می‌یابد و منجر به خود گرمایشی^{۱۰} گسیلنده می‌شود. نیشیاما^{۱۱} و همکاران [۹] نشان دادند که موقعیت بهینه خنثی‌ساز، ولتاژ جفت‌شدگی و دبی جرمی جریان پیشران را کاهش می‌دهد. هوفر و گالیمور [۱۰] و جیمسون و همکاران [۱۱] با قرار دادن کاتد در مرکز رانشگر اثر هال به‌گونه‌ای که محور کاتد با محور رانشگر منطبق باشد، به‌جای قرار دادن آن در

و مقدار منفی دارد. آند معمولاً مرجعی برای کاتد محسوب شده و پتانسیل آند نسبت به کاتد با V نشان داده می‌شود. با توجه به شکل ۱ ماکزیمم پتانسیلی که یون‌های باریکه در آزمایشگاه می‌توانند بدست آورند برابر با $V = V_{acc} + V_{cg}$ و ماکزیمم انرژی که باریکه یون کسب می‌کند برابر با qeV_{acc} است. در شکل ۱ دو ولتاژ کاتد پایین (V_{cg1}) و ولتاژ کاتد بالا (V_{cg2}) با هم مقایسه شده است. در هر دو ولتاژ آند نسبت به کاتد (V) مقداری ثابت است. بنابراین در حالت دوم انرژی بیشتری از الکترون‌ها به یون‌ها انتقال می‌یابد، بنابراین انرژی یون‌ها در حالت دوم بیشتر است. با یکسان در نظر گرفتن عوامل موثر دیگر در هر دو مورد، بازده حالت دوم بیشتر از حالت اول خواهد بود [۳].



شکل (۱): اثر ولتاژ جفت‌شدگی کاتد روی شتاب دهی یون [۱].

ولتاژ جفت‌شدگی اندازه‌گیری میزان آسانی انتقال الکترون‌ها از کاتد به آند را مشخص می‌کند. در ولتاژهای بالاتر (از نظر مقدار کمتر) مقاومت کمتری بین کاتد و آند وجود دارد، بنابراین شتاب یون‌ها بیشتر خواهد بود. شماتیک پتانسیل رانشگر اثر هال در نقاط مختلف، در شکل ۲ رسم شده است. V_d اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد است. در این شکل V_{cg} ولتاژ کاتد، V_a ولتاژ آند، V_p پتانسیل پلاسما در دهانه خروجی رانشگر، V_b ولتاژ یون‌های شتاب‌دار خروجی از رانشگر، V_c ولتاژ جفت‌شدگی کاتد است. مطابق شکل ۲، $V_d = V_b + V_c$ است [۴].

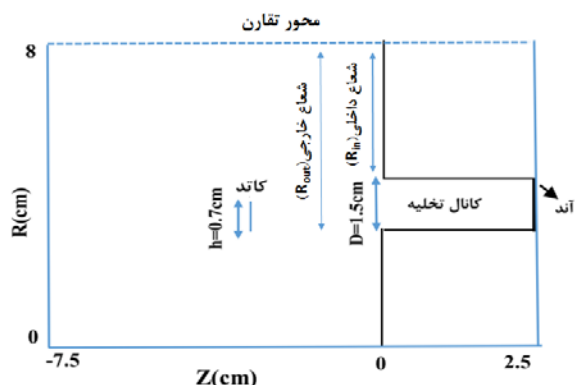
⁷ Separatrix

⁸ Null point

⁹ Bechtel

¹⁰ Self-heating

¹¹ Nishiyama



شکل ۴: هندسه شبیه‌سازی در نرم افزار XOOPIC

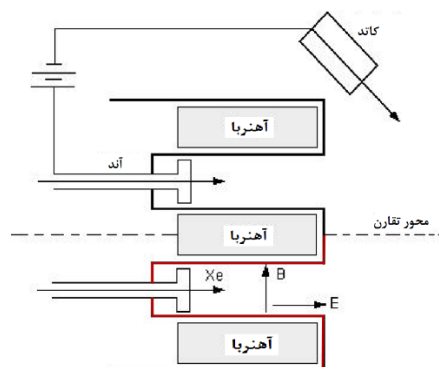
جدول (۱): پارامترهای رانشگر اثر هال SPT-100 [۱۳] و مشخصه های شبیه‌سازی

مقدار	نماد	کمیت
۳/۵	R_{in}	شعاع داخلی (سانتی‌متر)
۵/۰	R_{out}	شعاع خارجی (سانتی‌متر)
۲/۵	Z_{ch}	طول کانال تخلیه (سانتی‌متر)
۱۰	Z_d	طول شبیه‌سازی در راستای Z (سانتی‌متر)
۸	r_d	طول شبیه‌سازی در راستا شعاع (سانتی‌متر)
زنون	-	گاز پیشران
۵.۰/۴۲	mg/s	دبی جرمی کاتد، آند به ترتیب
3×10^{17}	n_e	چگالی پلاسما ($1/m^3$)
1×10^{20}	$N_{g,0}$	چگالی گاز خنثی ($1/m^3$)
۷۰۰	$T_{g,0}$	دمای گاز خنثی (کلوین)
۳۰۰	V_d	ولتاژ تخلیه (ولت)
۳/۵	I_d	جریان تخلیه (آمپر)
۲۰۰	$B_{r,0}$	میدان مغناطیسی ماکزیمم (گوس)
۵۰۰۰	n_z	تعداد گره‌ها در راستای محور Z
۲۰۰۰	n_r	تعداد گره‌ها در راستای شعاع
(-۱/۸۰، -۲۰)		موقعیت محوری و شعاعی کاتد (Z, r) با توجه به هندسه میدان مغناطیسی شکل ۷ و نقاط متناظر آن در شکل ۳.
(-۳/۶، -۱۴)	(cm)	
(-۶/۳، -۸)		
۹۰	deg	جهت‌گیری کاتد نسبت به محور Z [۱۲]

خارج از بدنه رانشگر، متوجه بهبود عملکرد قابل توجه رانشگر شده‌اند. در این مقاله ابتدا برای بررسی تاثیر موقعیت کاتد در عملکرد رانشگر اثر هال توپولوژی میدان مغناطیسی رانشگر اثر هال در نرم افزار FEMM بدست آمده سپس با توجه به نقشه میدان مغناطیسی سه موقعیت مختلف برای کاتد لحاظ شده است. کاتد با قرار گرفتن در این موقعیت‌ها توسط کد XOOPIC شبیه‌سازی شده و پارامترهای عملکردی رانشگر در این سه موقعیت مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که در هنگام تست رانشگر اثر هال قرار گرفتن کاتد در ناحیه‌ای با خطوط میدان مغناطیسی مناسب آند از اهمیت بسزایی برخوردار است، هدف از این مطالعه مقایسه عملکرد رانشگر در سه موقعیت مختلف کاتد با توجه به شکل خطوط میدان مغناطیسی است. نوآوری این مقاله در شبیه‌سازی موقعیت کاتد با روش PIC و مطابقت نتایج حاصل با داده‌های تجربی مرجع [۱۲] است.

۱- توصیف مدل

در رانشگر اثر هال، اندازه ابعاد ظرف پلاسما کوچک‌تر از مسیر آزاد میانگین^{۱۲} است، بنابراین پلاسما در تعادل حرارتی نیست و باید توسط معادله جنبشی توصیف شود. یکی از راه‌های حل معادله جنبشی استفاده از شبیه‌سازی ذره در جعبه^{۱۳} است. با توجه به وجود تقارن در هندسه ارائه شده محدوده دو بعدی شبیه‌سازی طبق شکل ۳ و ۴ انتخاب شده است.

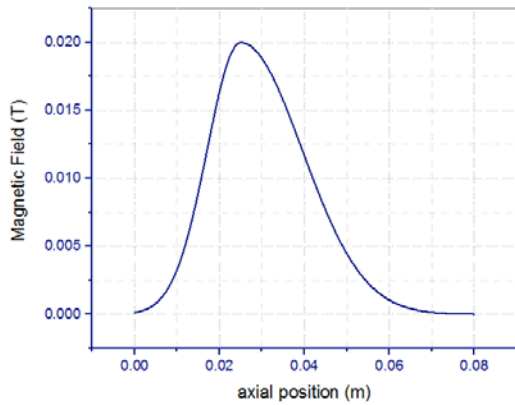


شکل ۳: سطح مقطع رانشگر اثر هال (رنگ قرمز هندسه شبیه‌سازی)

برای شبیه‌سازی از سیستم مرجع استوانه‌ای استفاده شده و پارامترهای رانشگر اثر هال SPT-100 [۱۳] و مشخصه‌های شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است.

¹² Mean free path

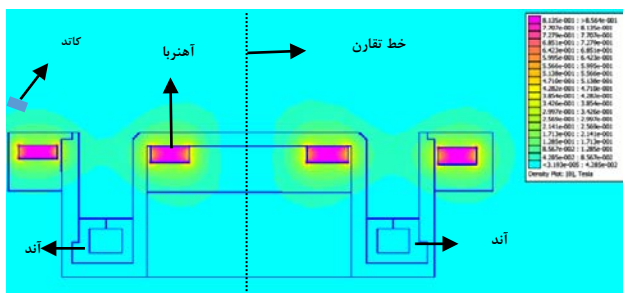
¹³ Partical in cell



شکل (۵): پروفایل میدان مغناطیسی

۳- تحلیل توپولوژی میدان

در پژوهش حاضر بررسی تاثیر موقعیت کاتد در عملکرد رانشگر با استفاده از نواحی جداکننده‌ی مغناطیسی انجام می‌شود. پارامترهای جفت‌شدگی کاتد در مناطق با توپولوژی میدان مغناطیسی مختلف تغییر می‌کند، هر منبع دوقطبی، یک سطح جدایی در امتداد محور خود نشان می‌دهند. بنابراین، رانشگرها به تناسب شباهت توپولوژیکی خود به چند قطبی مرتبه بالاتر، خطوط جدایی مشخصی را نشان می‌دهند. میدان مغناطیسی به وسیله نرم افزار المان محدود FEMM شبیه‌سازی شده است. این نرم‌افزار برای تحلیل مسائل الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی دوبعدی با مقطع مسطح و یا با تقارن محوری طراحی شده است. تحلیل و بررسی شکل و مقادیر خطوط میدان مغناطیسی SPT-100 در این نرم‌افزار در شکل ۶ آورده داده شده است.



شکل (۶): مقطعی از رانشگر اثر هال و مقادیر میدان مغناطیسی در نرم افزار FEMM

در شکل ۷ هندسه‌ی خطوط میدان مغناطیسی و خطوط جداکننده میدان حاصل از این نرم افزار نشان داده شده است. این سطح جداکننده تاثیر به سزایی در نحوه شتاب‌گیری

تابع توزیع الکترون‌های کاتد، به صورت ماکسول بولتزن با دمای اولیه $T_{e,0}$ است [۱۴]. برخورد الکترون و اتم خنثی به صورت یونیزاسیون، پراکندگی کشسان و تغییر بار، برخورد یون و اتم خنثی به صورت تغییر بار، همچنین برخورد الکترون و یون به صورت باز ترکیب توسط مدل مونت کارلوی برخوردی در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده و در شبیه‌سازی برخورد بین ذرات و دیوار محاسبه نشده است و همچنین ذراتی که از محدوده تعریف شده بیرون می‌روند از شبیه‌سازی حذف می‌شوند.

۲- میدان مغناطیسی

حضور میدان مغناطیسی شعاعی برای به دام افتادن الکترون‌ها و کاهش تحرک‌پذیری آنها ضروری است. تغییرات مولفه شعاعی میدان مغناطیسی در راستای محور کانال تخلیه که در شبیه‌سازی لحاظ شده، مطابق معادلات ۱ و شکل ۵ می‌باشد که در آن B_0 ماکزیمم میدان مغناطیسی است که توسط آهنرباها

اعمال می‌شود $\alpha_1=5$ ، $\alpha_2=1.5$ و $\bar{z} = \frac{z}{z_{ch}}$ است [۱۵].

$$B_r = \begin{cases} B_{r,0} \exp(-\alpha_1(\bar{z}-1)^2), \bar{z} \leq 1 \\ B_{r,0} \exp(-\alpha_2(\bar{z}-1)^2), \bar{z} \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

برای این میدان مغناطیسی فرکانس سیکلوترونی الکترون رانشگر از مرتبه $\omega_{ce} = eB/m \approx 2-3 \times 10^9 \text{ rad/s}$ می‌باشد که انرژی متناظر الکترون‌ها برابر 20 eV و شعاع لارمور $\rho_{e,L} = v_e / \Omega_{ce} \approx 1 \text{ mm}$ است. بنابراین شعاع لارمور الکترون بسیار کوچکتر از ابعاد کانال تخلیه رانشگر اثر هال است. در نتیجه الکترون‌ها به شدت تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند و اطراف خطوط میدان مغناطیسی شروع به چرخش می‌کنند. بیشینه میدان مغناطیسی در ناحیه خروجی رانشگر در بازه $B_{r,max} = 15-20 \text{ mT} (150-200 \text{ G})$ می‌باشد که توسط آهنرباهای دائمی ایجاد می‌شود. میدان مغناطیسی در راستای شعاع رانشگر وارد می‌شود اما مقدار آن به موقعیت محوری رانشگر (Z) بستگی دارد. در حقیقت وابستگی آن به Γ ناچیز است بنابراین از آن صرف نظر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن این تقریب قابل اتکا هستند که وابستگی به شعاع ناچیز است. مقدار ماکزیمم میدان مغناطیسی کاربردی برای گاز زنون 200 گاوس گزارش شده است [۱۵].

یکی از مهمترین این روش‌ها، متد ذره در سلول (PIC¹⁴) است. از کد XOOPIC¹⁵ که توسط گروه نظری در دانشگاه برکلی توسعه داده شده مورد استفاده قرار گرفته است. این کد توسط گروه تئوری و شبیه‌سازی پلاسما (PTSG¹⁶) آن دانشگاه تهیه شده [۱۶] و با استفاده از زبان برنامه نویسی شیء‌گرایی C++ نوشته شده و تحت سیستم عامل لینوکس قابل اجرا است. تعداد گره‌های محاسباتی بهینه در راستای افقی ۱۰۰۰ و در راستای شعاعی ۹۰۰ انتخاب شده است. گام زمانی در شبیه‌سازی ۱۰^{-۱۲} ثانیه است. اطلاعات در مورد جزئیات شبیه‌سازی، روابط استفاده شده در کد برای محاسبه مکان، سرعت، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، چگالی ذرات در هر سلول و شرایط مرزی استفاده شده در مرجع [۱۷] آورده شده است. شبیه‌سازی با کارکرد پیوسته کامپیوتر به مدت ۳ ماه طول کشیده و تا ۱۰^{-۶} ثانیه، تا کامل شدن یونیزاسیون در دهانه خروجی رانشگر پیش رفته است. برای محاسبه نیروی رانش از معادله ۲ استفاده شده است [۱۸]. در این رابطه چگالی و سرعت محوری یون‌ها جزء خروجی‌های کد است. با استفاده از نرم‌افزار متلب نیروی رانش محاسبه شده و برای محاسبه ضربه ویژه رانشگر از رابطه ۳ استفاده گردیده و نتایج در جدول ۲ گزارش شده است.

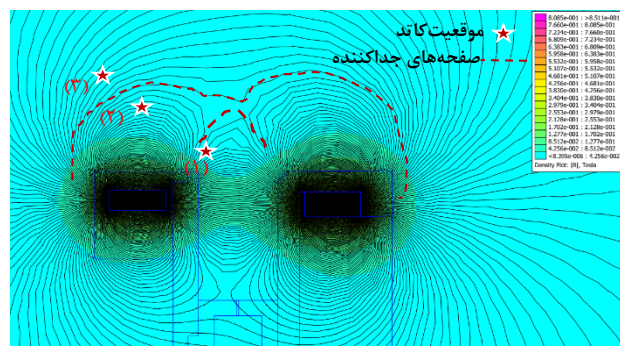
$$T = \sum_{i=1}^{N_m} m_i \cdot N_i^{\det} \cdot (V a_i^{\det})^2 \cdot A_i \quad (2)$$

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{m} g} \quad (3)$$

که m جرم یون (زنون)، N_i^{\det} چگالی یون‌ها در داخل سلول مشخص، $V a_i^{\det}$ سرعت محوری یون‌ها در داخل سلول مشخص، A_i سطح مقطع سلول $A_i = \pi[(r_i + dr)^2 - r_i^2]$ ، N_m تعداد سلول در جهت شعاع، \dot{m} دبی جرمی و g شتاب گرانش زمین است.

جدول ۲: نیروی رانش و ضربه ویژه رانشگر در موقعیت‌های مختلف کاتد

الکترون‌های کاتد به سمت آند دارد و جایگاه کاتد خنثی‌ساز از توپولوژی میدان مغناطیسی حاصل می‌شود. الکترونهایی که در داخل خط جداکننده قرار می‌گیرند انرژی کمتری نیاز دارند تا به کانال تخلیه رانشگر وارد شوند. الکترون‌هایی که خارج از خط جداکننده قرار می‌گیرند انرژی زیادی لازم دارند تا به داخل کانال تخلیه هدایت شوند. شکل ۶ یک رانشگر اثر هال متقارن محوری را نشان می‌دهد که به عنوان یک چهار قطبی مغناطیسی عمل می‌کند. رانشگرهای اثر هال که از نظر توپولوژیکی مشابه هستند دارای خطوط جداسازی مشابه می‌باشند. با توجه به وجود تقارن محوری نیمه شکل انتخاب شده و موقعیت کاتد با تمرکز در این ناحیه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای رانشگر نوعی SPT-100، خط جداکننده، میدان مغناطیسی را به سه ناحیه با شکل خطوط میدان مغناطیسی متفاوت مطابق شکل ۷ تقسیم می‌کند. مطابق این شکل با توجه به موقعیت خطوط جداکننده بدست آمده در نرم افزار FEEM، موقعیت کاتد خنثی‌ساز در سه موقعیت ذیل ۱- کاتد در داخل سطح جداکننده اول، موقعیت (۱)، ۲- کاتد در داخل سطح جداکننده دوم، موقعیت (۲)، ۳- کاتد در خارج از سطح جداکننده دوم، موقعیت (۳) مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۷): توپوگرافی خطوط میدان مغناطیسی رانشگر اثر هال و سطوح جداکننده و موقعیت‌های کاتد

۴- مشخصه‌های شبیه‌سازی

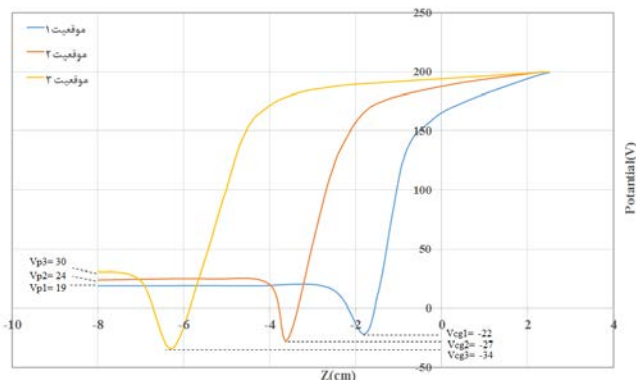
برای شبیه‌سازی عملکرد رانشگر اثر هال از مدل PIC-MCC استفاده شده است. بررسی پدیده‌های غیرخطی و غیرایستا در فیزیک پلاسما به روش‌های شبیه‌سازی کاملاً سینتیک نیاز دارد.

¹⁴ particle in cell

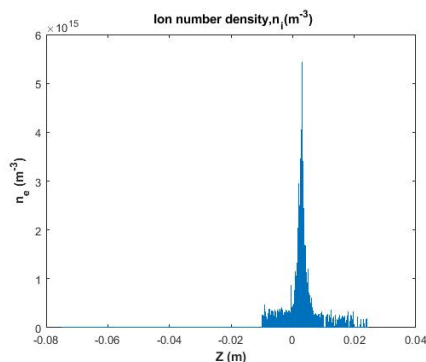
¹⁵ Object Oriented Particle in Cell run under Xgrafix

¹⁶ <http://ptsg.egr.msu.edu/>

حالت سوم کاتد خارج از خط جداکننده دوم قرار گرفته و ولتاژ کاتد و تعداد یون‌های خروجی از رانشگر بسیار کاهش می‌یابد. بخاطر شکل خطوط میدان مغناطیسی در ناحیه سوم، الکترون‌ها به انرژی بالایی نیاز دارند تا وارد کانال تخلیه رانشگر شوند. شکل‌های ۱۴-۱۲ نمودار فضای فاز دوبعدی یون‌های خروجی از رانشگر (سرعت محوری یون‌ها در راستای محور رانشگر) را نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها توده خروجی رانشگر در حالت اول و دوم تقارن بهتری نسبت به حالت سوم دارند. در حالت اول با اینکه یونیزاسیون بهتر از حالت دوم است ولی پارامترهای عملکردی رانشگر در حالت دوم نیز با توجه به جدول ۳ در بازه مناسبی برای انواع ماموریت‌های فضایی با رانشگر اثر هال [۱۹] قرار دارد. بنابراین با توجه به نقشه میدان مغناطیسی در خارج از رانشگر بهترین موقعیت برای کاتد خنثی‌ساز قرارگیری در بین سطوح جداکننده اول و دوم یا به عبارت دیگر موقعیت دوم مناسب‌ترین موقعیت قرارگیری برای کاتد خنثی‌ساز است. در مرجع [۱۲] خطوط میدان مغناطیسی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده در این پژوهش توافق خوبی با این مرجع دارد.



شکل (۸): پتانسیل الکتریکی رانشگر اثر هال در سه موقعیت کاتد

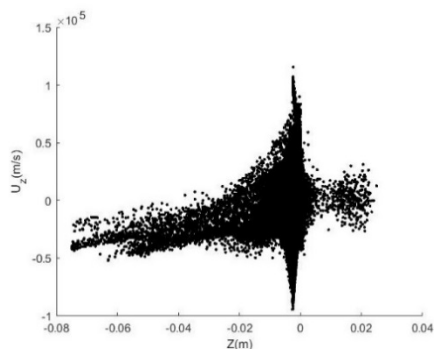


شکل (۹): چگالی یون‌های خروجی از رانشگر در حالت اول

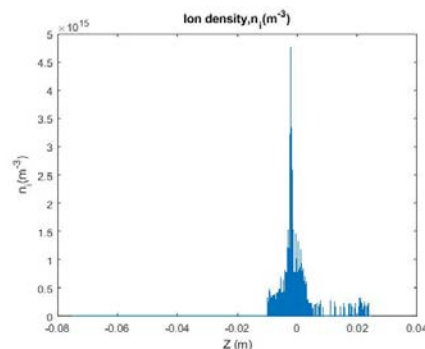
موقعیت	ولتاژ کاتد (V)	تراست محاسبه شده (mN)	ضربه ویژه محاسبه شده
۱	-۲۲	۹۲	I_{sp} (S)
۲	-۲۷	۷۱/۵	
۳	-۳۴	۴۸	

۵- نتایج شبیه‌سازی

این مطالعه، روی تأثیر میدان مغناطیسی بر موقعیت کاتد و بررسی پارامترهای عملکردی رانشگر متمرکز شده است. در شکل ۸ برای برآورد ولتاژ یون‌های خروجی بعد از دهانه، بنا به دلایل زیر از نتایج مرجع [۴] استفاده شده است: اول آنکه به علت طولانی شدن زمان شبیه‌سازی در صورت وارد نکردن ولتاژ توده خروجی رانشگر بعد از دهانه، ولتاژ پلاسما (V_p) مقدار منفی بدست می‌آید، در نتیجه امکان برآورد ولتاژ جفت‌شدگی رانشگر به وسیله شبیه‌سازی وجود نداشت ($V_c = V_{cg} + V_p$). دوم آنکه با توجه به اینکه در این مقاله هدف محاسبه دقیق ولتاژ جفت‌شدگی نیست و هدف مقایسه عملکرد رانشگر در سه موقعیت مختلف کاتد با توجه به شکل خطوط میدان مغناطیسی است و به دنبال ارزیابی کمی آن نیستیم. در شکل ۸ پتانسیل الکتریکی در موقعیت‌های مختلف کاتد نشان داده شده است. در موقعیت ۱ کاتد در داخل خط جداکننده ۱ (مطابق شکل ۷) قرار گرفته است. ولتاژ کاتد در حالت اول دارای مقدار بالایی است (-۲۲۷) در نتیجه با توجه به رابطه ($V_d = V_b + V_c$) ولتاژ شتاب ذرات در موقعیت ۱ بیشتر از موقعیت ۲ و در موقعیت ۲ بیشتر از موقعیت ۳ است. برای مقایسه بهتر، ولتاژ کاتد در این سه موقعیت در جدول ۳ آورده شده است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ چگالی یون‌های خروجی از رانشگر را در سه موقعیت کاتد نشان می‌دهد. یونیزاسیون در شکل ۹ و ۱۰ حدود ده برابر بیشتر از حالت سوم است. از طرفی با قرار دادن کاتد در داخل جداکننده (۱) و نزدیک دهانه رانشگر (موقعیت ۱)، کاتد نزدیک به باریکه یونی قرار گرفته و طول عمر کاتد بسیار کاهش می‌یابد در نتیجه، حالت اول موقعیت مناسبی برای کاتد خنثی‌ساز نیست. در حالت دوم کاتد در داخل جداکننده دوم و دورتر از پرتو یونی خروجی از رانشگر قرار گرفته است. در این حالت، ولتاژ جفت‌شدگی و تعداد یون‌های خروجی از رانشگر کاهش (نسبت به حالت اول) می‌یابد ولی طول عمر رانشگر بسیار بیشتر از حالت اول است. در



شکل (۱۴): نمودار فضای فاز دوبعدی یون‌های خروجی از رانشگر (سرعت محوری) در حالت سوم



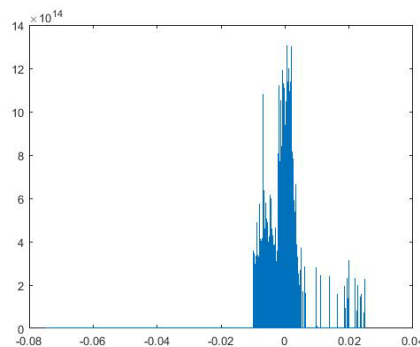
شکل (۱۰): چگالی یون‌های خروجی از رانشگر در حالت دوم

۶- نتیجه‌گیری

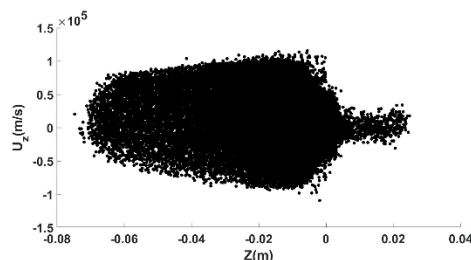
در مطالعه حاضر، جانمایی بهینه رانشگر اثر هال با توجه به نقشه میدان مغناطیسی در خارج از رانشگر مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. الکترون‌ها برای ورود به ناحیه تخلیه باید از خطوط میدان مغناطیسی عبور کنند و تحرک الکترون‌ها به طور کلی با شدت میدان مغناطیسی نسبت معکوس دارد. داده‌های شبیه‌سازی به وضوح نشان می‌دهد که ولتاژ کاتد و عملکرد رانشگر تحت تأثیر موقعیت کاتد و شدت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند. در حالت اول کاتد در داخل خط جداکننده اول و در ناحیه‌ای قرار گرفته است که الکترون‌ها راحت‌تر به سمت آند هدایت می‌شوند. در این حالت با اینکه پارامترهای عملکردی رانشگر افزایش می‌یابد ولی کاتد چون در معرض مستقیم یون‌های پرنرژی است طول عمر کاتد به طور قابل توجهی کاهش داده می‌شود، در نتیجه موقعیت مناسبی برای کاتد نیست. در حالت دوم مقدار ولتاژ کاتد و چگالی یون‌های خروجی از رانشگر کمتر از حالت اول است ولی طول عمر کاتد بیشتر از حالت اول است. این حالت بهترین موقعیت برای کاتد محسوب می‌شود. در حالت سوم که کاتد در خارج از خط جداکننده مغناطیسی قرار گرفته است پارامترهای عملکردی به شدت کاهش می‌یابد.

تعارض منافع

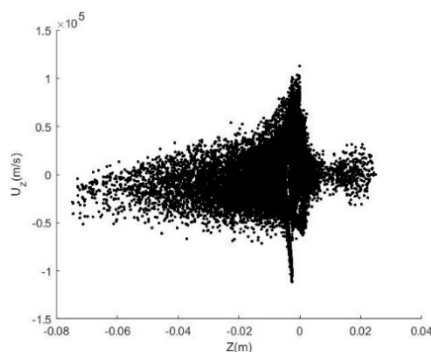
“هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.”



شکل (۱۱): چگالی یون‌های خروجی از رانشگر در حالت سوم



شکل (۱۲): نمودار فضای فاز دوبعدی یون‌های خروجی از رانشگر (سرعت محوری) در حالت اول



شکل (۱۳): نمودار فضای فاز دوبعدی یون‌های خروجی از رانشگر (سرعت محوری) در حالت دوم

- [12] J. D. Sommerville and L. B. King, "Hall-effect thruster--cathode coupling, part I: efficiency improvements from an extended outer pole," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 27, no. 4, pp. 744-753, 2011.
- [13] D. Yongjie, Y. Daren, and W. Zhiwen, "Parameters distribution along the channel axis in the scaling designed stationary plasma thruster," *Plasma Science and Technology*, vol. 8, no. 6, p. 716, 2006.
- [14] F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, and R. Schneider, "Plasma flow in a Hall thruster," *Physics of plasmas*, vol. 12, no. 4, 2005.
- [15] T. Lafleur and P. Chabert, "The role of instability-enhanced friction on 'anomalous' electron and ion transport in Hall-effect thrusters," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 27, no. 1, p. 015003, 2017.
- [16] 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.
- [17] M. Kiantaj, M. Farhid, M. M. Shafie, and M. R. Morad, "Simulation of Hollow Cathode in the Hall Thruster by Particle in Cell (PIC) Method," 2023.
- [18] I. Musso *et al.*, "2D OOPIC simulations of the helicon double layer," in *30th International Electric Propulsion Meeting, Florence, Italy-September, 2007*, pp. 17-20.
- [19] K. Kozubskii *et al.*, "Stationary plasma thrusters operate in space," *Plasma Physics Reports*, vol. 29, pp. 251-266, 2003.
- [1] J. D. Sommerville, *Hall-effect thruster-cathode coupling: the effect of cathode position and magnetic field topology*. Michigan Technological University, 2009.
- [2] N. Turan, O. Korkmaz, and M. Celik, "Investigation of the effect of hollow cathode neutralizer location on hall effect thruster efficiency," in *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 2015, pp. 599-604: IEEE.
- [3] L. Wei *et al.*, "Simulation of plasma dynamics during discharge ignition in Hall thruster," *The European Physical Journal D*, vol. 73, pp. 1-8, 2019.
- [4] N. Turan, U. Kokal, M. Celik, and H. Kurt, "Experimental study of the effects of the cathode position and the electrical circuit configuration on the operation of HK40 Hall thruster and BUSTLab hollow cathode," in *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016, p. 4834.
- [5] R. R. Hofer, L. K. Johnson, D. M. Goebel, and R. E. Wirz, "Effects of internally mounted cathodes on Hall thruster plume properties," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 36, no. 5, pp. 2004-2014, 2008.
- [6] D. Tilley, K. de Grys, and R. Myers, "Hall thruster-cathode coupling," in *35th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1999, p. 2865.
- [7] G. Lehner, *Electromagnetic field theory for engineers and physicists*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [8] R. BECHTEL, "A hollow cathode neutralizer for a 30-cm diameter bombardment thruster," in *10th Electric Propulsion Conference*, 1973, p. 1052.
- [9] K. Nishiyama, S. Hosoda, H. Kuninaka, and Y. Toyoda, "Operational Characteristics of a Microwave Discharge Neutralizer for the ECR Ion Thruster $\mu 20$," in *31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, MI, USA*, 2009.
- [10] R. R. Hofer, A. D. Gallimore, and D. Jacobson, "Recent results from internal and very-near-field plasma diagnostics of a high specific impulse Hall thruster," in *28th International Electric Propulsion Conference*, 2003, no. NASA/CR-2003-212604.
- [11] K. K. Jameson, D. M. Goebel, R. R. Hofer, and R. M. Watkins, "Cathode coupling in Hall thrusters," in *30th International Electric Propulsion Conference*, 2007, pp. 2007-278: Citeseer.



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)