

تخمین شکل و موقعیت پوسته پلاسما در سیستم شتاب‌دهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی

میلاذ یدالهی^۱، سید آرش سید شمس طالقانی^۲، وحید اصفهانیان^۳

۱ دانشجوی دکتری هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران

۲ استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، taleghani@ari.ac.ir

۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

چکیده

پوسته پلاسما به‌عنوان مرز ورود یونها به درون سیستم شتاب‌دهنده، اثر مستقیم بر خصوصیات پرتو یون، عملکرد و طول عمر تراستر یونی دارد. به‌طور معمول در مدل‌سازی عددی سیستم شتاب‌دهنده تراسترهای یونی الکترواستاتیکی، اثر الکترون‌ها بر خواص پلاسمای بالادست سیستم شتاب‌دهنده و شکل پوسته پلاسما، با در نظر گرفتن الکترون‌ها به‌صورت سیال (روش پواسون-بولتزمن) یا مدل کردن ذرات الکترون، شبیه‌سازی می‌شود. اما در مطالعه حاضر، با بهره‌گیری از روش ذره درون سلول و بدون انجام محاسبات مربوط به الکترون‌ها، پوسته پلاسما تخمین زده شده است. شکل و موقعیت پوسته پلاسمای حاصل توافق خوبی با نتایج تجربی دارد و در مقایسه با مدل‌های عددی، که الکترون‌ها را نیز شبیه‌سازی کرده بودند، از دقت بالاتری برخوردار است. نتیجه محاسبات نشان می‌دهد که عدم انطباق بین پوسته پلاسمای محاسبه‌شده توسط روش پواسون-بولتزمن و نتایج تجربی، در یک جریان پرتو مشخص، به واگرایی پرتو یون به میزان $3/2$ درجه یا $18/28$ درصد در مقایسه با روش اعمال مستقیم اثر الکترون می‌انجامد.

واژگان کلیدی

تراستر یونی الکترواستاتیکی، سیستم شتاب‌دهنده، شبیه‌سازی عددی، روش ذره درون سلول PIC، پوسته پلاسما

۱. مقدمه

ساخته شده‌اند. این نوع تراسترها به‌دلیل ایمپالس ویژه بالا (2000) تا بیش از 100000 ثانیه) و توانایی تولید تراست کم (نسبت تراست به وزن کمتر از 10^{-6} تا 10^{-4}) در مدت زمان طولانی (بیش از 10000 ساعت کارکرد به‌طور دائم)، برای مأموریت‌های کاوش در اعماق فضا بسیار مناسب‌اند. به‌همین دلیل در هنگام

امروزه استفاده از تراسترهای یونی به‌عنوان رانشگر انواع ماهواره و کاوشگرهای فضایی متداول است. در این میان تراستر یونی الکترواستاتیکی از جایگاه ویژه‌ای در بین سایر رانشگرهای فضایی برخوردار است. تا به امروز تراسترهای شناخته‌شده NEXT^۱، NSTAR^۲، NEXIS^۳ و HiPEP^۴ همگی بر مبنای این طراحی

طراحی آنها پارامتر طول عمر تراستر نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. مهمترین عاملی که تراستر را از ادامه فعالیت بازمی‌دارد خوردگی شبکه شتاب‌دهنده یون آن است. این خوردگی به تدریج و در طول عمر فعالیت تراستر رخ می‌دهد. چون طول عمر تراسترهای یونی الکترواستاتیکی در شرایط کارکرد مداوم می‌تواند به دهها هزار ساعت برسد، تست آنها در شرایط آزمایشگاهی برای تخمین طول عمر بسیار هزینه‌بر است. در اینجا نیز همانند سایر شاخه‌های علمی، شبیه‌سازی عددی می‌تواند ابزاری ارزان و سریع برای بررسی عملکرد تراسترها در شرایط عملکردی مختلف باشد.

یون‌های درون محفظه پلاسما، توسط سیستم شتاب‌دهنده و از طریق پوسته پلاسما استخراج و شتاب داده می‌شوند. بدین ترتیب، پوسته پلاسما مرزی است که در بالادست سیستم شتاب‌دهنده قرار گرفته و جداکننده آن از محفظه پلاسما می‌باشد. آنچه که در مدل‌های عددی شبیه‌سازی عملکرد سیستم شبکه تراسترهای یونی الکترواستاتیکی مشترک است، محدودکردن دامنه حل به سیستم شتاب‌دهنده و عدم شبیه‌سازی محفظه پلاسمای بالادست آن است. در این شرایط، تخمین شکل و موقعیت پوسته پلاسما به‌عنوان مرز بالادست دامنه حل و به دلیل اثرگذاری مستقیم آن بر پرتوی یون خروجی از تراستر، دارای اهمیت است.

طی سالیان متعددی، نرم‌افزارها و کدهای عددی متعددی جهت شبیه‌سازی عملکرد سیستم شتاب‌دهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی، توسط دانشگاه‌ها و مراکز علمی توسعه یافته است. در این میان می‌توان به کدهای [۱] igx، [۲] OPT، [۳] CEX، [۴] JIEDI [۵] اشاره کرد. همچنین از روش‌های آماری نیز در طراحی تراستر [۶-۷] و تخمین طول عمر آن [۸] استفاده شده است. علاوه بر این‌ها در برخی موارد، نرم‌افزارهای تجاری مولتی‌فیزیک نیز در شبیه‌سازی عملکرد تراسترهای یونی الکترواستاتیکی به‌کار گرفته شده‌اند [۹]. در اکثر کدهای محاسباتی، برای شبیه‌سازی حرکت ذرات باردار از روش ذره درون سلول^۵ استفاده شده و در برخی موارد از روش‌هایی مانند لوله - شار^{۱۰} [۱۰] یا اپتیک یون [۱۱] بهره گرفته شده است. پارامترهای متداول در اعتبارسنجی کدهای شبیه‌ساز عملکرد سیستم شتاب‌دهنده، تنها محدود به زاویه واگرایی پرتو یون [۱۲] و شکل مقطع شبکه‌ها پس از خوردگی [۱۳] بوده و صحت پوسته پلاسمای تخمینی در آنها اعتبارسنجی نشده است. اشتون و ویلبور

(۱۹۸۱) به‌طور تجربی شکل و موقعیت پوسته پلاسما را در شرایط مختلف عملکردی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴]. اوکاووا و تاکاگهارا (۱۹۹۹) با استفاده از روش PIC و شبیه‌سازی الکترون‌ها به‌صورت ذرات باردار، اثر پارامترهای مختلف بر خواص پوسته پلاسما را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۵].

فانرل (۲۰۰۷) طی مطالعات خود روی مدل سه‌بعدی سیستم شتاب‌دهنده، به بررسی شکل و موقعیت پوسته پلاسما در شرایط پروانس^۷ مختلف پرداخته است [۱۶]. ژونگ و همکاران (۲۰۱۰) با به‌کارگیری رابطه پواسون - بولتزمن در الگوریتم PIC، اثر ولتاژ شبکه شتاب‌دهنده را بر پوسته پلاسما بررسی کرده‌اند [۱۷]. شاگایدا و همکاران (۲۰۱۶) اثر هم‌محور نبودن شبکه‌های سیستم شتاب‌دهنده بر خوردگی شبکه را توسط کد سه‌بعدی IOS-3D و به‌کارگیری از معادله بولتزمن در تخمین چگالی الکترون‌ها مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۸]. در مطالعات فوق‌الذکر و سایر مطالعات عددی در حوزه شبیه‌سازی سیستم شتاب‌دهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی، حضور الکترون‌ها در پلاسمای بالادست سیستم شتاب‌دهنده و تأثیر آنها بر تشکیل پوسته پلاسما به دو صورت مدل شده است. در حالت اول که بیشتر از آن استفاده می‌شود، الکترون‌ها به‌صورت سیال در نظر گرفته شده‌اند و چگالی آنها به‌عنوان خاصیت ماکروسکوپی، با استفاده از رابطه بولتزمن محاسبه می‌شود (روش پواسون - بولتزمن). در حالت دوم، الکترون‌ها به‌صورت ذرات باردار در نظر گرفته می‌شوند و حرکت و رفتار آنها در داخل میدان همانند ذرات یون مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعه حاضر قصد دارد تا با شبیه‌سازی عددی سیستم شتاب‌دهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی، بدون انجام محاسبات مربوط به اثر الکترون‌ها، موقعیت و شکل پوسته پلاسما را تخمین زده و نتایج را با مقادیر تجربی و سایر مدل‌های عددی مقایسه نماید. بدین‌منظور از روش ذره درون سلول (PIC) برای حل میدان پتانسیل بین شبکه‌ای بهره گرفته شده است. همچنین در تخمین پوسته پلاسما از الگوریتم پیشنهادی در کد igx [۱] استفاده شده که در اینجا به‌عنوان روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها^{۱۱} از آن یاد شده است.

۲. الگوریتم محاسباتی

همان‌گونه که گفته شد، در مطالعه حاضر از روش PIC برای حل میدان پتانسیل الکتریکی و شبیه‌سازی حرکت یون‌ها درون

$$\vec{F} = \frac{q}{m} \vec{E} \quad (3)$$

که در اینجا m و q به ترتیب جرم و بار الکتریکی ذره است. سپس سرعت و موقعیت هر ذره در هر گام زمانی با استفاده از معادلات حرکت، محاسبه شده و حلقه شبیه‌سازی از گام اول تکرار می‌شود. در روشی که الکترون‌ها به صورت سیال در نظر گرفته می‌شوند، از رابطه بولترمن برای تخمین چگالی الکترون‌ها در هر نقطه از میدان استفاده می‌شود:

$$n_e = n_0 e^{\left(\frac{\phi - \phi_0}{T_e}\right)} \quad (4)$$

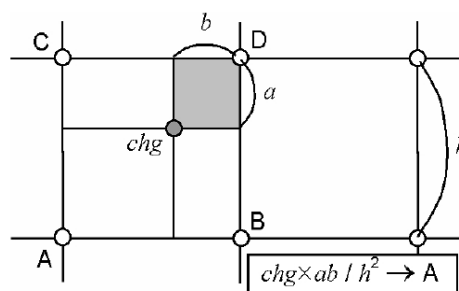
که n_0 ، ϕ_0 و T_e به ترتیب چگالی و پتانسیل الکتریکی پلاسمای مرجع و دمای الکترون می‌باشند. به کارگیری رابطه ۴ در محاسبه چگالی بار الکتریکی ρ در طرف راست معادله پواسون، رابطه پواسون - بولترمن برای محاسبه پتانسیل الکتریکی را نتیجه می‌دهد.

در مطالعه حاضر از روش پیشنهادی توسط ناکایاما و ویلبور [۱] برای تخمین شکل و موقعیت پوسته پلازما استفاده شده است. در روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها نیازی به شبیه‌سازی ذرات الکترون و یون به‌طور همزمان نیست و تنها با شبیه‌سازی ذرات یون و استفاده از یک فرض ساده‌کننده می‌توان موقعیت پوسته پلازما را تخمین زد. این روش بر پایه این فرض استوار است که در کل دامنه حل، بیشترین مقدار پتانسیل میدان مربوط به پتانسیل پلاسمای محفظه پلازما است. بدین ترتیب در طول حل، اگر مقدار پتانسیل گره بیشتر از مقدار پتانسیل پلاسمای محفظه پلازما به‌دست آمد، پتانسیل آن برابر پتانسیل پلاسمای محفظه در نظر گرفته می‌شود. شماتیک این روش در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

در شکل ۲ برای یک موقعیت شعاعی مشخص، مقدار پتانسیل الکتریکی (ϕ) برای موقعیت‌های طولی (z) مختلف رسم شده است. فرض شده پتانسیل اولین نقطه سمت چپ که دورترین فاصله را از شبکه غربال دارد (یا همان مرز بالادست)، همواره برابر با پتانسیل محفظه پلازما باقی بماند و پتانسیل سایر نقاط از حل معادله لاپلاس همانند شکل ۲ الف به‌دست آید. پس از تزریق یون‌ها از صفحه سمت چپ (پلازما)، پتانسیل نقاط به‌دست آمده از معادله پواسون، بالاتر از ϕ_p می‌رود (شکل ۲ ب). اگر پتانسیل محاسبه‌شده بالاتر از پتانسیل پلازما باشد، (شکل ۲ ج) این‌گونه در نظر گرفته می‌شود که در عمل این پتانسیل‌های بالاتر، الکترون‌ها (بارهای منفی) را برای حفظ تعادل از پلاسمای مجاور

سیستم شتاب‌دهنده استفاده شده است. میدان پتانسیل الکتریکی ناشی از حضور شبکه غربال^۱ (با ولتاژ مثبت)، شبکه شتاب‌دهنده^۲ (با ولتاژ منفی) و محفظه پلاسمای بالادست جریان است. این روش از پنج گام اساسی تشکیل شده است:

۱. توزیع بار الکتریکی ناشی از حضور ذرات باردار درون سلول روی نقاط گره همان سلول
 ۲. حل معادله پواسون برای تمامی دامنه حل و محاسبه پتانسیل الکتریکی هر گره
 ۳. محاسبه میدان الکتریکی در نقاط گره ناشی از گرادیان پتانسیل الکتریکی
 ۴. اعمال برآیند نیروی‌های ناشی از میدان الکتریکی گره‌های هر سلول روی ذرات درون آن
 ۵. حرکت ذرات درون میدان حل و تکرار حلقه از مرحله اول
- در محاسبه توزیع بار از روش میانگین‌گیری وزنی استفاده شده است. به‌طوری‌که نقاط گره نزدیکتر به ذره، سهم بیشتری از بار ذره را به‌خود اختصاص می‌دهند و بالعکس. شماتیک این روش برای حالت دوبعدی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. شماتیک توزیع بار ذره درون سلول روی نقاط گره سلول [۱۹]

پس از محاسبه مجموع بار الکتریکی ذرات اطراف هر گره، معادله پواسون برای تمامی نقاط گره دامنه حل، حل شده و مقادیر پتانسیل الکتریکی در نقاط گره‌ای به‌دست می‌آید:

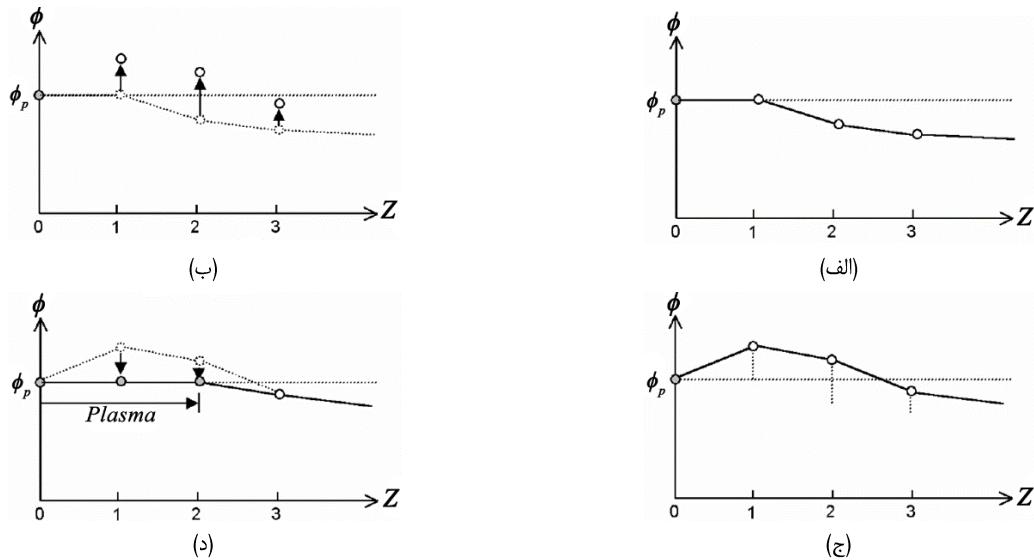
$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

که در آن ϕ ، ρ و ϵ_0 به ترتیب، پتانسیل الکتریکی، چگالی بار الکتریکی و ثابت گذردهی الکتریکی خلا می‌باشند. میدان الکتریکی در هر گره برابر با منفی گرادیان پتانسیل الکتریکی آن است:

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (2)$$

با اعمال میدان الکتریکی نقاط گره به ذرات درون سلول به‌روش عکس توزیع بار الکتریکی ذرات و استفاده از معادله نیروی لورنتس، نیروی وارده بر هر ذره محاسبه می‌شود:

پواسون در داخل حلقه PIC صورت می‌گیرد. پس از عبور جریان یون از شبکه غربال، شکل و موقعیت پوسته پوسسته تغییری نخواهد کرد و اصطلاحاً حل برای محاسبه پوسته همگرا شده است. برای شکل‌گیری پرتو یون و محاسبه جریان پرتو نیاز است تا جریان یون از پایین دست دامنه حل خارج شده و مقدار جریان پرتو یون ثابت شود.

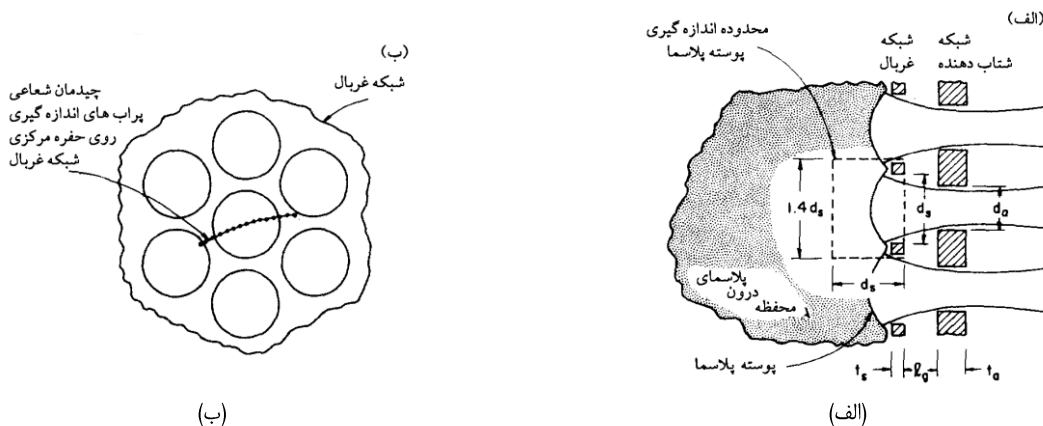


شکل ۲. شماتیک مراحل محاسبه پوسته پلاسما؛ الف) پتانسیل اولیه، ب) تزریق یون، ج) پتانسیل محاسبه شده، د) تنظیم پتانسیل [۱]

۳. مدل‌سازی عددی

تراستر در شکل ۳ دیده می‌شود. ابعاد تراستر و شرایط عملکردی نمونه آزمایشگاهی در جدول ۱ ذکر شده است. موقعیت ابعاد هندسی اشاره شده در جدول ۱ در شکل ۳ دیده می‌شود. نتیجه آزمایش برای تعیین شکل پوسته پلاسما و موقعیت آن نسبت به شبکه غربال در شرایط عملکردی ذکر شده در جدول ۱ برای حفره مرکزی تراستر یونی مورد آزمایش، مطابق شکل ۴ می‌باشد.

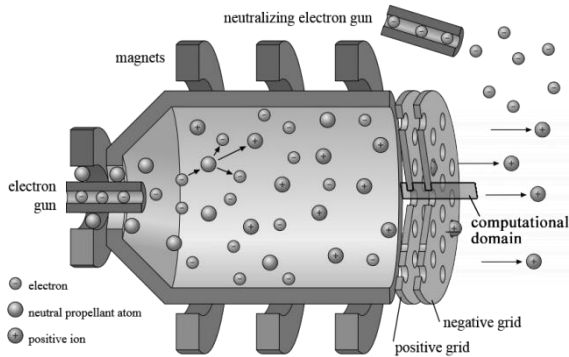
بهمنظور اعتبارسنجی، نتایج حل عددی با نتایج تجربی اشتون و ویلیور [۱۴] مقایسه می‌شود. آنها در مطالعه تجربی خود با قرار دادن یک ردیف پراب لانگمویر^{۱۱} در راستای قطر یک حفره تراستر یونی، مشخصات پلاسمای بالادست شبکه غربال را تا عمقی معادل قطر حفره شبکه غربال درون محفظه پلاسما اندازه‌گیری کردند. نحوه چینش پراب‌ها و موقعیت آنها درون



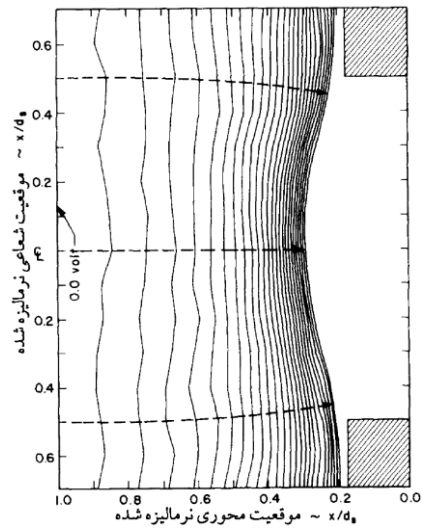
شکل ۳. نمای شماتیک الف) محدوده اندازه‌گیری پوسته پلاسما، ب) چیدمان پراب‌های لانگمویر درون تراستر [۱۴]

جدول ۱. ابعاد هندسی و شرایط عملکردی تراستر مورد استفاده در تست [۱۴]

مقدار	پارامتر
۱۱۰۰۷	ولتاژ شتابدهی کل (V_T)
۴۵۷	ولتاژ تخلیه (V_D)
۰/۱۸	نسبت ضخامت شبکه غربال (t_g/d_s)
۰/۶۴	نسبت قطر شبکه شتابدهنده (d_a/d_s)
۰/۳۷	نسبت ضخامت شبکه شتابدهنده (t_a/d_s)
۰/۵۰	نسبت فاصله شبکه غربال و شتابدهنده (l_g/d_s)



شکل ۵. موقعیت دامنه حل نسبت به تراستر یونی الکترواستاتیکی



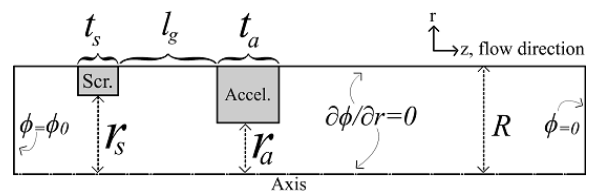
شکل ۴. شکل و موقعیت قرارگیری پوسته پلاسما برای نمونه آزمایش شده

مقدار پتانسیل در مرز بالادست و شبکه‌های غربال و شتابدهنده ثابت بوده و به ترتیب برابر پتانسیل پلاسما محفظه پلاسما، ولتاژ شبکه غربال و ولتاژ شبکه شتابدهنده می‌باشد. تغییرات پتانسیل در راستای شعاعی برای مرز دامنه با حفرة مجاور (خطوط افقی بالا) و محور تقارن دامنه حل، برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند. شبکه‌بندی استفاده شده فواصل طولی و عرضی یکسان دارد. گام شبکه از مرتبه طول دبای^{۱۲} برابر ۰/۰۲ میلی‌متر می‌باشد. در حل معادله پواسون از روش PSOR^{۱۳} و مجزاسازی مرکزی مرتبه دوم بهره گرفته شده است. میدان الکتریکی نیز از طریق مشتق‌گیری از مقادیر پتانسیل الکتریکی در نقاط گره با روش مجزاسازی مرکزی مرتبه دوم محاسبه شده است.

۴. بحث و بررسی نتایج

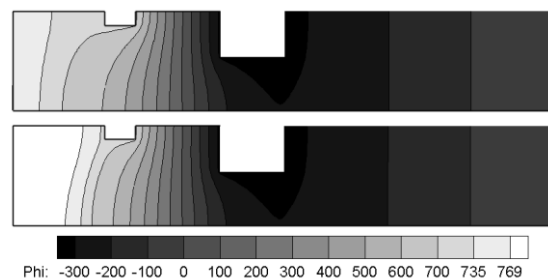
مسئله برای تراستری با شرایط عملکردی ذکر شده در جدول ۱ حل شد. مقایسه توزیع پتانسیل الکتریکی در دامنه حل برای قبل

به منظور مدل‌سازی عددی سیستم شتابدهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی از کدنویسی شی‌گرا^{۱۱} به زبان C++ بهره گرفته شده است. دامنه حل به صورت متقارن محور در نظر گرفته شده به گونه‌ای که توزیع پتانسیل و حرکت یون‌ها تنها برای نیمی از حفرة مرکزی حل و شبیه‌سازی می‌شود. موقعیت دامنه حل روی شماتیک تراستر یونی الکترواستاتیکی در شکل ۵ مشخص شده است. همچنین پارامترهای هندسی و شرایط مرزی دامنه حل در شکل ۶ نشان داده شده است. ابعاد هندسی دامنه حل و شرایط عملکردی مدل عددی، همانند تراستر استفاده شده در تست [۱۴] می‌باشد.



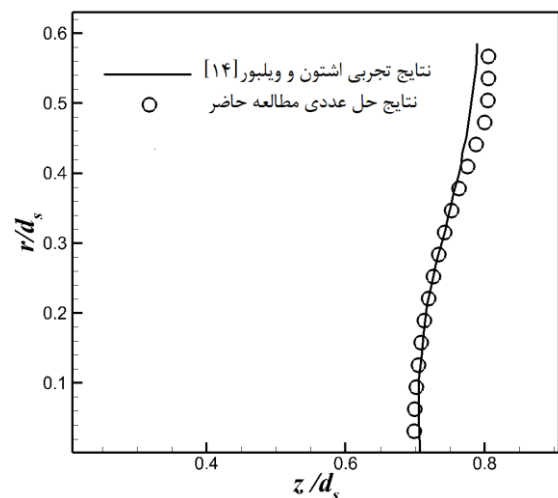
شکل ۶. دامنه حل استفاده شده در مدل‌سازی پوسته پلاسما

و بعد از اعمال آثار حضور یون‌ها در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در این شکل پوسته پلاسمای تشکیل شده در بالادست شبکه غربال، پس از اعمال آثار یون‌ها به خوبی مشهود است. به منظور مقایسه بهتر، پوسته پلازما برای هر دو حالت تجربی و عددی در شکل ۸ رسم شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها توانسته توافق بالایی را با نتایج تجربی حاصل کند. در نواحی نزدیک به دیواره شبکه غربال و مجاور با حفرة کناری مقداری تفاوت در بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. علت این تفاوت را می‌توان ناشی از این موضوع دانست که در این ناحیه الکترون‌ها با بار منفی به سمت شبکه غربال با ولتاژ مثبت جذب شده و تجمع الکترون‌ها در این ناحیه زیادتر از سایر نواحی است؛ حال آنکه در مطالعه عددی آثار حضور الکترون‌ها در تمامی نواحی بالادست شبکه غربال به‌طور یکنواخت فرض شده است. همچنین با حرکت از حفرة مرکزی تراستر به سمت حفرة‌های نزدیک دیواره‌ها، به تدریج از تقارن پوسته پلازما نسبت به محور حفرة کاسته می‌شود؛ که در مدل عددی مرز دامنه با حفرة مجاور به‌صورت متقارن در نظر گرفته شده است.



شکل ۷. مقایسه کانتور پتانسیل الکتریکی در قبل (بالا)

و بعد (پایین) اعمال اثرات حضور یون‌ها

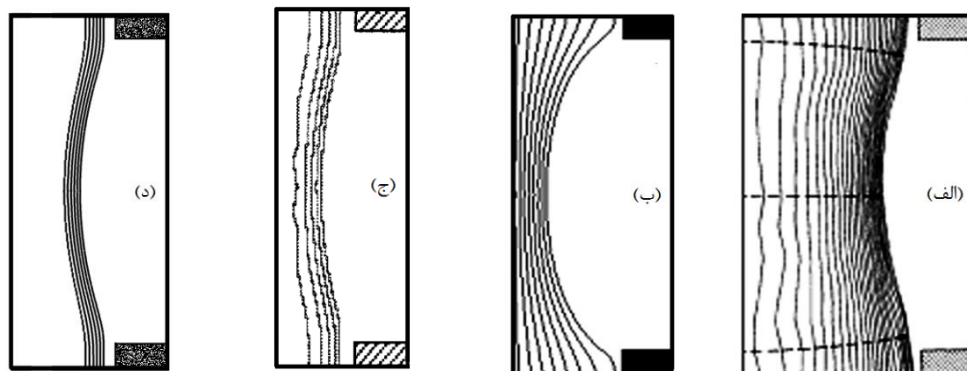


شکل ۸. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای شکل و موقعیت پوسته پلازما

نتایج آزمایش‌های اشتون و ویلبور [۱۴] بیشتر در شبیه‌سازی‌های عددی ژونگ و همکاران [۱۷] و اوکاو و تاکاهاارا [۱۵] به‌منظور صحت‌گذاری نتایج استفاده شده است. نتایج پوسته پلاسمای تخمین زده شده توسط این مطالعات و مطالعه حاضر در شکل ۹ با نتایج تجربی مقایسه شده است. همان‌گونه که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، دقت بالای روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها در تخمین شکل و موقعیت پوسته پلازما در مقایسه با دو شبیه‌سازی دیگر به خوبی مشهود است. چون در مطالعه حاضر تنها تأکید بر تخمین شکل و موقعیت نهایی پوسته پلازما می‌باشد؛ اطلاع از نحوه شکل‌گیری پوسته پلازما از اهمیت چندانی برخوردار نیست. به همین دلیل، روش انتخاب‌شده در اینجا با وجود دقت بالا در تخمین شکل و موقعیت پوسته پلازما، اطلاعاتی در زمینه خصوصیت میدان در بالادست پوسته پلازما ارائه نمی‌دهد. روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها بر این فرض استوار است که هر جا پتانسیل الکتریکی از پتانسیل پلاسمای محفظه بیشتر باشد، الکترون‌ها در آنجا حضور پیدا کرده و موجب کاهش پتانسیل الکتریکی می‌شوند. بدین ترتیب بایستی در نواحی بالادست پوسته پلازما شاهد تمرکز حضور و تراکم الکترون‌ها باشیم. بررسی صحت این فرض با استفاده از شبیه‌سازی توزیع ذرات الکترون، امکان‌پذیر است. در شکل ۱۰، موقعیت الکترون‌ها در بالادست شبکه غربال نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است حضور الکترون‌ها تنها محدود به نواحی بالادست پوسته بوده و در نزدیکی حفرة شبکه غربال اثری از حضور الکترون‌ها نیست. بر این اساس می‌توان فرض استفاده شده در تخمین پوسته پلازما را از لحاظ تطابق با فیزیک مسئله، فرضی صحیح دانست.

یکی از جنبه‌های مورد بحث درباره روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها، تأکید بر سریع‌تر بودن آن نسبت به روش‌هایی است که الکترون‌ها را مدل می‌کنند. در روشی که الکترون‌ها همانند یون‌ها به‌صورت ذرات باردار مدل می‌شوند، در موقعیت مشخص از میدان، نیروی وارده به هر دو این ذرات بر اساس رابطه نیروی لورنتس یکسان بوده، اما به دلیل نسبت جرم یون به الکترون از مرتبه 10^5 ، شتاب وارده به الکترون‌ها و به تبعیت از آن سرعت آنها به همین نسبت بیشتر خواهد بود. از طرفی در روش PIC گام زمانی بایستی به‌گونه‌ای انتخاب شود که ماکزیمم فاصله طی‌شده توسط هر ذره در هر گام زمانی کمتر از گام شبکه باشد. لذا چون

خواص پلاسمای مرجع محاسبه می‌کند. قرار دادن معادله ۴ در طرف راست معادله پواسون موجب غیرخطی شدن این معادله می‌شود. در نتیجه حل معادله پواسون غیرخطی برای این روش در مقایسه با حالت خطی معادله برای روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها، نیاز به تکرارهای بیشتری برای همگرایی دارد.



شکل ۹. مقایسه الف) نتایج تجربی [۱۴] با نتایج عددی ب) ژونگ و همکاران [۱۷]، ج) اوکاوا و تاکاهارا [۱۵] و د) مطالعه حاضر

سرعت الکترون‌ها بیشتر است، سرعت الکترون‌ها مبنای انتخاب گام زمانی قرار گرفته و در نتیجه گام زمانی بسیار کوچک خواهد شد که منجر به افزایش زمان شبیه‌سازی از مرتبه 10^5 می‌شود. در روش پواسون - بولتزمن، رابطه بولتزمن چگالی الکترون در هر نقطه از میدان را با توجه به پتانسیل الکتریکی همان نقطه و

تراستر، روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها سرعت بالاتری دارد. اما اگر صرفاً شکل پرتو مدنظر باشد، روش پواسون - بولتزمن می‌تواند سریعتر همگرا شود. نتایج شکل و موقعیت پوسته پلاسمای محاسبه شده با استفاده از دو روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها و روش تخمین چگالی الکترون‌ها توسط معادله بولتزمن در شکل ۱۱ با نتایج تجربی مقایسه شده است. این نتایج برای تراستری با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ و برای جریان پرتوی یون یکسان رسم شده است.

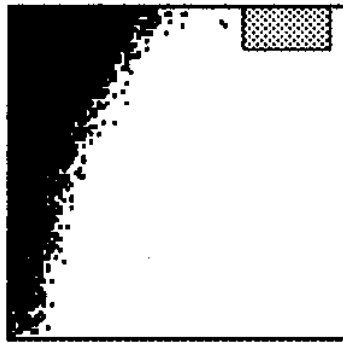
همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، پوسته تخمین زده شده با استفاده از روش پواسون - بولتزمن اختلاف مشهودی با نتایج تجربی و نتایج عددی روش اعمال مستقیم اثر الکترون دارد. با افزایش موقعیت شعاعی، فاصله موقعیت پوسته روش پواسون - بولتزمن از پوسته تجربی به تدریج کم شده و در نهایت بر آن منطبق می‌شود. این اختلاف موقعیت سبب افزایش طول شتاب‌دهی یون‌ها در نواحی نزدیک به مرکز حفره شده و در نتیجه سرعت یون‌هایی که از این ناحیه استخراج می‌شوند بیشتر از مقدار واقعی خواهد بود. البته با توجه به اینکه در توزیع یکنواخت چگالی پلاسمای، تعداد ذرات یون حاضر در هر موقعیت با افزایش شعاع زیاد می‌شوند، تعداد ذرات یونی که از این ناحیه استخراج می‌شوند و در نتیجه سرعت آنها به درستی تخمین زده نشده، کم خواهد بود. اما اختلاف در شکل منحنی پوسته برای موقعیت شعاعی بالاتر

نتایج شبیه‌سازی جریان پرتو با استفاده از دو روش محاسبه چگالی الکترون‌ها توسط معادله بولتزمن و روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها نشان می‌دهد که در ابتدای شبیه‌سازی و تا قبل از تشکیل پرتوی یون یا ثابت شدن جریان پرتوی یون، تعداد تکرار حلقه حل‌گر معادله پواسون برای روش پواسون - بولتزمن در حدود نصف تکرارهای روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها می‌باشد. اما پس از تشکیل پرتو، شرایط برعکس شده و حل‌گر پواسون در روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها با تعداد تکرار ۲۵ درصد کمتر از روش پواسون - بولتزمن همگرا می‌شود.

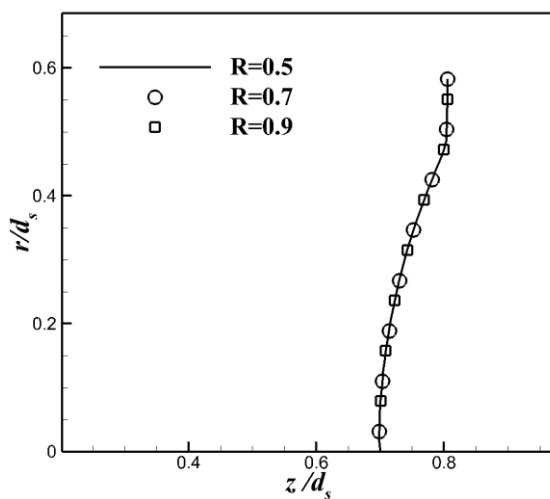
در روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها به دلیل نادیده گرفتن چگالی الکترون‌ها و کم‌نشدن بار الکتریکی الکترون‌ها از یون‌ها (در محاسبه چگالی بار الکتریکی ρ در طرف راست معادله پواسون)، طرف راست معادله پواسون، در مقایسه با روش پواسون - بولتزمن، دارای مقدار بزرگتری خواهد بود. در نتیجه تا قبل از همگرایی پرتو و رسیدن یون‌ها به پایین دست میدان حل، حلقه حل‌گر پواسون باید تعداد تکرار بیشتری برای انتشار اثر حضور یون‌های بالادست میدان و اعمال این آثار بر پتانسیل الکتریکی پایین دست میدان انجام دهد. اما پس از تشکیل پرتو، توزیع یون در دامنه حل تغییر چندانی نداشته و خطی بودن معادله پواسون سبب برتری روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها بر روش پواسون - بولتزمن می‌شود. بنابراین در مطالعات مربوط به طول عمر

محور تقارن منحرف می‌شوند. اگر در طی مسیر شتاب‌دهی، این انحراف از راستای طولی تصحیح نشود، موجب ایجاد شرایط قطع^{۱۴} محور تقارن توسط پرتوی یون و افزایش واگرایی پرتو می‌شود. بر همین اساس، حتی اگر شرایط قطع محور بوجود نیاید، زاویه واگرایی پرتوی یون شبیه‌سازی شده با استفاده از روش پواسون - بولتزمن بیشتر از مقدار واقعی خواهد بود. نتیجه‌گیری دقیق‌تر در خصوص این موضوع از طریق محاسبه زاویه واگرایی پرتو برای هر دو مدل عددی امکان‌پذیر است.

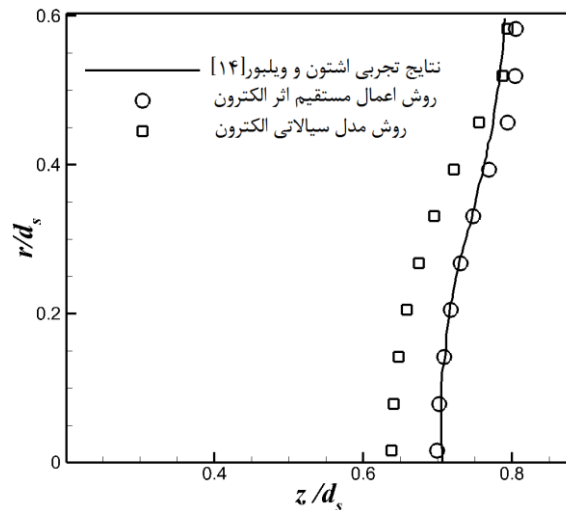
از ۲۵ درصد شعاع نرمالیزه شده تأثیر مستقیم بر شکل پرتو خروجی نهایی خواهد داشت. راستای بردار عمود بر سطح در هر موقعیت از پوسته، نشان‌دهنده راستای میدان در آن ناحیه و در نتیجه راستای اعمال نیرو به یون‌های استخراج شده از آن موقعیت می‌باشد (با توجه به معادله ۲). در موقعیت‌های شعاعی بالاتر از ۲۵ درصد شعاع نرمالیزه، شکل پوسته تخمین زده شده توسط روش پواسون - بولتزمن به‌گونه‌ای است که یون‌های استخراج‌شده از این ناحیه نسبت به حالت تست، بیشتر به سمت مرکز حفره و



شکل ۱۰. توزیع الکترون‌ها در پلاسمای بالادست شبکه غربال [۱۵]



شکل ۱۲. مقایسه شکل پوسته تخمین زده شده برای مقادیر نسبت ولتاژ خالص به ولتاژ کل ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹



شکل ۱۱. مقایسه پوسته تخمین زده شده توسط روش اعمال مستقیم اثر الکترون و روش سیالاتی با نتایج تجربی

نتایج تجربی منجر به تخمین نادرست شکل پرتو خواهد شد. تحلیل پارامتریک اکثر متغیرهای عملکردی تراستر روی شکل و موقعیت پوسته، پیشتر توسط اوکاوا و تاکاهاارا [۱۵] انجام شده است. تنها پارامتری که آثار آن بررسی نشده، پارامتری بعد نسبت ولتاژ خالص به ولتاژ شتاب‌دهی کل $R = V_n/V_T$ می‌باشد. شکل و موقعیت پوسته برای سه مقدار مختلف ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ در شکل

زاویه واگرایی پرتوی یون پس از ثابت شدن جریان خروجی از سیستم شتاب‌دهنده قابل محاسبه است. زاویه واگرایی پرتو در روش اعمال مستقیم اثر الکترون به‌عنوان روشی که بیشترین تطابق را با نتایج تجربی دارد، برابر با ۱۷/۵ درجه بوده در حالی که این مقدار در روش پواسون - بولتزمن برابر با ۲۰/۷ درجه می‌باشد. بر این اساس، عدم تطابق شکل پوسته روش پواسون - بولتزمن بر

روش، $3/2$ درجه بیشتر از روش اعمال مستقیم اثر الکترون به دست آمد.

۴. پوسته پلاسما برای سه مقدار نسبت ولتاژ خالص به شتابدهی کل $0/5$ ، $0/7$ و $0/9$ تخمین زده شد. براساس نتایج به دست آمده، مقدار این پارامتر بی بعد تأثیری بر شکل و موقعیت پوسته پلاسما ندارد.

بدین ترتیب، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته می‌توان در ادامه فرایند شبیه‌سازی عملکرد سیستم شتاب‌دهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی و تخمین طول عمر تراستر، با اطمینان بالایی از نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر و روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها استفاده کرد.

فهرست علائم و اختصارات

-	مشخصه شبکه شتاب‌دهنده	a
m	قطر	d
$V.m^{-1}$	میدان الکتریکی	E
N	نیروی وارد بر ذره	F
m	فاصله شبکه شتاب‌دهنده از شبکه غربال	l_g
kg	جرم ذره	m
$C.m^{-3}$	چگالی پلاسما مرجع	n_0
C	بار ذره	q
m	عرض دامنه حل	R
m	شعاع حفره شبکه	r
-	مشخصه شبکه غربال	s
K	دمای الکترون	T_e
m	ضخامت شبکه	t
V	ولتاژ تخلیه	V_D
V	ولتاژ شتابدهی کل	V_T
V	ولتاژ خالص سیستم شبکه	V_n
$C^2.N^{-1}.m^{-2}$	ثابت گذردهی خلا	ϵ_0
$C.m^{-3}$	چگالی بار الکتریکی	ρ
V	پتانسیل الکتریکی	ϕ
V	پتانسیل الکتریکی محفظه پلاسما	ϕ_p
V	پتانسیل الکتریکی مرجع	ϕ_0

۱۲ رسم شده است. در طی محاسبات نتایج شکل ۱۲ مقدار ولتاژ شتابدهی (اختلاف ولتاژ شبکه شتاب‌دهنده و غربال) و ولتاژ تخلیه (اختلاف ولتاژ شبکه غربال و پلاسما محفظه) ثابت نگه داشته شده است. به همین دلیل گرایان پتانسیل الکتریکی و در نتیجه با توجه به معادله ۲، میدان الکتریکی برای هر سه حالت یکسان خواهد بود. تحت این شرایط، خطوط هم‌پتانسیل نیز تغییر نخواهد کرد و متعاقباً شکل و موقعیت پوسته ثابت باقی می‌ماند.

۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با هدف تعیین مشخصات پوسته پلاسما به عنوان مرز استخراج یون در فرایند شبیه‌سازی عملکرد سیستم شتاب‌دهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی، کد محاسباتی تدوین شد. این کد که بر پایه برنامه‌نویسی شی‌گرا و در زبان C++ تدوین شده، از روش PIC برای حل میدان پتانسیل و شبیه‌سازی حرکت یون‌ها درون فضای محاسباتی، بهره گرفته است. با توجه به نتایج مطالعات:

- روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها توافق بالایی با نتایج تجربی در تعیین شکل و موقعیت پوسته پلاسما داشته، با این وجود اندکی اختلاف در نواحی نزدیک به دیواره شبکه غربال و مرز حفره مجاور دیده شد.
- مقایسه بین سرعت همگرایی حل در دو روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها و روش پواسون - بولتزمن نشان داد، در مطالعات مربوط به پرتوی یون، روش پواسون - بولتزمن ۵۰ درصد سریع‌تر و در مطالعات مربوط به طول عمر تراستر، روش اعمال مستقیم اثر الکترون‌ها ۲۵ درصد سریع‌تر می‌باشد.
- عدم تطابق شکل پوسته پلاسما روش پواسون - بولتزمن بر نتایج تجربی منجر به افزایش زاویه واگرایی پرتو تخمین زده شده توسط این روش می‌شود. به طوری که زاویه واگرایی پرتو محاسبه شده در این

۶. مأخذ

- [1] Y. Nakayama, P. J. Wilbur, Numerical simulation of ion beam optics for multiple-grid systems, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 4, pp. 607-613, 2003.
- [2] M. Nakano, Three-dimensional simulations of grid erosion in ion engines, *Vacuum*, Vol. 83, No. 1, pp. 82-85, 2008.
- [3] M. Coletti, S. Gabriel, The applicability of dual stage ion optics to ion engines for high power

- missions, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 40, No. 4, pp. 1053-1063, 2012.
- [4] R. E. Wirz, J. R. Anderson, I. Katz, Time-dependent erosion of ion optics, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 27, No. 1, pp. 211-217, 2011.
- [5] H. Watanabe, M. Nakano, Y. Kajimura, I. Funaki, R. Takaki, Numerical life qualification of ion thruster's ion optics using the JIEDI tool, 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, San Jose, USA, July 14-17, 2013.
- [6] C. C. Farnell, J. D. Williams, Genetic algorithm for ion thruster grid design, 16th IEEE International Pulsed Power Conference, New Orleans, USA, November 17-19, 2007.
- [7] C. C. Farnell, J. D. Williams, Ion thruster grid design using an evolutionary algorithm, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 1, pp. 125-129, 2010.
- [8] J. X. Li, Z. H. Wang, Y. B. Zhang, H. M. Fu, C. R. Liu, S. Krishnaswamy, Remaining useful life prediction and reliability analysis for an individual ion thruster, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 32, No. 4, pp. 948-957, 2016.
- [9] M. Dobkevicius, D. Feili, Multiphysics model for radio-frequency gridded ion thruster performance, *Journal of Propulsion and Power*, pp. 1-15, 2017.
- [10] A. Yamaguchi, A. Kibe, N. Yamamoto, T. Morita, H. Nakashima, M. Nakano, Erosion rate measurement in ion thrusters using Cavity Ring-Down Spectroscopy technique, *Journal of Instrumentation*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-7, 2016.
- [11] A. Shagayda, S. Madeev, Performance limits of ion extraction systems with non-circular apertures, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 87, No. 4, pp. 43301, 2016.
- [12] G. Aston, H. R. Kaufman, Ion beam divergence characteristics of three-grid accelerator systems, *AIAA Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 64-70, 1979.
- [13] A. Sengupta, J. A. Anderson, C. Garner, J. R. Brophy, K. De Groh, B. Banks, T. A. Karniotis, Deep space 1 flight spare ion thruster 30,000-hour life test, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, pp. 105-117, 2009.
- [14] G. Aston, P. J. Wilbur, Ion extraction from a plasma, *Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 4, pp. 2614-2626, 1981.
- [15] Y. Okawa, H. Takegahara, Particle simulation on ion beam extraction phenomena in an ion thruster, 26th International Electric Propulsion Conference, Kitakyushu, Japan, October 17-21, 1999.
- [16] C. C. Farnell, Performance and lifetime simulation of ion thruster optics, PhD Thesis, Colorado State University, Fort Collins, 2007.
- [17] L. Zhong, Y. Liu, Z. Wen, J. Ren, Numerical simulation of ion extraction through ion thruster optics, *Plasma Science and Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 103-108, 2010.
- [18] A. Shagayda, V. Nikitin, D. Tomilin, Three-dimensional analysis of ion optics with misalignments of apertures, *Vacuum*, Vol. 123, pp. 140-150, 2016.
- [19] Y. Nakayama, P. Wilbur, Numerical simulation of high specific impulse ion thruster optics, 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, USA, October 15-19, 2001.

پی‌نوشت

1. NASA evolutionary xenon thruster
2. NASA solar technology application readiness
3. nuclear electric xenon ion system
4. high power electric propulsion
5. particle-in-cell method
6. flux-tube
7. perveance
8. screen grid
9. accelerator grid
10. langmuir probe
11. object oriented
12. debye length
13. point successive over-relaxation method
14. cross-over