تخمين شكل و موقعيت پوستهٔ پلاسما در سيستم شتابدهندهٔ تراستر يوني الكترواستاتيكي

میلاد یدالهی'، سید آرش سید شمس طالقانی'، وحید اصفهانیان" ۱ دانشجوی دکتری هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران ۲ استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، تهران taleghani@ari.ac.ir ۳ استاد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک ، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، تهران

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

چکیدہ

پوستهٔ 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 مطالعهٔ حاضر، با بهره گیری از روش ذرهٔ درون سلول و بدون انجام محاسبات مربوط به الکترونها، پوستهٔ پلاسما تخمین زده شده است. شکل و موقعیت پوستهٔ 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. نتیجهٔ محاسبات نشان میدهد که عدم انطباق بین پوستهٔ پلاسمای محاسبهشده توسط روش پواسون – بولتزمن و نتایج تجربی، در یک جریان پرتو مشخص، به واگرایی پرتو یون به میزان ۲/۲ یا ۱۸/۲۸ درصد در مقایسه با روش اعمال مستقیم اثر الکترون میانجامد.

واژگان کلیدی

تراستر يوني الكترواستاتيكي، سيستم شتابدهنده، شبيهسازي عددي، روش ذره درون سلول PIC، پوستهٔ پلاسما

۱. مقدمه

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 شناختهشدهٔ NEXT^۱، برکتروادار است. تا به امروز تراسترهای شناختهشدهٔ NEXT^۱،

ساخته شدهاند. این نوع تراسترها بهدلیل ایمپالس ویژهٔ بالا (۲۰۰۰ تا بیش از ۱۰۰۰۰ ثانیه) و توانایی تولید تراست کم (نسبت تراست به وزن کمتر از ^۶-۱۰ تا ^۴-۱۰) در مدت زمان طولانی (بیش از ۱۰۰۰۰ ساعت کارکرد بهطور دائم)، برای مأموریتهای کاوش در اعماق فضا بسیار مناسباند. بههمین دلیل در هنگام

طراحی آنها پارامتر طول عمر تراستر نقش تعیین کنندهای دارد. مهمترین عاملی که تراستر را از ادامهٔ فعالیت بازمیدارد خوردگی شبکهٔ شتاب دهندهٔ یون آن است. این خوردگی به تدریج و در طول عمر فعالیت تراستر رخ می دهد. چون طول عمر تراسترهای یونی الکترواستاتیکی در شرایط کارکرد مداوم می تواند به دهها هزار ساعت برسد، تست آنها در شرایط آزمایشگاهی برای تخمین طول عمر بسیار هزینهبر است. در اینجا نیز همانند سایر شاخههای علمی، شبیه سازی عددی می تواند ابزاری ارزان و سریع برای بررسی عملکرد تراسترها در شرایط عملکردی مختلف باشد.

یونهای درون محفظهٔ پلاسما، توسط سیستم شتابدهنده و از طریق پوستهٔ پلاسما استخراج و شتاب داده می شوند. بدین ترتیب، پوستهٔ پلاسما مرزی است که در بالادست سیستم شتابدهنده قرار گرفته و جداکنندهٔ آن از محفظهٔ پلاسما می باشد. آنچه که در مدلهای عددی شبیه سازی عملکرد سیستم شبکهٔ تراسترهای یونی الکترواستاتیکی مشترک است، محدودکردن دامنهٔ حل به سیستم شتابدهنده و عدم شبیه سازی محفظهٔ پلاسمای بالادست آن است. در این شرایط، تخمین شکل و موقعیت پوستهٔ پلاسما به عنوان مرز بالادست دامنهٔ حل و اثرگذاری مستقیم آن بر پرتوی یون خروجی از تراستر، دارای اهمیت است.

طی سالیان متمادی، نرمافزارها و کدهای عددی متعددی جهت شبيهسازى عملكرد سيستم شتابدهندة تراستر يونى الكترواستاتيكي، توسط دانشگاهها و مراكز علمي توسعه يافته است. در این میان می توان به کدهای igx [۱]، OPT [۲] FFX [٣]، CEX [٣] و JIEDI [۵] اشاره کرد. همچنین از روشهای آماری نیز در طراحی تراستر [۷–۶] 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] یا اپتیک یون [۱۱] بهره گرفته شده است. پارامترهای متداول در اعتبارسنجی کدهای شبیهساز عملکرد سیستم شتابدهنده، تنها محدود به زاویهٔ 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]. اوکاوا و تاکگاهارا (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].

فارنل (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 به کارگیری رابطه پواسون - بولتزمن در الگوریتم PIC، اثر ولتاژ شبكة شتابدهنده را بر يوستة يلاسما بررسي كردهاند [١٧]. شاگایدا و همکاران (۲۰۱۶) اثر هم محور نبودن شبکههای سیستم شتابدهنده بر خوردگی شبکه را توسط کد سهبعدی IOS-3D و به کارگیری از معادلهٔ بولتزمن در تخمین چگالی الکترون ها مورد مطالعه قرار دادهاند [١٨]. در مطالعات فوق الذكر و ساير مطالعات عددی در حوزهٔ شبیهسازی سیستم شتابدهندهٔ تراستر یونی الكترواستاتيكي، حضور الكترونها در پلاسماي بالادست سيستم شتابدهنده و تأثير آنها بر تشكيل پوستهٔ پلاسما به دو صورت مدل شده است. در حالت اول که بیشتر از آن استفاده می شود، الکترون ها بهصورت سیال در نظر گرفته شدهاند و چگالی آنها بهعنوان خاصيت ماكروسكوپيك، با استفاده از رابطهٔ بولتزمن محاسبه می شود (روش پواسون - بولتزمن). در حالت دوم، الكترونها بهصورت ذرات باردار در نظر گرفته میشوند و حركت و رفتار آنها در داخل میدان همانند ذرات یون مورد بررسی قرار می گیرد. مطالعهٔ حاضر قصد دارد تا با شبیهسازی عددی سیستم شتابدهندهٔ تراستر یونی الکترواستاتیکی، بدون انجام محاسبات مربوط به اثر الكترونها، موقعيت و شكل پوستهٔ پلاسما را تخمين 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 پوستهٔ پلاسما از الگوریتم پیشنهادی در کد igx [۱] استفاده شده که در اینجا بهعنوان روش "اعمال مستقیم اثر الكترونها" از آن ياد شده است.

۲. الگوریتم محاسباتی

همان گونه که گفته شد، در مطالعهٔ حاضر از روش PIC برای حل میدان پتانسیل الکتریکی و شبیهسازی حرکت یونها درون

سيستم شتابدهنده استفاده شده است. ميدان پتانسيل الكتريكي ناشی از حضور شبکهٔ غربال^ (با ولتاژ مثبت)، شبکهٔ شتابدهنده ٔ (با ولتاژ منفى) و محفظة پلاسماى بالادست جريان است. اين روش از پنج گام اساسی تشکیل شده است:

- توزیع بار الکتریکی ناشی از حضور ذرات باردار درون سلول روی نقاط گرہ ھمان سلول
- ۲. حل معادلهٔ یواسون برای تمامی دامنهٔ حل و محاسبهٔ پتانسیل الکتریکی هر گره
- ۳. محاسبهٔ میدان الکتریکی در نقاط گره ناشی از گرادیان يتانسيل الكتريكي
- ۴. اعمال برایند نیرویهای ناشی از میدان الکتریکی گرمهای هر سلول روی ذرات درون آن
 - ۵. حرکت ذرات درون میدان حل و تکرار حلقه از مرحلهٔ اول

در محاسبهٔ توزیع بار از روش میانگین گیری وزنی استفاده شده است. بهطوری که 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 می شود.



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

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

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

که در آن ϕ ، ϕ و $arepsilon_{0}$ بهترتیب، پتانسیل الکتریکی، چگالی بار الكتريكي وثابت گذردهي الكتريكي خلا ميباشند. ميدان الكتريكي در هر گره برابر با منفی گرادیان پتانسیل الکتریکی آن است:

$$\vec{E} = -\nabla \phi$$
 (Y

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

SID.ir هستم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۸

(۳)

 $\vec{F} = \frac{q}{m}\vec{E}$ که در اینجا m و p بهترتیب جرم و بار الکتریکی ذره است. سپس سرعت و موقعیت هر ذره در هر گام زمانی با استفاده از معادلات حرکت، محاسبه شده و حلقهٔ شبیهسازی از گام اول تکرار می شود. در روشی که الکترون ها به صورت سیال در نظر گرفته می شوند، از رابطهٔ بولترمن برای تخمین چگالی الکترون ها در هر نقطه از میدان استفاده می شود:

$$n_e = n_0 e^{\left(\frac{\phi - \phi_0}{T_e}\right)} \tag{1}$$

که ϕ_0 ، n_0 و T_e بهترتیب چگالی و پتانسیل الکتریکی پلاسمای مرجع و دمای الکترون میباشند. به کارگیری رابطهٔ ۴ در محاسبة چگالي بار الكتريكي p در طرف راست معادلة پواسون، رابطهٔ پواسون - بولتزمن برای محاسبهٔ پتانسیل الکتریکی را نتیجه می دهد.

در مطالعهٔ حاضر از روش پیشنهادی توسط ناکایاما و ویلبور [1] برای تخمین شکل و موقعیت پوسته پلاسما 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 ساده کننده می توان موقعیت پوسته پلاسما را تخمین زد. این روش بر پایهٔ این فرض استوار است که در کل دامنهٔ حل، بیشترین مقدار پتانسیل میدان مربوط به پتانسیل پلاسمای محفظه پلاسما است. بدین ترتیب در طول حل، اگر مقدار پتانسیل گره بیشتر از مقدار پتانسیل پلاسمای محفظه پلاسما بهدست آمد، پتانسیل آن برابر پتانسیل پلاسمای محفظه در نظر گرفته می شود. شماتیک این روش در شکل ۲ مشاهده می شود.

در شکل ۲ برای یک موقعیت شعاعی مشخص، مقدار پتانسیل الکتریکی (φ) برای موقعیتهای طولی (z) مختلف رسم شده است. فرض شده پتانسیل اولین نقطهٔ سمت چپ که دورترین فاصله را از شبکه غربال دارد (یا همان مرز بالادست)، همواره برابر با پتانسیل محفظة پلاسما باقی بماند و پتانسیل سایر نقاط از حل معادلهٔ لاپلاس همانند شکل ۲ الف بهدست آید. پس از تزریق يونها از صفحهٔ سمت چپ (پلاسما)، پتانسيل نقاط بهدست آمده از معادلهٔ پواسون، بالاتر از ϕ_p میرود (شکل ۲ ب). اگر پتانسیل محاسبه شده بالاتر از پتانسیل پلاسما باشد، (شکل ۲ ج) این گونه در نظر گرفته می شود که در عمل این پتانسیل های بالاتر، الکترونها (بارهای منفی) را برای حفظ تعادل از پلاسمای مجاور

Archive of SID

پواسون در داخل حلقهٔ PIC صورت می گیرد. پس از عبور جریان یون از شبکهٔ غربال، شکل و موقعیت پوستهٔ تغییری نخواهد کرد و اصطلاحاً حل برای محاسبهٔ پوستهٔ همگراشده است. برای شکل گیری پرتو یون و محاسبهٔ جریان پرتو نیاز است تا جریان یون از پایین دست دامنه حل خارج شده و مقدار جریان پرتو یون ثابت شود. بیرون میکشند. این کار موجب افت پتانسیل تا ϕ_p میشود (شکل ۲ د). پاییندستترین نقطه ای از شبکه که دارای پتانسیل ϕ_p است، بهعنوان نقطهٔ داخلی پلاسما در نظر گرفته میشود و مرزی که این نقاط را به هم متصل میکند، پوستهٔ پلاسما را تشکیل میدهد. بهروزرسانی موقعیت پوسته پس از حل معادله



شكل ۲. شماتيك مراحل محاسبهٔ پوستهٔ پلاسما؛ الف) پتانسيل اوليه، ب) تزريق يون، ج) پتانسيل محاسبه شده، د) تنظيم پتانسيل [۱]

۳. مدلسازی عددی

بهمنظور اعتبارسنجی، نتایج حل عددی با نتایج تجربی اشتون و ویلبور [۱۴] مقایسه میشود. آنها در مطالعهٔ تجربی خود با قرار دادن یک ردیف پراب لانگمویر^{۱۰} در راستای قطر یک حفرهٔ تراتسر یونی، مشخصات پلاسمای بالادست شبکهٔ غربال را تا عمقی معادل قطر حفرهٔ شبکهٔ غربال درون محفظهٔ پلاسما اندازهگیری کردند. نحوهٔ چینش پرابها و موقعیت آنها درون

تراستر در شکل ۳ دیده می شود. 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 می شود. نتیجهٔ آزمایش برای تعیین شکل پوستهٔ پلاسما و موقعیت آن نسبت به شبکهٔ غربال در شرایط عملکردی ذکر شده در جدول ۱ برای حفرهٔ مرکزی تراستر یونی مورد آزمایش، مطابق شکل ۴ می با شد.



شکل ۳. نمای شماتیک الف) محدودهٔ اندازه گیری پوسته پلاسما، ب) چیدمان پرابهای لانگمویر درون تراستر [۱۴]

مقدار	پارامتر
١١٠٠V	(V_T) ولتاژ شتابدهی کل
۴۵V	$\left(V_{D} ight)$ ولتاژ تخليه
•/\٨	(t_s/d_s) نسبت ضخامت شبکهٔ غربال
• /84	(d_a/d_s) نسبت قطر شبکهٔ شتابدهنده
• /٣٧	(t_a/d_s) نسبت ضخامت شبکهٔ شتابدهنده
•/۵•	نسبت فاصلهٔ شبکهٔ غربال و شتابدهنده (l_g/d_s

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





شكل ۵. موقعيت دامنه حل نسبت به تراستر يونى الكترواستاتيكي

مقدار پتانسیل در مرز بالادست و شبکههای غربال و شتابدهندهٔ ثابت بوده و بهترتیب برابر پتانسیل پلاسمای محفظهٔ پلاسما، ولتاژ شبکهٔ غربال و ولتاژ شبکهٔ شتابدهنده میباشد. تغییرات پتانسیل در راستای شعاعی برای مرز دامنه با حفرهٔ مجاور (خطوط افقی بالا) و محور تقارن دامنهٔ حل، برابر صفر در نظر گرفته شدهاند. شبکهبندی استفادهشده فواصل طولی و عرضی یکسان دارد. گام شبکه از مرتبهٔ طول دبای^{۱۲} برابر ۲۰/۰ میلی متر میباشد. در حل معادله پواسون از روش PSOR^{۳۱} و مجزاسازی مرکزی مرتبهٔ دوم بهره گرفته شده است. میدان الکتریکی نیز از طریق مشتق گیری از مقادیر پتانسیل الکتریکی در نقاط گره با روش مجزاسازی مرکزی مرتبهٔ دوم محاسبه شده است.

٤. بحث و بررسی نتایج

مسئله برای تراستری با شرایط عملکردی ذکرشده در جدول ۱ حل شد. مقایسهٔ توزیع پتانسیل الکتریکی در دامنهٔ حل برای قبل



شکل ۴. شکل و موقعیت قرار گیری پوستهٔ پلاسما برای نمونه آزمایش شده

بهمنظور مدلسازی عددی سیستم شتابدهندهٔ تراستر یونی الکترواستاتیکی از کدنویسی شیگرا^{۱۱} به زبان ++ بهره گرفته شده است. دامنهٔ حل بهصورت متقارن محور در نظر گرفته شده بهگونهای که توزیع پتانسیل و حرکت یونها تنها برای نیمی از مفرهٔ مرکزی حل و شبیهسازی میشود. موقعیت دامنهٔ حل روی شماتیک تراستر یونی الکترواستاتیکی در شکل ۵ مشخص شده است. همچنین پارامترهای هندسی و شرایط مرزی دامنهٔ 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. دامنهٔ حل استفاده شده در مدلسازی پوستهٔ پلاسما

Archive of SID

نتایج آزمایشهای اشتون و ویلبور [۱۴] پیشتر در شبیهسازیهای عددی ژونگ و همکاران [۱۷] و اوکاوا و تاکگاهارا [1۵] بهمنظور صحه گذاری نتایج استفاده شده است. نتایج پوستهٔ پلاسمای تخمین زده شده توسط این مطالعات و مطالعهٔ حاضر در شکل ۹ با نتایج تجربی مقایسه شده است. همان گونه که از شکل ۹ مشاهده می شود، دقت بالای روش اعمال مستقیم اثر الكترونها در تخمين شكل و موقعيت پوسته پلاسما در مقايسه با دو شبیهسازی دیگر بهخوبی مشهود است. چون در مطالعهٔ حاضر تنها تأكيد بر تخمين شكل و موقعيت نهايي پوستهٔ پلاسما مى باشد؛ اطلاع از نحوة شكل گيرى يوستة يلاسما از اهميت چندانی برخوردار نیست. بههمین دلیل، روش انتخاب شده در اینجا با وجود دقت بالا در تخمين شكل و موقعيت پوستهٔ پلاسما، اطلاعاتی در زمینهٔ خصوصیت میدان در بالادست پوستهٔ پلاسما ارائه نمىدهد. روش اعمال مستقيم اثر الكترونها بر اين فرض استوار است که هرجا 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 يوستة يلاسما شاهد تمركز حضور و تراكم الكترونها باشیم. بررسی صحت این فرض با استفاده از شبیهسازی توزیع ذرات الکترون، امکان پذیر است. در شکل ۱۰، موقعیت الکترون ها در بالادست شبکهٔ غربال نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است حضور الكترونها تنها محدود به نواحى بالادست پوسته بوده و در نزدیکی حفرهٔ شبکهٔ غربال اثری از حضور الکترونها نیست. بر این اساس میتوان فرض استفاده شده در تخمين يوستة يلاسما را از لحاظ تطابق با فيزيك مسئله، فرضي صحيح دانست.

یکی از جنبههای مورد بحث دربارهٔ 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 رابطهٔ نیروی لورنتس یکسان بوده، اما بهدلیل نسبت جرم یون به الکترون از مرتبهٔ ^۵۰۱، 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 به گونهای انتخاب شود که ماکزیمم فاصلهٔ طیشده توسط هر ذره در هر گام زمانی کمتر از گام شبکه باشد. لذا چون

و بعد از اعمال آثار حضور یونها در شکل ۷ مشاهده میشود. در این شکل پوستهٔ پلاسمای تشکیل شده در بالادست شبکهٔ غربال، پس از اعمال آثار یونها بهخوبی مشهود است. بهمنظور مقایسهٔ بهتر، پوستهٔ پلاسما برای هر دو حالت تجربی و عددی در شکل ۸ رسم شده است. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، روش اعمال مستقيم اثر الكترونها توانسته توافق بالايي را با نتايج تجربی حاصل کند. در نواحی نزدیک به دیوارهٔ شبکهٔ غربال و مجاور با حفرهٔ کناری مقداری تفاوت در بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. علت این تفاوت را میتوان ناشی از این موضوع دانست كه در اين ناحيه الكترونها با بار منفى بهسمت شبكة غربال با ولتاژ مثبت جذب شده و تجمع الكترونها در این ناحیه زیادتر از سایر نواحی است؛ حال آنکه در مطالعهٔ عددی آثار حضور الكترونها در تمامي نواحي بالادست شبكة غربال بهطور يكنواخت فرض شده است. همچنین با حرکت از حفرهٔ مرکزی تراستر بهسمت حفرههای نزدیک دیوارهها، بهتدریج از تقارن پوسته پلاسما نسبت به محور حفره کاسته می شود؛ که در مدل عددی مرز دامنه با حفره مجاور بهصورت متقارن در نظر گرفته شده است.



ميلاد يدالهى، سيد آرش سيد شمس طالقانى، وحيد اصفهانيار

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 مرتبهٔ ^۱۰۴ میشود.

در روش پواسون – بولتزمن، رابطهٔ بولتزمن چگالی الکترون در هر نقطه از میدان را با توجه به پتانسیل الکتریکی همان نقطه و

خواص پلاسمای مرجع محاسبه می کند. قرار دادن معادلهٔ ۴ در طرف راست معادلهٔ پواسون موجب غیرخطی شدن این معادله می شود. در نتیجه حل معادلهٔ 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. مقايسهٔ الف) نتايج تجربي [۱۴] با نتايج عددي ب) ژونگ و همکاران [۱۷]، ج) او کاوا و تاکگاهارا [۱۵] و د) مطالعهٔ حاضر

نتایج شبیهسازی جریان پرتو با استفاده از دو روش محاسبهٔ چگالی الکترونها توسط معادلهٔ بولتزمن و روش اعمال مستقیم اثر الکترونها نشان میدهد که در ابتدای شبیهسازی و تا قبل از تشکیل پرتوی یون یا ثابتشدن جریان پرتوی یون، تعداد تکرار حلقهٔ حل گر معادلهٔ پواسون برای روش پواسون – بولتزمن در حدود نصف تکرارهای روش اعمال مستقیم اثر الکترونها میباشد. اما پس از تشکیل پرتو، شرایط برعکس شده و حل گر 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 بهدلیل نادیدهگرفتن چگالی الکترونها و کمنشدن بار الکتریکی الکترونها از یونها (در محاسبهٔ چگالی بار الکتریکی ρ در طرف راست معادلهٔ پواسون)، طرف راست معادلهٔ 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، حلقهٔ حل گر پواسون باید تعداد تکرار بیشتری برای انتشار اثر حضور یونهای بالادست میدان و اعمال این آثار بر پتانسیل الکتریکی پاییندست میدان انجام دهد. اما پس از تشکیل پرتو، توزیع یون در دامنهٔ حل تغییر چندانی نداشته و خطی بودن معادلهٔ پواسون سبب برتری روش اعمال مستقیم اثر الکترونها بر روش پواسون

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 پوستهٔ پلاسما محاسبه شده با استفاده از دو روش اعمال مستقیم اثر الکترونها و روش تخمین چگالی الکترونها توسط معادلهٔ بولتزمن در شکل روش تخمین چگالی الکترونها توسط معادلهٔ بولتزمن در شکل ۱۱ با نتایج تجربی مقایسه شده است. این نتایج برای تراستری با مشخصات ذکرشده 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، فاصلهٔ موقعیت پوسته روش پواسون – بولتزمن از پوستهٔ تجربی بهتدریج 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 پلاسما، 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 بهدرستی تخمین زده نشده، کم خواهد بود. اما اختلاف درشکل منحنی پوسته برای موقعیت شعاعی بالاتر

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، نشاندهندهٔ راستای میدان در آن ناحیه و در نتیجه راستای اعمال نیرو به یونهای استخراج شده از آن موقعیت میباشد (با توجه به معادلهٔ ۲). در موقعیتهای شعاعی بالاتر از ۲۵ میباشد (با توجه به معادلهٔ ۲). در موقعیتهای شعاعی بالاتر از ۲۵ یواسون – بولتزمن به گونهای است که یونهای استخراج شده از این ناحیه نسبت به حالت تست، بیشتر به سمت مرکز حفره و

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. نتیجه گیری دقیقتر در خصوص این موضوع از طریق محاسبه زاویه واگرایی پرتو برای هر دو مدل عددی امکان پذیر است.



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



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

زاویهٔ واگرایی پرتوی یون پس از ثابت شدن جریان خروجی از سیستم شتابدهنده قابل محاسبه است. زاویهٔ 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



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

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 تاکگاهارا [۱۵] انجام شده است. تنها پارامتری که آثار آن بررسی نشده، پارامتر بیبعد نسبت ولتاژ خالص به ولتاژ شتابدهی کل $R = V_n/V_T$ و ۲/۹ در شکل و موقعیت پوسته برای سه مقدار مختلف ۲/۵، ۲/۷ و ۲/۹ در شکل

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 پلاسمای محفظه) ثابت نگهداشته شده است. بههمین دلیل گرادیان پتانسیل الکتریکی و در نتیجه با توجه به معادلهٔ ۲، میدان الکتریکی برای هر سه حالت یکسان خواهد بود. تحت این شرایط، خطوط همپتانسیل نیز تغییر نخواهد کرد و متعاقبا شکل و موقعیت پوسته ثابت باقی می ماند.

٥. نتيجەگىرى

در مطالعهٔ حاضر با هدف تعیین مشخصات پوسته پلاسما بهعنوان مرز استخراج یون در فرایند شبیهسازی عملکرد سیستم شتابدهنده تراستر یونی الکترواستاتیکی، کد محاسباتی تدوین شد. این کد که بر پایهٔ برنامهنویسی شیگرا و در زبان ++C شد. این کد که بر پایهٔ برنامهنویسی شیگرا و در زبان ++C درکت 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 پوستهٔ پلاسما داشته، با این وجود اندکی اختلاف در نواحی نزدیک به دیوارهٔ شبکهٔ غربال و مرز حفره مجاور دیده شد
- ۲. مقایسهٔ 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
- ۳. عدم تطابق شکل پوسته پلاسمای روش پواسون بولتزمن بر نتایج تجربی منجر به افزایش زاویهٔ واگرایی پرتو تخمین زده شده توسط این روش میشود. بهطوریکه زاویهٔ واگرایی پرتو محاسبهشده در این

٦. مأخذ

- [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

روش، ۳/۲ درجه بیشتر از روش اعمال مستقیم اثر الکترون بهدست آمد

۴. پوستهٔ پلاسما برای سه مقدار نسبت ولتاژ خالص به شتابدهی کل ۰/۵، ۷/۰ و ۰/۹ تخمین زده شد. براساس نتایج بهدست آمده، مقدار این پارامتر بیبعد تأثیری بر شکل و موقعیت پوسته پلاسما ندارد

بدین ترتیب، با توجه به بررسیهای صورت گرفته می توان در ادامه فرایند شبیه سازی عملکرد سیستم شتاب دهندهٔ تراستر یونی الکترواستاتیکی و تخمین طول عمر تراستر، با اطمینان بالایی از نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر و روش اعمال مستقیم اثر الکترون ها استفاده کرد.

فهرست علائم واختصارات

-	مشحصة شبكة شتابدهنده	а
m	قطر	d
$V.m^{-1}$	ميدان الكتريكي	Ε
Ν	نیروی وارد بر ذره	F
m	فاصله شبکه شتابدهنده از شبکه غربال	l_g
kg	جرم ذره	т
C.m ⁻³	چگالی پلاسمای مرجع	n_0
С	بار ذره	q
m	عرض دامنه حل	R
m	شعاع حفره شبكه	r
-	مشخصه شبكه غربال	S
Κ	دماى الكترون	T_e
m	ضخامت شبكه	t
V	ولتاژ تخليه	V_D
V	ولتاژ شتابدهی کل	V_T
V	ولتاژ خالص سيستم شبكه	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	يتانسيل الكتريكي محفظه يلاسما	ϕ_p
V	پتانسیل الکتریک <i>ی</i> مرجع	ϕ_0

 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. missions, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 40, No. 4, pp. 1053-1063, 2012.

- [4] R. E. Wirz, J. R. Anderson, I. Katz, Timedependent 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

- 6. flux-tube
- 7. perveance
- 8. screen grid
- 9. accelerator grid
- 10. langmuir probe

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 30,000hour 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, Threedimensional 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.

پىنوشت

- 13. point successive over-relaxation method
- 14. cross-over

^{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

^{11.} object oriented

^{12.} debye length