بررسی حرکت الکترون در رانشگر اثر هال

مصطفی سلحشور*

* عضو هیأت علمی دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، salahshoor@iust.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، حرکت الکترون در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی رانشگر اثر هال به روش شبیه‌سازی بررسی شده است. ابتدا، توزیع میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمالی به آند و همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی ناشی از آهنرباهای الکتریکی و اجزای فرومغناطیسی رانشگر محاسبه شده است. پس از آن، حرکت الکترون در میدان‌های الکترومغناطیسی رانشگر ردیابی گردیده است تا قابلیت آن در محبوس‌سازی الکترون‌ها بررسی شود. نشان داده شده است که به دلیل حرکت سوقی در یک حلقه بسته، الکترون‌ها در ناحیه خروجی کانال شتابدهی رانشگر محبوس می‌شوند.

واژه های کلیدی: *رانشگر الکتریکی، هال، میدان مغناطیسی، پلاسما، شبیه‌سازی.*

۱- مقدمه

پیشرانش الکتریکی یک فناوری مهم در ماهواره‌های تجاری و علمی به شمار می‌رود [۱]-[۲]. کاربردهای اصلی رانشگرهای الکتریکی برای مقاصد پیشرانشی در مدار (on-orbit) و در مدارهای GEO و LEO و همچنین در مأموریت‌های بین‌سیاره‌ای و مأموریت‌های مشاهدات زمینی و علمی عبارتند از: تثبیت موقعیت، انتقال مدار، خنثی‌سازی اصطکاک و کنترل وضعیت ماهواره و مدار.

در پیشرانش الکتریکی از انرژی الکتریکی برای شتابدهی سوخت استفاده می‌شود و می‌توان هر میزان دلخواهی از انرژی را به یک جرم مفروضی از سوخت تزریق کرد. بنابراین سرعت خروج و لذا ضربه ویژه بالایی (از ۵۰۰ تا ۸۰۰۰ ثانیه) بدست می‌آید. از طرفی چون جرم سوخت خروجی کم است میزان پیشرانش کوچکی (از چند ده میلی‌نیوتن تا چند نیوتن) حاصل می‌شود . به همین علت رانشگرهای الکتریکی دارای نسبت پیشرانش به جرم (شتاب) کمی هستند. رانشگرهای الکتریکی نسبت به رانشگرهای شیمیایی مقدار ضربه کل (حاصلضرب ضربه ویژه در جرم سوخت) بزرگتری دارند. بنابراین، برخلاف رانشگرهای شیمیایی که در زمان کوتاهی (کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه) سوخت خود را مصرف می‌کنند؛ رانشگرهای الکتریکی تا ساعت‌ها و حتی بیش از یک سال (تا ۱۰۰۰۰ ساعت) به عملیات خود ادامه می‌دهند. علاوه بر این، قابلیت انعطاف و دقت کنترل در رانشگرهای الکتریکی نسبت به رانشگرهای شیمیایی به مراتب بالاتر است [۳].

در میان رانشگرهای الکتریکی، رانشگر اثر هال (Hall Effect Thruster - HET) تاریخچه پرواز موفق و جایگاه ویژه‌ای دارد [۱]-[۵]. رانشگر هال برای نخستین بار توسط روسیه در سال ۱۹۷۱ در فضا استفاده شد و تا کنون از صدها رانشگر هال در پرتاب ماهواره‌ها استفاده شده است. در رانشگر هال، سوخت گازی پس از تزریق به درون یک کانال، توسط الکترون‌های پرانرژی یونیزه می‌شود. پس از آن یون‌ها بواسطه میدان الکتریکی محوری درون کانال شتاب می‌گیرند و با سرعت زیاد به سمت بیرون کانال پرتاب می‌شوند. انتقال تکانه ناشی از خروج یون‌های پرسرعت، موجب پیشرانش کوچک از مرتبه چند ده میلی‌نیوتن تا چند نیوتن می‌شود.

کانال شتابدهی در رانشگر هال یک محفظه پلاسمای حلقوی است [۴]-[۶]. در انتهای بسته کانال، آند قرار دارد و انتهای دیگر کانال باز است تا یون‌های شتاب‌گرفته از کانال خارج شوند. الکترون‌های یونیزه‌کننده توسط یک کاتد در بیرون کانال تولید می‌شوند و تحت تأثیر ولتاژ اعمالی به آند (معمولاً چند صد ولت)، به درون کانال نفوذ می‌کنند. این الکترون‌ها در هنگام ورود به کانال توسط یک میدان مغناطیسی (از مرتبه چند صد گاؤس) به دام می‌افتند تا در اثر افزایش مسیر پیمایش، احتمال برخورد آنها با اتم-های گاز و درنتیجه درصد یونیزاسیون سوخت افزایش یابد. میدان مغناطیسی توسط آهنرباهای الکتریکی ایجاد می‌گردد و به کمک یک مدار مغناطیسی به ناحیه انتهای باز کانال هدایت می‌شود. در این ناحیه، راستای خطوط میدان مغناطیسی تقریبا شعاعی است. در واقع میدان الکتریکی بزرگ محوری که موجب شتاب گرفتن یون‌ها می‌شود ناشی از اختلاف پتانسیل بین آند در انتهای بسته کانال و ابر الکترونی محبوس‌شده در ناحیه انتهای باز کانال است.

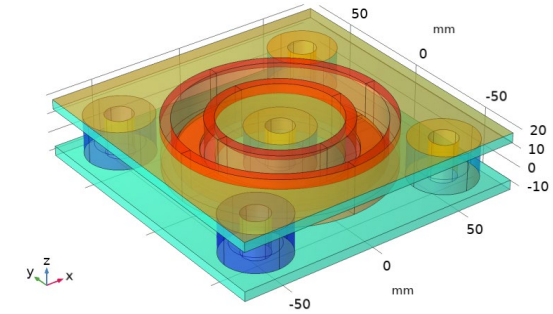
بنابراین، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های رانشگر هال، حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی متعامد درون کانال است که باعث حرکت سوقی الکترون در جهت سمتی و در یک مسیر بسته درون کانال می‌شود که جریان هال نام دارد. از این رو، نحوه حرکت الکترون‌ها در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی درون کانال رانشگر هال، نقش مهمی در یونیزاسیون سوخت و و شتابدهی آن دارد. در واقع در طراحی و ساخت رانشگر هال سعی می‌شود توزیع میدان‌ها به گونه‌ای باشد که زمان محبوس‌سازی الکترون‌ها تا حد امکان افزایش یابد.

در این تحقیق، به منظور بررسی رفتار الکترون‌ها در یک رانشگر هال ابتدا توزیع میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمالی به آند و همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی ناشی از آهنرباهای الکتریکی و اجزای فرومغناطیسی رانشگر محاسبه شده است. پس از آن، مسیر حرکت الکترون‌ها در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ردیابی شده است تا قدرت رانشگر هال در محبوس-سازی الکترون‌ها ارزیابی گردد. این مقاله در پنج بخش تنظیم شده است. پس از مقدمه، در بخش۲ مشخصات مدل شبیه‌سازی معرفی شده است. در بخش۳ نتایج شبیه‌سازی پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی شرح داده شده است. در بخش۴ نتایج شبیه‌سازی حرکت الکترون‌ها در میدان‌های رانشگر هال بیان شده است. در بخش پایانی جمع-بندی ارائه شده است.

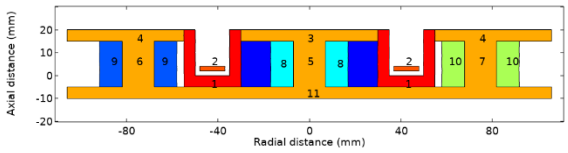
۲- مدل

در شکل۱ نمای سه‌بعدی مدل هندسی شبیه‌سازی به همراه نمای دوبعدی آن در مقطع عرضی نشان داده شده است. در شکل۱-(ب)، قطعه۱ کانال حلقوی است که از جنس دی‌الکتریک می‌باشد. قطر داخلی، قطر خارجی و

طول کانال به ترتیب ۷۰ ، ۱۰۰ و ۲۵ میلیمتر است. قطعه۲ که در انتهای بسته کانال قرار دارد آند از جنس فلز است و عرض و ضخامت آن به ترتیب ۱۵ و ۲ میلیمتر است. همچنین در شکل۱-(ب)، مدار مغناطیسی آهنی شامل قطب‌های داخلی و خارجی (قطعات۳ و ۴)، هسته آهنربای الکتریکی مرکزی (قطعه۵) و هسته‌های آهنرباهای الکتریکی بیرونی (قطعات۶ و ۷) است که از زیر توسط یک جوشن آهنی (قطعه۱۱) بسته می‌شود. قطعات ۸ تا ۱۰ نشان‌دهنده کویل‌های مربوط به آهنرباهای الکتریکی هستند.



(الف)



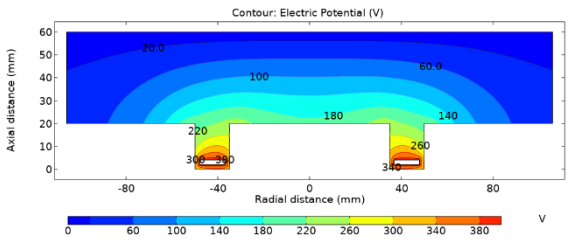
(ب)

شکل۱- مدل هندسی شبیه‌سازی چشمه یون: (الف) نمای سه‌بعدی و (ب) نمای دوبعدی در مقطع عرضی.

برای شبیه‌سازی رانشگر هال از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است [۷]. محاسبه توزیع میدان‌ها به روش تحلیل ایستا و شبیه‌سازی حرکت الکترون به روش تحلیل وابسته به زمان انجام شده است. ولتاژ اعمالی به آند ۴۰۰ ولت در نظر گرفته شده است. تعداد دور سیم همه کویل‌ها ۵۰۰ و جریان گذرنده از کویل مرکزی و کویل‌های جانبی به ترتیب ۰.۳ و ۰.۱ آمپر است.

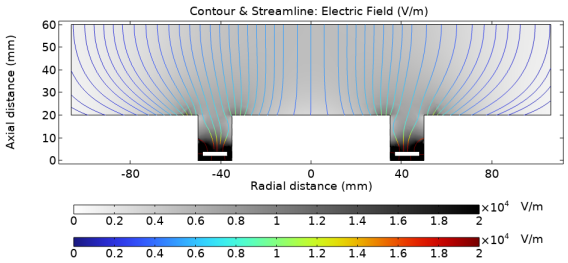
۳- توزیع میدان‌ها

در شکل۲ توزیع پتانسیل الکتریکی در مقطع عرضی درون کانال و فضای بالای رانشگر نشان داده شده است. مطابق شکل۲، بیشترین تغییرات پتانسیل الکتریکی در مجاورت آند مشاهده می‌شود و با فاصله گرفتن از آند غیریکنواختی توزیع پتانسیل الکتریکی درون کانال به تدریج کاهش می‌یابد و نهایتا در فضای بالای رانشگر اندازه پتانسیل الکتریکی صفر می‌شود.



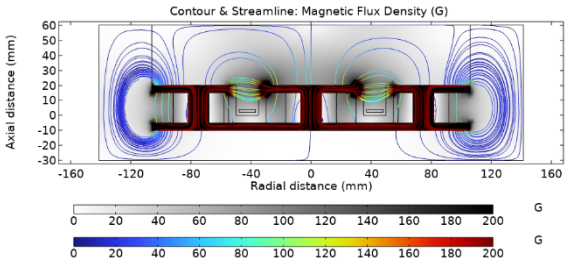
شکل۲- توزیع پتانسیل الکتریکی بر حسب ولت در مقطع عرضی درون کانال و فضای بالای رانشگر.

در شکل۳ توزیع میدان الکتریکی و خطوط میدان در مقطع عرضی درون کانال و فضای بالای رانشگر نشان داده شده است. مطابق شکل۳، راستای خطوط میدان الکتریکی در مجاورت آند و سطح مرزی فضای بالای رانشگر عمود بر سطوح مربوطه است. همچنین، اندازه میدان الکتریکی در اطراف آند درون کانال چندین برابر اندازه آن در سایر نواحی است.

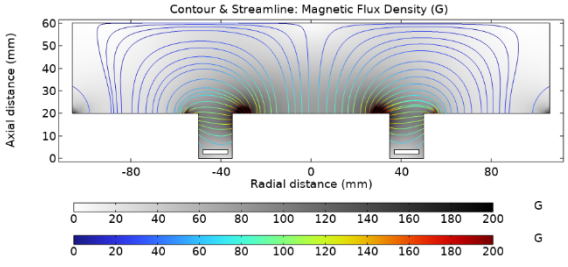


شکل۳- توزیع میدان الکتریکی و خطوط میدان بر حسب ولت بر متر در مقطع عرضی درون کانال و فضای بالای رانشگر.

در شکل۴ توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار در مقطع عرضی، در کل مدل و درون کانال و فضای بالای رانشگر نشان داده شده است. مطابق شکل۴-(الف)، خطوط شار مغناطیسی در کل مدل، مسیرهای بسته‌ای را تشکیل می‌دهند که با عبور از آهنرباهای الکتریکی، جوشن آهنی و قطبهای داخلی و خارجی، به سمت ناحیه انتهای باز کانال هدایت می‌شوند. همچنین، بخشی از خطوط شار در فضای اطراف رانشگر نشت می‌یابد. مطابق شکل۴-(ب) توزیع خطوط شار مغناطیسی در ناحیه انتهای باز کانال به صورت شعاعی است و با فاصله گرفتن از این ناحیه، مؤلفه محوری میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. اندازه میدان مغناطیسی در ناحیه انتهای باز کانال، در نزدیکی لبه های قطب‌های داخلی و خارجی بیشتر از اندازه آن در سایر نواحی درون کانال است. با فاصله گرفتن از این ناحیه به سمت سطح مرزی فضای بالای رانشگر، تراکم خطوط شار کاهش می‌یابد.



(الف)



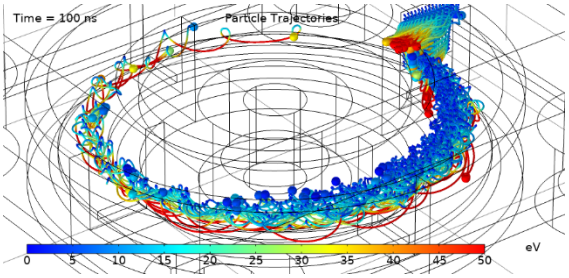
(ب)

شکل۴- توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار بر حسب گاوس (الف) در کل مدل و (ب) در مقطع عرضی درون کانال و فضای بالای رانشگر.

با مقایسه شکل‌های ۳ و ۴-(ب) مشاهده می‌شود که در ناحیه انتهای باز کانال و فضای نزدیک آن، راستای خطوط شار مغناطیسی تقریباً عمود بر راستای خطوط میدان الکتریکی است. با دور شدن از این ناحیه، ضمن کاهش اندازه میدان‌ها، زاویه بین راستای خطوط میدان‌ها کاهش می‌یابد. خطوط میدان‌ها در ناحیه مرکزی فضای بالای رانشگر تقریباً هم‌راستا هستند.

٤- حرکت الکترون

برای بررسی حرکت الکترون در میدان‌های رانشگر هال، تعداد ۲۶۶ الکترون با انرژی اولیه ۱ الکترون‌ولت در نظر گرفته شده است. مکان گسیل اولیه الکترون‌ها درون ناحیه انتهای باز کانال به صورت یک آرایه دوبعدی ۱۹ در ۱۴ درون یک سطح تخت موازی با صفحه XZ تعریف شده است. در شکل۵ مسیر حرکت الکترون‌ها در این ناحیه، طی زمان ۱۰۰ نانوثانیه نشان داده شده است. در شکل۵ نوار رنگی نشان‌دهنده مقیاس انرژی الکترون‌ها بر حسب الکترون‌ولت است.



شکل۵- مسیر حرکت الکترون درون کانال.

مطابق شکل۵، الکترون‌هایی که از نقاط مختلف گسیل می‌شوند به دلیل توزیع غیریکنواخت میدان‌ها، مسیرهای متفاوتی را درون کانال طی می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود تعداد قابل‌توجهی از الکترون‌ها حرکت سوقی سمتی در راستای عمود بر میدان‌ها را تجربه می‌کنند. با این حال، مسافت طی شده توسط آنها در مسیر حلقه بسته درون کانال متفاوت است. لازم است ذکر گردد که همه الکترون‌های اولیه در پایان زمان شبیه‌سازی درون کانال باقی نمی‌مانند. چون قبل از اتمام زمان شبیه‌سازی به سطوح مرزی رسیده و از کانال خارج می‌شوند.

٥- بحث و نتیجه‌گیری

در گام نخست این تحقیق، توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در یک رانشگر اثر هال محاسبه گردید. نشان داده شد که خطوط میدان الکتریکی درون کانال و در ناحیه انتهای باز کانال تقریبا در راستای محور کانال است و اندازه میدان الکتریکی با فاصله گرفتن از آند کاهش می‌یابد. علاوه بر این نشان داده شد که راستای میدان مغناطیسی در ناحیه انتهای باز کانال تقریباً شعاعی است و با دور شدن از این ناحیه، میدان مغناطیسی دارای مؤلفه محوری می‌شود.

در گام دوم این تحقیق، با ردیابی مسیر حرکت الکترون‌ها نشان داده شد که به دلیل حضور میدان الکتریکی محوری و میدان مغناطیسی شعاعی در ناحیه انتهای باز کانال رانشگر هال، الکترون‌ها یک حرکتی سوقی را در راستای سمتی و عمود بر میدان‌ها تجربه می‌کنند. بنابراین الکترون‌ها با حرکت در یک مسیر بسته درون کانال محبوس می‌شوند. اگر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی همراستا باشند حاصل‌ضرب برداری میدان‌ها و درنتیجه سرعت سوقی صفر است. در این صورت احتمال خروج الکترون‌ها از کانال افزایش می‌یابد. هر چه زاویه بین میدان‌ها بیشتر باشد اندازه سرعت سوقی نیز بیشتر خواهد بود. از این رو، به دلیل غیریکنواختی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در رانشگر هال، الکترون‌ها سرعت‌های سوقی مختلفی دارند و درنتیجه زمان محبوس‌سازی الکترون‌ها و مسافت طی شده توسط آنها متفاوت خواهد بود.

۶- مراجع

[1] D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters.* Wiley & Sons, 2008.

[2] I. Levchenko, S. Xu, S. Mazouffre, D. Lev, D. Pedrini, D. Goebel, L. Garrigues, F. Taccogna, and K. Bazaka , “Perspectives, frontiers, and new horizons for plasma-based space electric propulsion”, *Physics of Plasmas,* vol. 27, no. 2, pp. 020601, 2020.

[۳] م. سلحشور، ج. نوری و ب. شکری،« شبیه‌سازی پیشراننده پلاسمایی ثابت SPT-100»، در *مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران IAS2009*، اصفهان، ۱۳۸۷، ص ۱۷۴.

[4] Benjamin Jorns, Ioannis Mikellides, Stéphane Mazouffre, and Hiroyuki Koizumi , “Physics of electric propulsion”, *Journal of Applied Physics,* vol. 132, no. 11, pp. 110401, 2022.

[5] I. D. Kaganovich et al., “Physics of E × B discharges relevant to plasma propulsion and similar technologies,” *Physics of Plasmas*, vol. 27, no. 12, pp. 120601, 2020.

[6] Jean-Pierre Boeuf, “Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters”, Journal of Applied Physics 121, 011101 (2017)

[7] COMSOL Multiphysics, AC-DC and Particle Tracing Modules Application Library Manual, Version 6.0, 2022.