

طراحی یک نمونه رانشگر الکتریکی اثر هال با استفاده از روش مقیاس بندی

سمیرا میرمظهری انور^{۱*}، مرتضی فرهید^۲، محمد مهدی شفیعی^۳

۱- استادیار، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران smazhari@tabrizu.ac.ir

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

۳- رییس بخش الکترومغناطیس، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران m.shafi@isrc.ac.ir

*نویسنده مخاطب

چکیده

رانشگر اثر هال یکی از انواع رانشگرهای الکتریکی است که با توجه به ضربه ویژه بالا امروزه به عنوان یکی از گزینه‌های اصلی در ماموریت‌های مداری از جمله ماموریت‌های انتقال مداری استفاده می‌شود. اولین گام برای بهره‌برداری از این رانشگرها، طراحی موثر آن رانشگر می‌باشد. روش مقیاس بندی یکی از ابزارهای مهم و کاربردی برای طراحی اولیه محسوب می‌شود که از آن برای پیش بینی عملکرد این رانشگر استفاده می‌شود. در این مقاله ما به طراحی یک نمونه رانشگر الکتریکی اثر هال با استفاده از روش مقیاس بندی می‌پردازیم. در این مقاله از رانشگر اثر هال از نوع SPT100 به عنوان رانشگر مرجع برای مقیاس بندی استفاده شده است. در این روش با در دست داشتن پارامترهای عملکردی از جمله نیروی تراست، ضربه ویژه، ولتاژ تخلیه و همچنین ابعاد فضایی که ماهواره قادر است برای این رانشگر اختصاص دهد، به طراحی این رانشگر پرداخته و سه پارامتر هندسی از جمله میانگین قطر دهانه، طول کانال و پهنای کانال به همراه توان مصرفی و دبی جرمی پیشران مورد نیاز محاسبه می‌شوند. نتایج حاصل از این طراحی گواه آن است که روش مقیاس بندی یک روش معتبر و قابل اعتماد جهت طراحی اولیه رانشگرهای الکتریکی از جمله رانشگر اثر هال می‌باشد.

واژه های کلیدی: رانشگرهای الکتریکی - رانشگر اثر هال - روش مقیاس بندی - فناوری فضایی

فهرست اصطلاحات

b =	پهنای کانال	n =	چگالی ذرات گاز در صفحه تزریق
$M_x = \left(\frac{x}{x_e, kr} \right)$	جرم مولکولی	P =	توان پیشران

d, d_{ext}, d_{int} =	قطر میانگین، قطر خارجی و قطر داخلی کانال	T =	دما
e =	بار الکترون	ϵ_w =	کسری از توان تلف شده در دیواره‌های کانال
L =	طول کانال	ϵ_i =	کسری از توان تلف شده برای یونیزاسیون پیشران
I_{sp} =	ضربه ویژه	ϵ_a =	کسری از توان تلف شده در آند
J_D =	جرم تخلیه	η =	راندمان کلی رانشگر
\dot{m} =	دبی جرمی	η_m =	راندمان جرم ^۱
\dot{m}_i =	دبی جرمی یون	η_ϕ =	راندمان واگرایی پرتو ^۲
V =	ولتاژ اعمالی	η_f =	راندمان جریان ^۳
α =	نسبت ذرات دوبار یونیزه شده	η_v =	راندمان سرعت پخش ^۴
u =	سرعت	η_{losses} =	راندمان تلفات

۱- مقدمه

رانشگرهای الکتریکی^۵ یکی از فناوری‌های نوظهور و مهم عرصه هوافضا می‌باشند که به دلیل عملکرد بهتر و قابلیت‌های بیشتر در مقایسه با رانشگرهای شیمیایی، به گزینه‌ای مهم برای ماموریت‌های فضایی تبدیل شده‌اند. تحقیق و توسعه در رابطه با این رانشگرها از اواخر دهه ۱۹۵۰ در اتحادیه جماهیر شوروی و سایر کشورها آغاز شد [۱]. در نتیجه این تلاش‌ها، انواع مختلفی از رانشگرهای الکتریکی از جمله رانشگرهای پلاسمایی^۶، رانشگرهای الکترواستاتیکی^۷ و رانشگرهای الکتروترمال^۸ پیشنهاد گردیده و توسعه یافتند [۲]. امروزه از آنها به طور گسترده در ماموریت‌های فضایی از جمله ماموریت‌های انتقال مداری^۹، حفظ مداری^{۱۰} استفاده می‌شود [۳-۴].

⁷ Electrostatic thruster

⁸ Electrothermal thruster

⁹ Orbit transfer

¹⁰ Station keeping

¹ Mass utilization efficiency

² Beam divergence efficiency

³ Current efficiency

⁴ Spread velocity efficiency

⁵ Electric propulsion

⁶ Plasma thruster

برای طراحی رانشگر اثر هال توان بالا و هم توان پایین استفاده نمود. بدین منظور لازم است که یک نمونه رانشگر اثر هال را که اطلاعات کامل و جامعی از مشخصات هندسی و سایر پارامترهای دخیل در طراحی آن وجود دارد به عنوان یک رانشگر مرجع انتخاب نماییم. رانشگر اثر هال SPT100 بر روی انواع فضاپیماهای روسی کار کرده و هنوز هم کار می‌کند و مشخصات آن به طور کامل در دسترس می‌باشد. از طرفی این رانشگر از لحاظ سطح توان (توان 1kW) نیز گزینه‌ای مناسبی برای طراحی رانشگرها هم با سطح توان بالا و هم با سطح توان پایین محسوب می‌شود. لذا این رانشگر به عنوان رانشگر مرجع انتخاب می‌شود. پس از انتخاب رانشگر مرجع مجموعه‌ای از پارامترهای اساسی تحت عنوان پارامترهای طراحی انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از این پارامترها و همچنین با استفاده از ضریب مقیاس‌بندی که براساس قوانین فیزیکی حاکم بر رانشگر بدست آمده است، می‌توان سایر مشخصات فیزیکی و عملکردی رانشگر اثر هال را طراحی و محاسبه نمود. در این مقاله ابتدا در بخش ۲ به تشریح روش مقیاس‌بندی جهت طراحی رانشگر اثر هال به همراه توصیف تراستر مرجع می‌پردازیم، سپس در بخش ۳ با در نظر گرفتن پارامترهای عملکردی و سطح توان و محدودیت موجود در فضای اختصاصی، گام‌های طراحی اولیه یک نمونه رانشگر اثر هال را مشخص نموده و در نهایت در بخش ۴ به طراحی اولیه یک نمونه رانشگر اثر هال براساس الزامات تعیین شده و همچنین گام‌های بدست آمده از بخش ۳ می‌پردازیم.

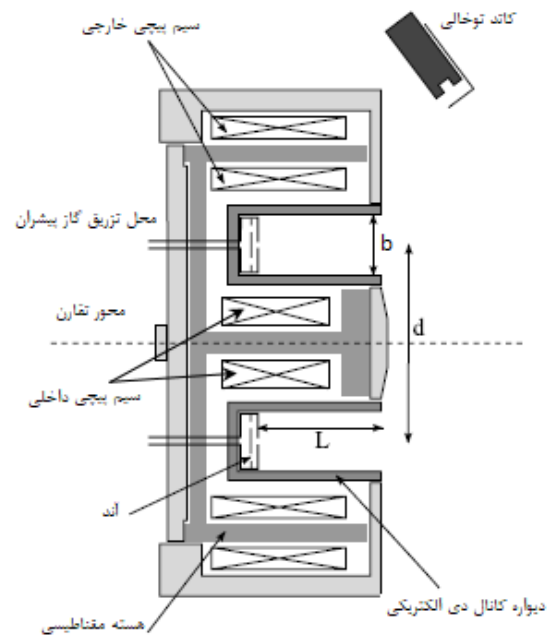
۲- روش مقیاس‌بندی

روش مقیاس‌بندی یکی از ابزارهای مهم و کارآمد برای طراحی اولیه رانشگر اثر هال به شمار می‌آید. در این روش با استناد به پارامترهای یک رانشگر مرجع و با در دست داشتن الزامات طراحی نظیر ضربه ویژه، میزان تراست و ولتاژ اعمالی، پارامترهای طراحی مانند ابعاد هندسی، توان مصرفی و دبی جرمی پیشران محاسبه می‌شوند. لذا انتخاب رانشگر مرجع بسیار مهم و حیاتی است. زیرا بایستی اطلاعات کامل و دقیقی از هندسه و عملکرد آن در دسترس باشد تا بتوان به آن به عنوان یک رانشگر مرجع برای مقیاس‌بندی استناد نموده و سپس از آن برای طراحی سایر رانشگرها در ابعاد و اندازه‌ها و سطح توانی و عملکردی متفاوت استفاده کرد. همانگونه که در بخش مقدمه نیز بیان شد، یکی از انواع رانشگرهای اثر هال که مشخصات ابعادی و عملکردی و سایر پارامترهای دخیل در طراحی آن به طور کامل و جامع در دسترس است، رانشگر اثر هال SPT100 می‌باشد. پارامترهای اساسی این رانشگر که مورد نیاز برای روش مقیاس‌بندی است در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱- پارامترهای رانشگر اثر هال SPT100

پارامتر	مقدار
d_{ref}	85mm
b_{ref}	15mm
L_{ref}	22mm
V_{ref}	300V
n_{ref}	n_{SPT100}

از میان انواع رانشگرهای الکتریکی، رانشگر اثر هال^۱ به دلیل ضربه ویژه بالا، بهره تراست بالا و نسبت تراست به توان بالا از جذابیت بالایی برخوردار است. رانشگر اثر هال یکی از انواع پیشرفته رانشگرهای الکتریکی است که در آن از تخلیه الکتریکی به همراه الکترون‌های مغناطیسی شده جهت یونیزه نمودن و شتاب‌دهی به گاز پیشران استفاده می‌شود. شکل ۱ نمای مقطعی یک نمونه رانشگر اثر هال را به همراه برخی از اجزای اصلی آن نمایش می‌دهد. در این شکل سه مشخصه هندسی b , $d = \frac{d_{ext} + d_{int}}{2}$ و L به ترتیب نشانگر پهنای کانال تخلیه، میانگین قطر دهانه کانال و طول کانال تخلیه هستند.



شکل ۱- نمای مقطعی از یک رانشگر اثر هال به همراه برخی اجزای اصلی

تعیین ابعاد صحیح و پیش‌بینی عملکرد یک رانشگر، یک فرآیند ضروری در فاز اولیه طراحی است. لذا هدف از این مقاله طراحی ابتدایی یک نمونه رانشگر اثر هال است به‌گونه‌ای که سطح توان و سطح عملکردی از جمله میزان تراست و ضربه ویژه را به ازای محدودیت‌های ابعادی در نظر گرفته شده برآورد نماید. روش‌های مختلفی برای طراحی اولیه رانشگرها وجود دارد. از جمله طراحی با استفاده از روابط فیزیکی و یا طراحی با استفاده از روش مقیاس‌بندی [۵-۷]. در این مقاله با توجه به کارآمدی روش مقیاس‌بندی، از آن برای طراحی یک نمونه رانشگر اثر هال استفاده می‌کنیم. انواع مختلفی از روش مقیاس‌بندی برای بدست آوردن تخمین اولیه از ابعاد رانشگر اثر هال به ازای یک توان ورودی معین و سطح خاصی از تراست و ضربه ویژه ارائه شده است [۸-۱۰]. روش به کار رفته در این مقاله روش مقیاس‌بندی براساس [۱۱، ۱۲] است. این روش یک ابزار بسیار کارآمد برای پیش‌بینی عملکرد رانشگر اثر هال در مرحله اولیه طراحی محسوب می‌شود. همچنین اعتبارسنجی این روش براساس داده‌های تجربی رانشگرهای اثر هال با طیف گسترده‌ای از توان انجام گردیده است. لذا می‌توان از این روش

¹ Hall effect thruster

حال پس از محاسبه میزان جریان تخلیه، توان مصرفی و پارامترهای راندمان می‌توان به محاسبه مشخصات عملکردی رانشگر مورد طراحی پرداخت.

دبی جرمی یونی پیشران از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_i = \frac{(\eta_J J_D)}{e} (1 + \alpha) M_X \quad (8)$$

بنابراین برای دبی جرمی پیشران خواهیم داشت:

$$\dot{m}_{tot} = \frac{\dot{m}_i}{\eta_m} \quad (9)$$

همچنین سرعت خروج یون‌ها به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$v_{ion} = (1 - \alpha) \sqrt{\frac{2eV \cdot \eta_{losses} \cdot \eta_v \cdot \eta_\phi}{M_{Xe}}} + \alpha \sqrt{\frac{2 \cdot (2e) \cdot V \cdot \eta_{losses} \cdot \eta_v \cdot \eta_\phi}{M_{Xe}}} \quad (10)$$

نیروی تراست، نیز به صورت حاصل ضرب دبی جرمی یونی و سرعت خروج یون‌ها بیان می‌شود:

$$T = \dot{m}_i \cdot v_{ion} \quad (11)$$

و در نهایت ضربه ویژه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_{sp} = \frac{\eta_m v_{ion}}{g_0} \quad (12)$$

۳- طراحی رانشگر اثر هال با استفاده از روش مقیاس‌بندی و به ازای الزامات طراحی

در این بخش با توجه به روابط بدست آمده از روش مقیاس‌بندی و همچنین الزامات تعیین شده که شامل نیروی تراست، ضربه‌ویژه، ولتاژ تخلیه، محدودیت فضای اشغالی و استفاده از پیشران زنون می‌باشد، به طراحی یک نمونه رانشگر اثر هال می‌پردازیم. گام‌های این طراحی به صورت زیر خواهد بود:

- دبی جرمی پیشران با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شود.
- از روابط (۳) و (۱۰) نسبت L/b تعیین می‌شود.
- جریان تخلیه و به دنبال آن توان مصرفی از روابط (۲) و (۸) بدست می‌آیند.
- و در نهایت از رابطه (۱) حاصل ضرب $n \times d \times b$ بدست می‌آید.

همانطور که در گام‌های فوق مشاهده می‌کنیم، مشخصات هندسی و همچنین چگالی ذرات پیشران تزریقی به صورت مستقل محاسبه نمی‌شوند. اما می‌توان با در نظر گرفتن محدودیت فضای اشغالی برای یکی از ابعاد و همچنین به ازای کمترین مقدار n ، مقادیر این پارامترها را محاسبه نمود. بدین منظور ما فرض می‌نماییم که بزرگترین بعد سطح مقطع در نظر گرفته شده در حدود ۱/۵ برابر شعاع خارجی رانشگر اثر هال باشد. این بدان معنی است که $1.5 r_{ext} = 1.5 \frac{d+b}{2}$ در نظر گرفته می‌شود. حال با در نظر گرفتن این محدودیت و همچنین روابط حاصل از گام‌های ۲ و ۴ به کمینه

J_{D-ref}	4.5 A
P_{ref}	1350W
$B_{max-ref}$	200G
ϵ_{w-ref}	0.25
ϵ_{a-ref}	0.054
ϵ_{i-ref}	0.136

در این روش ۵ پارامتر اساسی پهنای کانال تخلیه b ، میانگین قطر دهانه کانال d ، طول کانال تخلیه L ، ولتاژ تخلیه V و چگالی ذرات گاز پیشران n به عنوان پارامترهای طراحی و مستقل در نظر گرفته می‌شوند. لذا با در دست داشتن این ۵ پارامتر طراحی و با استفاده از قوانین و روابط فیزیکی حاکم، می‌توان به روابط مقیاس‌بندی دست یافته و سایر مشخصات مورد نظر رانشگر مورد طراحی را محاسبه نمود. نسبت بین پارامترهای اساسی رانشگر مورد طراحی به همان پارامترها در رانشگر مرجع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi_d = \frac{d}{d_{ref}}, \xi_b = \frac{b}{b_{ref}}, \xi_L = \frac{L}{L_{ref}}, \xi_V = \frac{V}{V_{ref}}, \xi_n = \frac{n}{n_{ref}}$$

اولین پارامتری که با استفاده از روابط مقیاس‌بندی محاسبه می‌شود، جریان تخلیه است:

$$J_D \propto \dot{m} \propto n \cdot M_{Xe} \cdot u_a \cdot d \cdot b \Rightarrow \frac{J_D}{J_{Dref}} = \xi_n \xi_d \xi_b \quad (1)$$

بنابراین برای توان مصرفی خواهیم داشت:

$$P = V_D J_D \Rightarrow \frac{P}{P_{ref}} = \xi_V \xi_n \xi_d \xi_b \quad (2)$$

راندمان کلی رانشگر نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \eta_{losses} \cdot \eta_J \cdot \eta_v \cdot \eta_\phi \cdot \eta_m \quad (3)$$

که در آن راندمان سرعت پخش و راندمان واگرایی پرتو هر دو ثابت و ۰/۹۵ و ۰/۸۱ و راندمان جرم نیز در حدود ۰/۹۸ فرض می‌شوند. این میزان از راندمان جرمی نشان می‌دهد که تقریباً تمامی پیشران تزریقی یونیزه می‌شود. تنها پارامتری که در رابطه (۳) متأثر از پارامترهای طراحی است، پارامتر η_{losses} می‌باشد که آن نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = (1 - \epsilon_w - \epsilon_a - \epsilon_i) \quad (4)$$

که در این رابطه نیز پارامترهای ϵ_w ، ϵ_a و ϵ_i با استفاده از روابط مقیاس‌بندی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\epsilon_w \propto \frac{T_e^{\frac{3}{2}} \cdot n \cdot d \cdot L}{P} \Rightarrow \frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w-ref}} = \xi_L (\xi_V \xi_b)^{-1} \quad (5)$$

$$\epsilon_a \propto \frac{T_e^{\frac{3}{2}} \cdot n \cdot d \cdot L}{P} \Rightarrow \frac{\epsilon_a}{\epsilon_{a-ref}} = (\xi_V)^{-1} \quad (6)$$

$$\epsilon_i \propto \frac{\dot{m}}{P} \Rightarrow \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{i-ref}} = (\xi_V)^{-1} \quad (7)$$

این پارامترها لازم است که از محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای مشخصات هندسی استفاده نمود تا بدین ترتیب این پارامترها را محاسبه نمود. لذا براساس توضیحات بیان شده در بخش ۳ جهت یافتن مقدار بهینه برای پارامترهای هندسی و همچنین چگالی ذرات پیشران تزریقی کافی است مسئله کمینه‌سازی زیر را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل نماییم. بنابراین خواهیم داشت:

$$\min n$$

s. t.

$$\begin{cases} 1.5 \frac{d+b}{2} = \frac{100mm}{2} \\ n \times d \times b = 5.5193 \times 10^{22} \\ \frac{L}{b} = 3.3203 \end{cases}$$

مسئله فوق، یک مسئله بهینه‌سازی است که هم دارای محدودیت خطی و هم غیرخطی می‌باشد. با حل مسئله بهینه‌سازی فوق با استفاده از الگوریتم ژنتیک به مقادیر بهینه زیر دست پیدا می‌کنیم.

جدول ۴- مشخصات بهینه حاصل از طراحی با الگوریتم ژنتیک

پارامترها	مقادیر
n	5e+25
b	33mm
d	33.7mm
L	109mm

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی اولیه یک نمونه رانشگر اثر هال به منظور برآورد اولیه از مشخصات اصلی آن از جمله مشخصات هندسی و دبی جرمی و توان مصرفی آن پرداخته شده است. روش به کار رفته در این طراحی، روش مقیاس‌بندی است که در آن از یک رانشگر مرجع که رانشگر اثر هال SPT100 می‌باشد و همچنین معیار مقیاس‌بندی برای برآورد الزامات تعیین شده استفاده شده است. ۵ پارامتر اساسی به عنوان پارامتر طراحی معرفی گردیده و تمامی مشخصات اصلی براساس این پارامترهای اساسی تخمین زده می‌شوند. در این مقاله سعی شده است که براساس الزامات تعیین شده جهت طراحی یک نمونه رانشگر اثر هال برای یک ماهواره مخابراتی، برآورد اولیه از هندسه و همچنین دبی جرمی پیشران تزریقی و توان مصرفی انجام پذیرد. در نتایج حاصل از این روش مشاهده می‌شود که برخی از پارامترها از جمله مشخصات هندسی و چگالی ذرات پیشران تزریقی به صورت مستقل بدست نمی‌آیند. لذا با محدود کردن سطح مقطع و به ازای کمینه نمودن چگالی ذرات پیشران تزریقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه این پارامترها نیز محاسبه می‌شوند.

۶- مراجع

[1] Martinez-Sanchez, Manuel, and James E. Pollard.

نمودن مقدار n می‌پردازیم. بدین منظور از روش الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کنیم. با استفاده از این الگوریتم می‌توانیم همزمان با کمینه کردن چگالی ذرات پیشران، الزامات هندسی رانشگر را نیز برآورد نماییم. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است. در این الگوریتم جستجو برای یافتن مقدار بهینه برگرفته از مفهوم بقای بهترین‌ها در یک جمعیت اولیه صورت می‌گیرد و جمعیت جدید با اعمال مکرر اپراتورهای ژنتیکی بر روی افراد حاضر در جمعیت تولید می‌شود [۱۳]. ساختار این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد [۱۴]. در ابتدا یک جمعیت (Y) از n کروموزوم به طور تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود. سپس تابع برازندگی برای هر کدام از کروموزوم‌ها در جمعیت (Y) محاسبه شده و دو کروموزوم C_1 و C_2 از جمعیت Y براساس تابع برازندگی انتخاب^۱ می‌شود. سپس عملگر ترکیب^۲ با احتمال ترکیب C_p جهت تولید فرزند (O) بر روی کروموزوم‌های C_1 و C_2 اعمال می‌شود. پس از آن، با به کارگیری عملگر جهش^۳ بر روی فرزند (O) با احتمال M_p نسل جدید O' تولید و به تبع آن نیز جمعیت جدید شکل می‌گیرد. عملیات انتخاب، ترکیب و جهش بر روی جمعیت فعلی جهت تولید جمعیت جدید تا رسیدن به مقدار بهینه تکرار می‌شود.

۴- شبیه‌سازی

فرض می‌کنیم که الزامات تعیین شده برای طراحی یک رانشگر اثر هال قابل استفاده در یک ماهواره تجاری در جدول ۲ آورده شده است:

جدول ۲- الزامات تعیین شده برای طراحی یک نمونه رانشگر اثر هال

پارامترها	مقادیر
T	40 mN
I_{sp}	1600 s
V	400 v
propulsion	Xe
dimension	$100mm \times 100mm \times 150mm$

حال با استفاده از الزامات تعیین شده و همچنین گام‌های عنوان شده جهت طراحی رانشگر، دبی جرمی پیشران، توان مصرفی، جریان تخلیه و نسبتی از چگالی ذرات تزریقی و مشخصات ابعادی به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

جدول ۳- مشخصات طراحی شده با استفاده از روش مقیاس‌بندی

الزامات	مقادیر
\dot{m}	2.5 mg/s
J_D	1.948 A
P	799.2 W
$n \times d \times b$	5.5193e+22
L/b	3.3203

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود مشخصات هندسی و چگالی ذرات پیشران به صورت مستقل مشخص نشده‌اند. برای پیدا کردن مقادیر

³ Mutation

¹ Selection

² crossover

- "Spacecraft electric propulsion-an overview." *Journal of propulsion and power* 14.5 (1998): 688-699.
- [2] Lev, Dan, et al. "The technological and commercial expansion of electric propulsion." *Acta Astronautica* 159 (2019): 213-227.
- [3] Hopping, Ethan P., Wensheng Huang, and Kunning G. Xu. "Small Hall effect thruster with 3D printed discharge Channel: Design and thrust measurements." *Aerospace* 8.8 (2021): 227.
- [4] Mazouffre, Stéphane. "Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches." *Plasma Sources Science and Technology* 25.3 (2016): 033002.
- [5] Goebel, Dan M., and Ira Katz. *Fundamentals of electric propulsion: ion and Hall thrusters*. John Wiley & Sons, 2008.
- [6] Jahn, Robert G. *Physics of electric propulsion*. Courier Corporation, 2006.
- [7] Hofer, Richard Robert. *Development and characterization of high-efficiency, high-specific impulse xenon Hall thrusters*. University of Michigan, 2004.
- [8] Daren, Yu, Ding Yongjie, and Zeng Zhi. "Improvement on the scaling theory of the stationary plasma thruster." *Journal of Propulsion and Power* 21.1 (2005): 139-143.
- [9] Dannenmayer, Käthe, and Stéphane Mazouffre. "Elementary scaling relations for Hall effect thrusters." *Journal of Propulsion and Power* 27.1 (2011): 236-245.
- [10] Garcia, Alberto Olano, Haibin Tang, and Junxue Ren. "Scaling model for SPT and TAL thrusters." *IEEE Transactions on Plasma Science* 48.1 (2019): 86-98.[11]
- [11] Misuri, Tommaso, et al. "High power Hall thruster design options." *Proceedings of the 30th International Electric Propulsion Conference (Florence), IEPC*. 2007.
- [12] Misuri, Tommaso, and Mariano Andrenucci. "HET scaling methodology: Improvement and assessment." *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 2008.
- [13] Michalewicz, Z. "Genetic Algorithms+ Data Structures= Evolution Programs. Springer-Verlag, 1999." *Google Scholar Google Scholar Digital Library Digital Library* (1999).
- [14] Liu, Donghai. "Mathematical modeling analysis of genetic algorithms under schema theorem." *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering* 19.S1 (2019): 131-137.