ero21-01400162

تحلیل دمایی و مقایسه دو طراحی مختلف برای کاتد مورد استفاده در رانشگرهای الکترواستاتیکی

رضا گلزاریان[1*]، لیلی محمودی[2]، مرتضی فرهید[3] ، آرزو اسماعیلی[4]

۱- دانشجوی دکتری فوتونیک، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز- میرداماد، r.golzarian@isrc.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مکانیک، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز- میرداماد، l.mahmoudy@isrc.ac.ir

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

۴- دانشجوی دکتری مکانیک، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز- میرداماد،a.esmaeli@isrc.ac.ir

چکیده

خانواده رانشگرهای الکتریکی[1] به لحاظ مزایایی که از لحاظ بالا بودن ضربه ویژه و بازده دارند در ماموریت‌های مختلف فضایی مورد توجه می‌باشند. رانشگرهای مذکور دارای سه تقسیم بندی الکتروترمال، الکترواستاتیکی و الکترومغناطیسی هستند. از این بین رانشگرهای یونی و اثرهال از اعضای شاخص زیرشاخه الکترواستاتیکی به شمار می‌روند که همچنان در صنایع فضایی در حال رشد و توسعه هستند. از طرفی بخش مهمی از این رانشگرها، کاتد توخالی[2] می‌باشد که وظیفه تولید الکترون، بسته شدن مدار الکتریکی کل رانشگر و در نهایت خنثی سازی یون‌های خروجی از دهانه رانشگر را به عهده دارد. در این مقاله دو نمونه از طراحی کاتد توخالی از لحاظ دمایی مورد شبیه سازی و تحلیل قرارگرفته است. همچنین شارش گرمایی نیز در هر دو طرح شبیه سازی شده و نتایج آن گزارش شده است و با توجه به نتایج بدست آمده، نمونه مطلوب از لحاظ عملکردی معین شده است. یکی از اهداف اصلی بررسی‌های دمایی در دو طراحی مذکور، اطمینان از عملکرد اجزای اصلی سیستم نظیر هیتر با توجه به داده‌های ورودی و مقایسه بین دو طراحی و در نهایت انتخاب یا اصلاح طراحی بوده است. لازم به ذکر است که یکی از طرح‌های مورد مطالعه در پژوهشکده رانشگرهای فضایی ساخته شده و مورد تست عملکردی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: *رانشگر الکتریکی- رانشگر یونی- رانشگر اثرهال- کاتد توخالی- تحلیل دمایی*

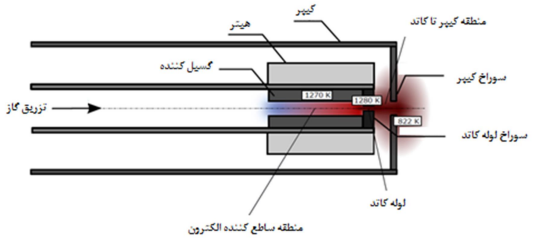
۱- مقدمه

سیستم‌های پیشرانش فضایی در کل در دو زمینه ایفای نقش می‌کنند: اوّل پیشرانش اصلی ماهواره که شامل ماموریت‌های اعماق فضا، انتقال بین سیاره‌ای و فرود و صعود سیاره‌ای است؛ دوّم مانورهای مداری که شامل کنترل مداری، کنترل جهت و موقعیت و عملیات ایستگاه گیری می‌باشند. [۱]. هالوکاتدها به عنوان منابع الکترونی برای تامین نیازهای الکترونی برای یونیزاسیون پیشرانه و برای خنثی کردن پرتو یونی که از تراستر خارج می شود، مورد استفاده قرار می گیرند. چون رانشگرهای اثر هال و رانشگرهای یونی پرتوهای یونی با بار مثبت را به طرف بیرون پرت می‌کنند، برای جلوگیری از تجمع بار الکتریکی روی ماهواره/فضاپیما، به یک منبع الکترونی برای خنثی‌سازی پرتو یونی نیاز است. همچنین از کاتدها برای یونیزاسیون گاز پیشرانه استفاده می شود. کاتدهای توخالی رایج ترین نوع کاتدهای مورد استفاده در رانشگرهای الکتریکی هستند[۲و۳].

هالوکاتد یکی از اصلی ترین اجزای سیستم‌های پیشرانش مذکور است که مستقیماً با طول عمر رانشگر در ارتباط است. رانشگرها لازم است ده ها هزار ساعت کار کنند، بنابراین باید قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند. هالوکاتد های پیشرفته از یک لوله کاتدی فلزی نسوز تشکیل شده اند که یک تنگستن متخلخل را که به عنوان گسیلنده الکترون عمل می‌کند را در خود جای داده اند. گاز پیشران از طریق لوله اصلی هالوکاتد و یک سطح سوراخ دار که افزایش فشار را در قسمت گسیلنده، باعث می شود، تزریق می گردد. اطراف لوله کاتد هیتر تعبیه شده که کاتد را گرم می‌کند تا به دمای مورد نیاز برساند که برای شروع تخلیه و تشکیل پلاسما لازم است. این پلاسمای اولیه باعث هدایت جریان برای شروع تخلیه اصلی و گرم شدن ساطع کننده می شود و پس از آن تخلیه خودپایدار می شود. هالوکاتد معمولاً در مد کنترل جریان کار می کند و افزایش دما به منظور حفظ چگالی جریان بکار می رود. گسیلنده در محدوده دمایی^{o}C ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰درجه سانتیگراد کار می‌کند. دمای کمتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، محدوده تخلیه ناپایدار است و بالاتر از ۱۱۰۰درجه سانتیگراد ، سطح اصلاح شده با سرعت بیشتری بخار می شود که طول عمر کاتد کاهش می‌یابد. این محدوده درجه حرارت مطلوب ساطع کننده است که طول عمر کاتد حدود ۲۸۰۰۰ ساعت می باشد[۴].

پلاسمای تشکیل شده در داخل هالوکاتد به سه منطقه تقسیم می شود.۱- گسیلنده الکترون ۲- سوراخ لوله کاتد ۳- گپ کاتد تا نگهدارنده[3] که در شکل ۱ نشان داده شده است.

[1] Electrical Thrusters
[2] Hollow Cathode
[3] Keeper

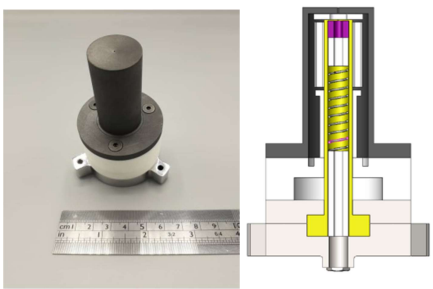


شکل ۱- قسمت‌های مختلف کاتد توخالی

عملکرد کاتدهای توخالی بر اساس مکانیسم انتشار ترمیونی است. ماده گسیلنده[4] با تابع کار پایین به عنوان ساطع کننده الکترون استفاده می شود که الکترون ها را در دماهای بالا از طریق انتشار ترمیونی[5] منتشر می کند. الکترون ها از پلاسمای با پتانسیل الکتریکی مثبت خارجی که با استفاده از یک الکترود اعمال می شود، استخراج می شوند. پلاسمای داخل لوله کاتدی توسط انتشار الکترون و جریان پیشران ثابت حفظ می شود. چگالی انتشار جریان ماده گسیلنده، به تابع کار ماده و دما بستگی دارد. مواد مورد استفاده برای گسیلنده معمولا تنگستن آغشته به اکسید باریم (BaO-W) و لانتانیوم هگزا بوراید (LaB_6) هستند. اکسید باریم دارای تابع کار بسیار کم ۲/۰۶ eV است. تابع کار پایین اکسید باریم عملکرد را در حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد بهبود می‌بخشد. با این حال این ماده به ناخالصی های موجود در پیشرانه و قرار گرفتن در معرض اتمسفر بسیار حساس است. وجود ناخالصی ها در موادگسیلنده، تابع کار را افزایش می دهد و منجر به شکست کاتد یا کاهش طول عمر می شود. LaB_6 یک گسیلنده جایگزین با تابع کار بالاتر ۲/۶۷ eV است که دماهای بالاتر، حدود ۱۵۰۰ °C، برای گسیلنده های LaB_6 مورد نیاز است. با این حال، ساطع کننده های LaB_6 نسبت به ناخالصی های موجود در گاز پیشران بسیار کمتر حساس هستند و به روش های تهویه خاصی نیاز ندارند و طول عمر بیشتری دارند. دمای بالا در گسیلنده با استفاده از المنت هیتر به دست می آید. هنگامی که دمای گسیلنده به سطوح مورد نیاز افزایش می یابد، الکترون های ساطع شده از گسیلنده با ذرات خنثی در پیشران برخورد می کنند و یک پلاسمای شبه خنثی در داخل لوله کاتد ایجاد می کنند. چنانچه الکترون ها از سطح خارج شوند تشکیل غلاف در سطح گسیلنده می دهد. میدان الکتریکی غلاف، حرکت یون ها را به سمت سطح گسیلنده تسریع می کند. برخورد یون ها با سطح گسیلنده مکانیزم خود گرمایشی را فراهم می کند. مکانیزم خود گرمایش دمای سطح گسیلنده را با توجه به جریان الکترون استخراج شده تنظیم می کند و پلاسما را در داخل آن حفظ می کند. در لوله کاتد پس از راه اندازی مکانیزم خود گرمایش، دیگر به جریان الکتریکی هیتر نیازی نیست و می-توان جریان الکتریکی هیتر را خاموش کرد .چون درجه حرارت ها بالا هستند برای انتشار ترمیونی مورد نیاز، موادی که می توانند دمای بسیار بالا را تحمل کنند در هالوکاتدها استفاده می‌شوند. طراحی حرارتی هالوکاتدها برای ویژگی های عملیاتی و طول عمر آن بسیار مهم است، زیرا تلفات حرارتی سطح توان مورد نیاز المنت هیتر را برای شروع عملیات کاتد و همچنین حفظ عملیات تعیین می کند[۵و۶].

۱- شرح دو طراحی مختلف

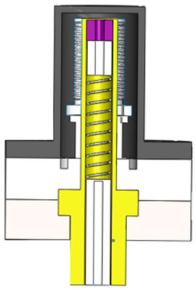
در طراحی‌هایی که برای کاتد صورت گرفته است، در نمونه اول گرم شده کاتد بوسیله هیتر از جنس تنگستن-رنیوم۲۶٪ صورت گرفته است. در این نمونه پایه کاتد از جنس استیل می‌باشد که در عین اینکه به عنوان نگهدارنده بقیه اجزا عمل می‌کند، وظیفه واسط لوله ورودی گاز و کاتد داخلی را نیز بر عهده دارد. بر روی پایه دو عایق از جنس سرامیک ماکور قرار می‌گیرد که در عین عایق کردن فاصله بین پایه و پوشش گرافیتی بیرونی، ناحیه‌ای برای انتقال سیم های جریان هیتر محسوب می‌شود. لوله اصلی کاتد که بخاطر انتقال و تحمل دمایی بالا از جنس مولیبدن انتخاب شده است، در درون خود حاوی ماده گسیلنده از جنس لانتانیوم هگزابوراید است که دقیقاً در نوک لوله قرار می‌گیرد. گسیلنده بواسطه دو فاصله انداز استوانه‌ای توخالی از جنس ماکور و یک فنر تنگستنی نگهداشته می‌شود. لوله کاتد در راس دارای یک سوراخ ریز است که الکترون‌های ساتع شده از گسیلنده بواسطه آن و سوراخی که روی گرافیت و در امتداد آن قرار دارد خود را به محیط بیرونی می‌رسانند. لوله کاتد از بیرون توسط مجموعه هیتر و یک استوانه نگهدارنده از جنس ماکور احاطه شده است. یک قطعه سرامیکی دیگر بخاطر حائل بودن بین سیم‌های هیتر و پوشش گرافیتی در بالای لوله کاتد قرار می‌گیرد. مجموعه مذکور را یک حفاظ تشعشی چند لایه از مولیبدن در برمی‌گیرد که تا حد امکان از هدر رفت گرما بصورت تشعشی جلوگیری می‌کند. در نهایت این مجموعه با یک پوشش گرافیتی بسته می‌شود. جریان‌های الکتریکی دخیل بجز هیتر مربوط به جریان بدنه کاتد و پوشش گرافیتی می‌شود. هیتر بکار رفته در نمونه اول بصورت یک سیم طویل پیچانده شده می‌باشد که داخل لوله-هایی به قطر ۲ میلیمتر از جنس آلومینا قرار گرفته‌اند که بصورت دوار در بیرون لوله کاتد و چسبیده به آن قرار می‌گیرند. نمایی از مدل این نمونه و محصول ساخته شده آن در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- مدل کاتد توخالی نمونه اوّل(راست)، نمونه ساخته شده(چپ)

[4] Insert
[5] Thermionic Emission

تفاوتی که نمونه دوم نسبت به اولی دارد بجز بحث طریقه اتصال بدنه کاتد به لوله ورودی گاز -که وارد بحث تحلیل دمایی نمی‌شود- مربوط می‌شود به هندسه و قرارگیری هیتر و یک تغییر در جنس پایه که به منظور بالا بودن مقاومت دمایی نسبت به استیل، در این نمونه فلز تیتانیوم در نظر گرفته شده است. تغییر موثر بعدی برمی‌گردد به شکل و جنس بدنه هیتر که باز از سم تنگستن-رنیوم در آن استفاده شده است. در طراحی دوم یک استوانه توخالی با شیارهای مارپیچی برای هیتر در نظر گرفته شده است که دقیقاً دیواره بیرونی لوله کاتد را در بر می‌گیرد. برای طولانی بودن مسیر سیم هیتر و بالا بردن توان نهایی آن، مارپیچها بصورت شیارهای رفت و برگشتی طراحی شده‌اند. نمایی از مدل نمونه دوم در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳- مدل کاتد توخالی نمونه دوّم

برای تحلیل دمایی این دو طراحی و مقایسه و همچنین قضاوت جهت انتخاب و یا بهبود هرکدام از آنها از یک نرم افزار شبیه ساز اجزای محدود استفاده شده است که نتایج آن در ادامه آمده است.

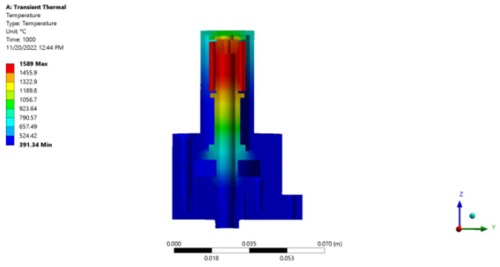
۲- نتایج شبیه سازی

در این بخش داده‌های مربوط به نتایج مستخرج از شبیه سازی آورده شده است. یکی از پارامترهایی که در بحث تحلیل دمایی مطرح است، ضرایب گسیل مربوط به هر کدام از اجزای مورد استفاده در کاتد است. رسانندگی گرمایی قسمتهای مختلف کاتد با دما تغییر می‌کنند. در جدول ۱ نسب به مواد بکار رفته، ضرایب گسیل آورده شده‌اند.

جدول ۱- ضرایب گسیل مواد بکار رفته در کاتد

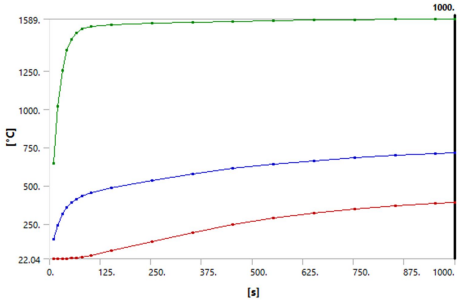
Material	Emissivity
Graphite	0.7
Porcelain	0.9
Titanium	0.18
Molybdenum	0.18
Steel	0.6
Alumina	0.2

در شبیه سازی که برای بررسی انتقال حرارتی در دو طراحی موضوع بحث انجام شده است، توان ورودی سیستم ۶۰۰ وات در نظر گرفته شده و تحلیل بصورت گذرا در نظر گرفته شده است. همچنین زمان تحلیل در بازه صفر تا ۱۰۰۰ ثانیه صورت گرفته است. با توجه به اینکه یکی از اهداف شبیه سازی مشخص شدن دمای نقاط مهمی مثل گسیلنده و پایه پایینی است، در هر دو نتیجه حاصل از شبیه سازی، این دماها مشخص می‌شوند. اهمیت استخراج دمای گسیلنده دقیقاً مربوط می‌شود به هدف اصلی نقش کاتد در سیستم رانشگرهای الکتریکی؛ چرا که در صورت عملکرد صحیح هیتر و سایر اجزا، دمای گسیلنده به حدی خواهد رسید که بتواند الکترون ساتع کند. توجه به دمای پایه کاتد نیز از این لحاظ می‌تواند مهم باشد که با سنجش دمای پایه استیل بواسطه یک ترموکوپل در حین انجام آزمون عملکردی، می‌توان قضاوتی بر روی کارکرد مناسب هیتر و در نهایت گسیلنده الکترون داشت. در طراحی کاتد اوّل دمای گسیلنده در حدود ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد و دمای پایه استیل در حدود ۳۹۰ درجه سانتیگراد بوده است که در شکل ۴ نمایی از توزیع دما در این نمونه آورده شده است.



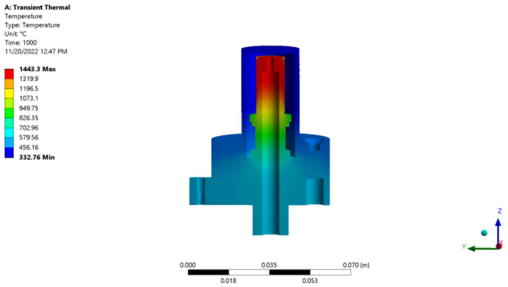
شکل ۴- توزیع دما در کاتد اوّل

تحلیل دیگری که نتایج بیشتری در اختیار ما قرار خواهد داد، نمودار شکل ۵ می‌باشد و نمایانگر تغییرات دما نسبت به گذشت زمان است که با رسم کمینه، بیشینه و متوسط دمایی نسبت به اجزای سیستم، در زیر آمده است. مشاهده می‌شود که مثلاً در مورد دمای هیتر، پس از گذشت تقریباً یک دقیقه به دمای حدود ۱۵۰۰ درجه رسیده و با گذشت زمان با شیب ملایمی به افزایش دما ادامه خواهد داد.



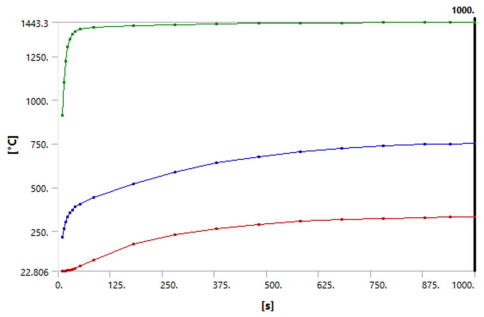
شکل ۵-تغییرات دما نسبت به زمان در نمونه اوّل

در طراحی کاتد دوّم دمای گسیلنده در حدود ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد و دمای پایه استیل در حدود ۳۳۰ درجه سانتیگراد بوده است که در شکل ۶ نمایی از توزیع دما در این نمونه آورده شده است.



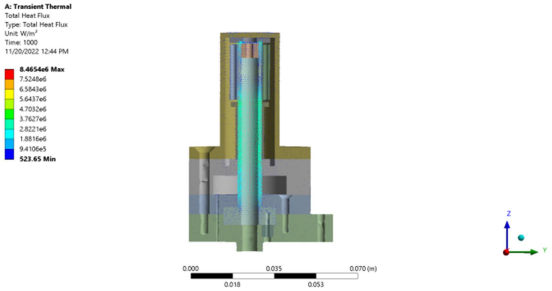
شکل ۶- توزیع دما در کاتد دوّم

به همان ترتیب برای طراحی دوّم شکل ۷ نمایانگر تغییرات دما نسبت به زمان می‌باشد. مشاهده می‌شود که مثلاً در مورد دمای هیتر، پس از گذشت تقریباً یک دقیقه به دمای حدود ۱۴۰۰ درجه رسیده و با گذشت زمان با شیب ملایمی به افزایش دما ادامه خواهد داد. با مقایسه بین نمودار شکل ۵ و ۷ برای کمینه و بیشینه دما مشاهده می‌شود که در اجزایی که کمترین دماها را در سیستم دارا می‌باشند، در هر دو طراحی تقریباً مشابه هم رفتار می‌کنند؛ ولی فرآیند گرمایش هیتر طرح دوم نسبت به اولی در زمان کمتری رخ می‌دهد و در عین حال نسبت به طرح اوّل به دمای پایین‌تری هم خواهد رسید.



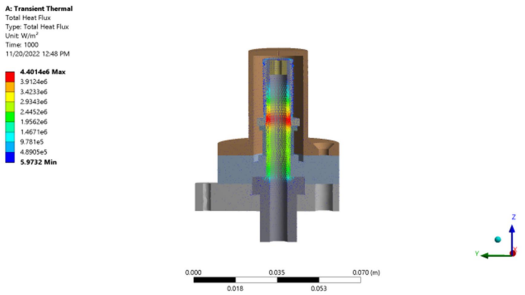
شکل ۷- تغییرات دما نسبت به زمان در نمونه دوّم

مورد دیگری که مد نظر بررسی‌های دمایی بوده است، تحلیل شار حرارتی می‌باشد. طبیعتاً قطعات اضافی شار حرارتی از هیتر به سمت پایه کاتد راافزایش خواهد داد و باعث خواهد شد توان مورد نیاز افزایش یابد. نتیجه شبیه سازی مربوط به مطالعه شار حرارتی نمونه اوّل در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸-توزیع شار حرارتی کاتد اوّل

باید در نظر داشت که اتلاف حرارتی می‌تواند بواسطه عایق سازی کاتد از نگهدارنده‌اش بیشتر کاهش یابد. هنگامی‌که فرآیند حرارتی در چند دقیقه کامل می‌شود، مابقی اجزای کاتد از فرآیند گرمایش تاثیر نمی‌یابند. نتیجه شبیه سازی مربوط به مطالعه شار حرارتی نمونه دوّم نیز در شکل ۹ آورده شده است. با وجود اینکه شار حرارتی در گسیلنده نسبت به بدنه پایین است، گسیلنده در زمان کمتری به بالاترین دما خواهد رسید.



شکل ۹- توزیع شار حرارتی کاتد دوّم

مشاهده می‌شود که طراحی و انتخاب مواد به گونه‌ای بوده که انتقال دما در اجزای پایه در کمترین حد و برعکس گسیلنده در بالاترین دما باشد. کل این فرآیند در بالا رفتن بازده دخیل خواهد بود.

۳- نتیجه‌گیری

با توجه به نتیجه شبیه سازی‌هایی که جهت تحلیل دمایی دو طراحی مختلف از کاتد صورت گرفت، مشخص شد که تحت شرایط یکسان از لحاظ اعمال توان، با گذشت زمان یکسان، در طراحی اول تا دمای حدود ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد و در طراحی دوّم تا ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد می‌توان دست یافت. همچنین با تحلیل شارش گرما در دو طراحی مشاهده شد که شار حرارتی در گسیلنده نسبت به بدنه پایین است و در نهایت گسیلنده در زمان کمتری به بالاترین دما می‌رسد. از این رو طرح اوّل با توجه به اهداف طراحی مطلوب‌تر به نظر می‌رسد.

۴- مراجع

[1] D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, JPL Space Science and Technology Series, New York, USA, 2008.

[2] M.M. Shafie, H.Saleh Banafshe , H. Gouchi Eskandar , R. Golzarian, M. Ghahramani,F. Mohebbi, *Redesigning and Manufacturing the Hollow Cathode for an Ion Thruster,*Space Mechanisms,Thrusters and Attitude determination Systems conf.Tabriz, 2014.

[3] M. T. Domonkos, *Evaluation of Low-Current Orificed Hollow Cathodes*, Ph.D. Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1999.

[4] D. M. Goebel, R. M. Watkins, and K. K. Jameson, *LaB6 Hollow Cathodes for Ion and Hall Thrusters,* Journal of Propulsion and Power 23, 552–558, 2007.

[5] I. G. Mikellides, I. Katz, D. M. Goebel, And J. E. Polk, *Hollow Cathode Theory and Experiment. II. A Two-Dimensional Theoretical Model of the Emitter Region*, Journal Of Applied Physics 98, 2005.

[6] U.Kokal, N.Turan, M.Celik, *Thermal Analysis and Testing of Different Designs of LaB6 Hollow Cathodes to be Used in Electric Propulsion Applications*, Aerospace, 2021, 8, 215.