

Design and Construction of An Electro-Hydrodynamic Thruster for Use in a Flying Microrobot

Esmail Cheshmenia, Rouhollah Khoshkhoo*

Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

This paper deals with the design and construction of a propeller for use in a flying micro robot using controlled electro-hydrodynamic current corona discharge. One example of plasma actuators is corona plasma actuators, which are created by a high-voltage electrode with a small radius of curvature as the emitter and another electrode as the collector, which are located at a certain distance from each other. In this research, micro robot-scale aerial vehicles with a weight of less than 100 mg and a characteristic length of less than 5 cm were investigated using an electro-hydrodynamic actuator based on corona discharge actuators. In this research, by examining the use of different aluminum metal alloys (T3, 1100, 2024, 7050, and 7075), an optimal weight for the collector and the optimal weight and necessary strength (T3 aluminum alloy) for the emitter were obtained. The results of this study showed, it is concluded that, in negative corona, increasing the voltage in the single-emitter sample has a significant effect on reducing the production efficiency compared to the dual-emitter propellant.

KEYWORDS

Corona plasma actuator, Microrobot, needle-plate configuration, Positive corona discharge, Negative corona discharge

* Corresponding Author: Email: r.khoshkhoo@mut.ac.ir

1. Introduction

Aerospace engineers and scientists are turning to plasma physics to develop new technologies in the design and construction of solid-state propulsion systems and flow control. Today, electro-hydrodynamic, in which electrical forces accelerate ions in a fluid, is emerging as an alternative method for propelling next-generation drones, with no moving parts, no noise, and no waves. Infrared, fuel-free, and has a high propulsive-to-power ratio, has been proposed.

Controlled corona discharge can create a current called electrohydrodynamic (EHD) current by charging particles around the anode and transferring their momentum to neutral particles farther from the anode. This controlled set of devices occurs between an electrode with a small radius of curvature in the form of a wire or needle called the emitter and another curved surface or plate called the collector electrode, which can be positively or negatively charged, and the other electrode, the collector, is usually connected to ground. If the emitter is positively charged, the flow of electrons will return to the emitter and, upon impacting it, will be negative.

The first observation of EHD current was made by Hoxby, who noticed the production of a low-velocity air current when a voltage was applied between two electrodes, which was later called "electric wind" [1]. The classical model for corona discharge in a point-plate configuration was used by Aten and Adamiak. It was a model with two electrodes of different radii with air between them. The pointed electrode was at a high positive voltage [2]. In 2017, Proud et al. experimentally investigated two electro-hydrodynamic forces generated by a wire-cylinder electrode configuration under high DC voltage. They were able to investigate the aerodynamic effects of using a corona actuator on the surface of an ultralight unmanned aircraft and concluded that its use is feasible and cost-effective, given the changes in the shape of the actuator and its electrical circuit [3].

In 2023, Baba Safari and colleagues experimentally investigated the effect of the corona actuator on fluid flow and radar stealth, using two different corona actuator placement models. One of the important results obtained in the radar evasion section was the reduction of radar cross-section by 14.23% with the help of a corona actuator. The results of this study showed that with increasing voltage, the amount of power consumed, electric current, and electric propulsion force increased in the two models [4].

This study investigates the application of corona discharge as an ion thruster for a flying microrobot. The research focuses on evaluating thrust force, power consumption, and efficiency across different voltages in both positive and negative corona discharges, considering single-emitter and dual-emitter configurations. The primary innovation of this work, compared to previous studies, is the implementation of a two-stage dual-emitter thruster and the examination of different emitter connection modes in series and parallel. The results demonstrate the potential for achieving a higher thrust-to-weight ratio with the dual-emitter configuration, in contrast to prior works that have primarily been limited to single-emitter setups.

2. Materials and Methods

The materials used for the plate and the needle base are made of T3 aluminum with a thickness of 0.2 mm, while the ground separating bases are crafted from the lightest available balsa wood. The manufacturing process for these components involves using a diamond laser cutting machine, which provides very high precision. The flying micro robot consists of three parts: collector, emitter, and base. The diagrams of this propulsion system are shown in Figure 1. The weight of the sample, an important parameter for the relevant calculations, was 1.15 milli-newton for the propulsion system with one emitter series (first sample) and 1.45 milli-newton for the system with two emitter series (second sample).

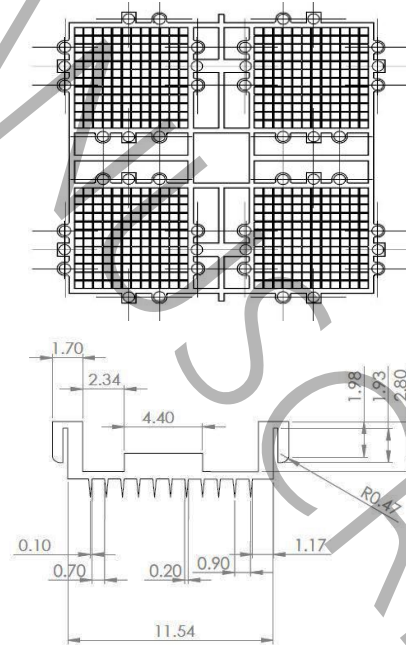


Figure 1. Schematic diagram of the collector and emitter

3. Results and Discussion

According to the graphs in Figure 7, the operating range of the single-emitter sample and the rise threshold of this sample is at a voltage of 14 kV and has a good efficiency in producing thrust up to 17.5 kV, but in the 2-emitter sample, the rise threshold is 15 kV and it has a good efficiency in producing thrust up to 19 kV. Also, in the positive corona, the operating range of the single-emitter sample and the rise threshold of this sample are observed at a voltage of 17.5 kV, and it has a good efficiency in producing thrust up to 19 kV. But in the 2-emitter sample, the threshold for lifting is 18 kV, and the negative corona has a lower efficiency, so that in the 2-emitter case, the increase in propulsive force at a voltage of 19.5 kV is 44 percent greater than that of the positive corona.

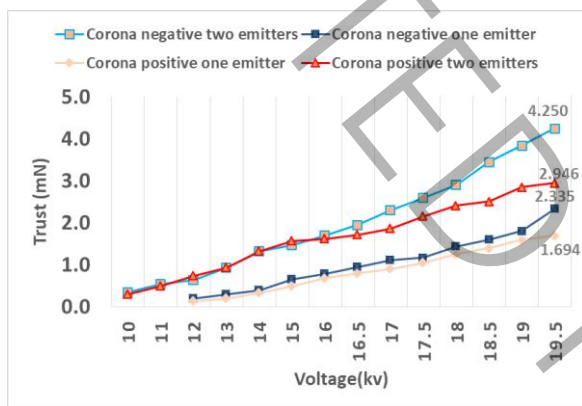


Figure 2. Thrust of single and double emitter samples in positive and negative corona

4. Conclusions

According to laboratory research, in the single-amperage mode, more propellant is produced at voltages equal to the negative reduction, which results in a voltage of 19 kV, the amount of propellant force in the negative reaction being 15% greater than the positive intensity. In the dual-emitter mode, the increase in thrust in the negative corona is greater than in the positive corona, so that at a voltage of 19.5 kV, the thrust in the negative corona is 44 percent greater than in the positive corona. Also, in the negative corona, the amount of thrust produced in the micro robot with two series of emitters in the negative corona mode is 79 percent greater than in the micro robot with one series of emitters. In positive corona, the amount of thrust in the micro robot with two emitter series in the negative corona mode is 73% higher than the thruster with one emitter series in the same negative corona. All the above results indicate that the thruster with the second emitter, despite having more weight than the single emitter mode, produces significant thrust compared to the single emitter mode and is a more optimal model.

As the voltage increases, the amount of electric current and consequently the consumed electric power increase parabolically. In a single-emitter thruster in the positive corona mode, the slope of the increase in electric power is greater, so that the amount of electric power consumed in the single-emitter mode with positive corona discharge is 23 percent greater than that in the negative corona discharge. In the two-emitter case, in the positive corona, the amount of electric power is initially lower than the amount of electric power in the negative corona due to the low electric current up to a voltage of 15 kV. However, from this voltage onwards, due to the higher current gradient in the positive corona, the amount of electric power also becomes higher than the amount in the negative corona.

In this research, by using two series of emitters, we were able to achieve more thrust and better performance of the propulsion, which ultimately led to obtaining the thrust required to lift the micro robot. We also found that negative corona provides better results for this propulsion. However, adding each emitter requires longer insulator legs and connecting these emitters, which reduces the thrust-to-weight ratio, which can be overcome in future research by using mechanical locks on the components themselves. We also found that by continuously reducing the electrode spacing, the efficiency, i.e., the thrust-to-weight ratio, can be increased

5. References

- [1] A. P. Chattoch, On the velocity and mass of the ions in the electric wind in Air, Philosophical Magazine, (2005) 401-420.
- [2] K. Adamiak, P. Atten, Simulation of corona discharge in point-plane configuration, Journal of Electrostatic, 61(2) (2008) 85-98.
- [3] N. Monrolin, F. Plouraboune, O. Praud, Electrohydrodynamic thrust for in atmosphere propulsion, AIAA Journal, 55(2) (2017) 4296-4305.
- [14] P. Babasafari, R. Khoshkhoo, H. Eshraghi, Experimental investigation of the effect of different corona plasma actuator arrangements on the amount of thrust produced on a flat surface, Journal of Aeronautical Engineering, 25(1) (2023), 144-153. (In Persian)

طراحی و ساخت یک پیشران الکتروهیدرودینامیکی جهت استفاده در میکروروبات پرنده

اسماعیل چشمه ای نیا، روح الله خوشخو*

مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
* r.khoshkhoo@mut.ac.ir

چکیده

این مقاله به طراحی و ساخت یک پیشران جهت استفاده در میکروروبات پرنده یا میکرو پهباد با استفاده از تخلیه کرونای کنترل شده جریان الکتروهیدرودینامیکی پرداخته است. یکی نمونه از عملگرهای پلاسما، عملگرهای پلاسماهای کرونای می باشد که به وسیله یک الکتروود دارای ولتاژ بالا با شعاع انحنای کوچک به عنوان ساطع کننده (امیتر) و الکتروود دیگر به عنوان جمع کننده (کالکتور) که در فاصله معینی از یکدیگر قرار دارند، ایجاد می شود. در این تحقیق، به بررسی وسایل پرنده هوایی در مقیاس میکروروبات با وزن کمتر از ۱۰۰ میلی گرم و طول مشخصه کمتر از ۵ سانتی متر با استفاده از محرک الکتروهیدرودینامیکی مبتنی بر تخلیه عملگرهای کرونای پرداخته شده است. تولید نیروی پیشران تقریباً بی سر و صدا و بدون استفاده از قطعات متحرک است. در این تحقیق، با بررسی استفاده از آلیاژهای مختلف فلز آلومینیوم (تی ۳، ۱۱۰۰، ۲۰۲۴، ۷۰۵۰ و ۷۰۷۵) به یک وزن بهینه برای کالکتور و وزن بهینه و استحکام لازم برای امیتر به دست آمد. در نتیجه مدل تک امیتری و در نهایت مدل دو امیتری ساخته شد و نتایج به دست آمده بر مورد بحث و بررسی قرار گرفت. تراست تولیدی حالت دو امیتری در کرونای منفی، ۷۹ درصد بیشتر از حالت تک امیتری است و در حالت دو امیتری، تراست تولیدی در تخلیه کرونای منفی، ۴۴ درصد بیشتر از تخلیه کرونای مثبت می باشد، همچنین در کرونای منفی، افزایش ولتاژ در نمونه تک امیتری تاثیر بسزایی در کاهش راندمان تولیدی نسبت به پیشران دو امیتری دارد.

کلمات کلیدی: عملگر پلاسماهای کرونای، میکرو ربات، پیکربندی صفحه و سوزن، تخلیه کرونای مثبت، تخلیه کرونای منفی

۱. مقدمه

مهندسين و دانشمندان هوافضا برای ایجاد تکنولوژی های جدید در حوزه طراحی و ساخت سیستم های پیشران حالت جامد و کنترل جریان، به سمت فیزیک پلاسما سوق پیدا کرده اند. امروزه، الکتروآیرویدینامیک که در آن نیروهای الکتریکی به یونها در سیال سرعت می بخشند، به عنوان یک روش جایگزین برای تولید نیروی پیشران پهبادهای نسل جدید، بدون قطعات متحرک، بدون تولید صدا، بدون ایجاد امواج مادون قرمز و بدون نیاز به سوخت و احتراق و همچنین دارای نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی بالایی می باشد، پیشنهاد شده است.

تخلیه کرونای کنترل شده می تواند از طریق باردار کردن ذرات اطراف آند و انتقال مومنتوم آنها به ذرات خنثی دورتر از آند، جریانی را ایجاد کند که به آن جریان الکتروهیدرودینامیکی^۲ می گویند، این تخلیه کرونای کنترل شده بین یک الکتروود با شعاع انحنای کوچک به صورت سیم یا سوزن به نام امیتر و یک سطح منحنی شکل یا یک صفحه دیگر به عنوان الکتروود کالکتور رخ می دهد، که امیتر می تواند ولتاژ مثبت یا منفی داشته باشد و الکتروود دیگر، تجميع کننده (کالکتور) معمولاً به زمین

¹ -T3

² -Electrohydrodynamic

وصل می‌شود. اگر ساطع کننده دارای بار مثبت باشد، جریان الکترون‌ها به سمت امیتر بازمی‌گردند و با برخورد به مولکول‌های هوا، یون‌های مثبت ایجاد می‌کند، که این یون‌ها توسط امیتر دفع و توسط کالکتور جذب می‌شوند. در سمت کالکتور، یون‌ها بر روی مولکول‌های هوا تأثیر گذاشته و باعث حرکتشان می‌شود. اولین مشاهده جریان الکتروهیدرودینامیک توسط هاکزبی صورت گرفت، وی متوجه تولید جریان هوایی با سرعت کم هنگام اعمال ولتاژ بین دو الکتروود شد که بعدها این پدیده "باد الکتریکی" نامیده شد [۱].

مدل کلاسیک برای تخلیه‌ی کرونا در پیکربندی نقطه-صفحه که توسط آتن و آدمیاک مورد استفاده قرار گرفت. مدلی با دو الکتروود با شعاع‌های متفاوت بود که هوا بین آنها قرار می‌گرفت. الکتروود نوک‌تیز دارای ولتاژ بالای مثبت بود [۲]. در سال ۲۰۱۷، پرواد و همکاران، دو نیروی الکتروهیدرودینامی تولید شده توسط پیکربندی الکتروود سیم-سیلندر تحت ولتاژ بالا دی سی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها توانستند اثرات آیرودینامیکی استفاده از عملگر کرونا را بر روی سطح هواپیما بدون سرنشین فوق سبک بررسی کنند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به تغییرات در شکل عملگر و مدار الکتریکی آن، استفاده از آن امکان پذیر و مقرون به صرفه است [۳]. در سال ۲۰۱۸ برای نخستین بار دنیل درو و همکارانش، یک میکروروبات را با استفاده از نیروی پیشران حاصل از تخلیه کرونا با حسگر پردازنده و بدون نیاز به بخش متحرک به پرواز درآوردند. آنها ربات مورد نظر را به صورت کاملاً کنترل شده به پرواز درآوردند و ویژگیهای مختلف آن را بررسی کردند [۴-۶].

در سال ۲۰۲۳، مهندسان دانشگاه ام‌ای تی پهباد یونی بدون قطعه متحرک با جرم ۲٫۳ کیلوگرم را ارتقاء دادند که پیشران این پهباد کاملان یونی با یک بال ۵ متری شامل امیترها و کالکتورها به صورت خطی بود، امیتر یک سیم طولی و کالکتورها فویل آلومینیومی بودند بدنه پهباد دارای تجهیزاتی برای منبع تغذیه و تجهیزات اویونیک بود ساختند [۷].

در سال ۲۰۲۳، یک شرکت مستقر در تگزاس آمریکا^۳ محصولی با نام ونوس خاموش را توسعه داد که زمان تقریبی پرواز آن در حالت خوشبینانه حدود ۵ دقیقه بوده اما این شرکت در سال های آتی زمان پرواز آن را تا ۱۵ دقیقه افزایش خواهند داد و صدای تولیدی را تا ۷۰ دسی بل کاهش می‌دهند [۸].

در سال ۲۰۲۳، آقای پارک و همکارانش با تحقیق بر روی فرود پهباد متوجه شدند که مقدار قابل توجهی از ضربه باید توسط پایه و ارا به فرود جذب شود از این رو یک پایه با ویژگی‌هایی همچون ظرافت بالا برای انرژی کرنش الاستیک، استحکام بالا، سفتی متوسط و وزن سبک از جنس پلاستیک ای بی اس ساختند که که جرم معادل ۲ کیلوگرم و سرعت ۱٫۵ متر بر ثانیه را تحمل کند [۹].

در سال ۲۰۲۳، آقای رومانو و همکارانش موفق به ساخت یک پیشران یونی (پلاسمایی) جهت قرار گیری در مدار نزدیک سطح زمین^۴ می‌شوند که مبتنی بر فرکانس رادیویی آر اف بوده و که با استفاده از یک آنتن امکان به حداقل رساندن نیاز به برق را فراهم می‌کند و در عین حال عملکرد تراسر را بهبود می‌بخشد و نیاز به توان ورودی بسیار پایین حدود ۶۰ وات را دارد [۱۰].

در سال ۱۳۹۸، حبیبی و همکاران، به بررسی تأثیر عملگر پلاسمای کرونا در انتقال حرارت پرداختند. در این پژوهش، میدان جریان سیال و دما روی یک شکاف تحت تأثیر میدان الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ بالا در شرایط دوعدی، مغشوش، غیرقابل تراکم و پایدار به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. آنها به این نتیجه رسیدند، که با افزایش عدد رینولدز، افزایش ضریب

^۳ -Undefined Technologies

^۴ -VLEO

انتقال حرارت در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد و کاهش فاصله الکتروود امیتر از لبه شکاف، برافزایش ضریب انتقال حرارت، توان مصرفی و افت فشار جریان تأثیرگذار است [۱۱].

در سال ۱۳۹۸، فتحی و همکارش، شبیه‌سازی عددی عملکرد پلاسمای کرونا برای درک فیزیک حاکم بر جریان پلاسمای بین دو الکتروود با پیکربندی سیم-سیلندر با آند با شعاع ۱۲/۵ میکرومتر و کاتدی با شعاع شش میلی‌متر مورد بحث و بررسی قرار دادند. در این تحقیق، مشخصات جریان ناشی از تخلیه کرونا از قبیل سرعت، نیروی پیشران، دما، جریان الکتریکی، خطوط جریان و راندمان مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفت. بدین منظور معادلات الکترواستاتیکی و معادلات ناویر استوکس به صورت کوپل و با استفاده از روش المان محدود حل شدند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، که بیشترین مقدار خطا در اندازه‌ی جریان الکتریکی، نیروی پیشران و راندمان نیروی پیشران در مقایسه با مقادیر تجربی به ترتیب کمتر از ۱۴/۲ و ۶ درصد می‌باشند [۱۲].

در سال ۱۴۰۱، زمانی و همکاران، طراحی و ساخت یک بالارونده با استفاده از عملگرهای کرونا را مورد بررسی قرار دادند و سه نوع آرایش مختلف بالارونده، شامل مدل مثلثی، مربعی و مدل سه ضلعی با راس مشترک، ساخته و به پرواز درآمدند و نتایج مربوط به اندازه‌گیری نیروی پیشران، توان الکتریکی و ضریب اثربخشی بر حسب ولتاژ در دو تخلیه کرونا مثبت و منفی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و در نتیجه میزان تغییرات نیروی پیشران به ازای افزایش هر کیلوولت ولتاژ اعمالی، به صورت میانگین در نمونه مثلثی برای کرونا مثبت، ۲۰ درصد و در کرونا منفی، ۱۴ درصد، در نمونه مربعی برای کرونا مثبت، ۲۵ درصد و در کرونا منفی، ۲۸ درصد و برای نمونه سه ضلعی با راس مشترک برای کرونا مثبت، ۲۷ درصد و در کرونا منفی، ۲۸ درصد افزایش می‌یابد [۱۳].

در سال ۱۴۰۲، باباصفری و همکاران به بررسی تجربی تأثیر محرک کرونا بر جریان سیال و اختفاء راداری پرداختند که با استفاده از دو مدل مختلف از نحوه قرارگیری عملگر کرونا به دست آمد. یکی از نتایج مهمی که در بخش رادارگریزی دریافت شد، کاهش سطح مقطع راداری تا ۱۴،۲۳ درصد با کمک عملگر کرونا بود. همچنین، در بخش آیرودینامیکی، نتایج مربوط به اندازه‌گیری نیروی پیشران، توان الکتریکی و میزان جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ در دو تخلیه کرونا مثبت و منفی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، با افزایش میزان ولتاژ، میزان توان مصرفی و جریان الکتریکی و میزان نیروی پیشران الکتریکی در دو مدل افزایش یافت [۱۴].

۱-۱. مکانیسم عملکرد کرونا مثبت و منفی

اگر آند، امیتر باشد، پلاسمای یک کرونا مثبت است. اگر کاتد، امیتر باشد، پلاسمای یک کرونا منفی است. مکانیسم‌هایی که توسط آن یونیزاسیون پیوسته حفظ می‌شود، بین دو قطب متفاوت است که منجر به خواص متفاوتی می‌شود کرونا هر دو قطب، ابتدا توسط یک یونیزاسیون خارجی، مانند تحریک توسط فوتون هادی فرابنفش یا امواج فرکانس رادیویی که الکترون اولیه ایجاد می‌کند، مشتعل می‌شود.

در مورد کرونا منفی، این الکترون توسط نیروی قوی به سمت امیتر جذب می‌شود و منجر به برخورد یون‌ها با ذرات خنثی و شروع بهمن الکترونی می‌شود. در پلاسمای به وجود آمده، فوتون‌ها آزاد می‌شوند و باعث درخشش ضعیف می‌شود. این فوتون‌ها، ممکن است به صورت جریان‌های کاتدی جهت‌دار ظاهر شوند، سپس باعث یونیزاسیون بیشتر در هوای خنثی اطراف می‌شوند. پلاسمای شروع یک سری از بهمن‌های الکترون ثانویه است. یون‌های مثبت ایجاد شده در بهمن و یونیزاسیون از امیتر دفع می‌شوند

و در نهایت، از منطقه فعال خارج می‌شوند و رانش آن به سمت کالکتور شروع می‌شود. شکل زیر نشان می‌دهد که کرونا مثبت حاصل در طول امیتر یکنواخت است.

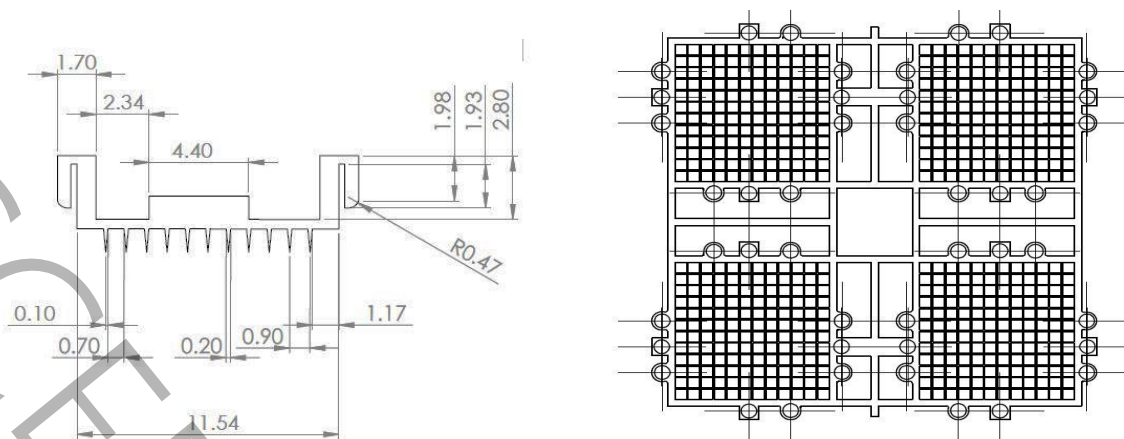
در مورد کرونا مثبت، الکترون اولیه آزاد شده توسط یونیزاسیون خارجی اولیه از امیتر دور می‌شود و دوباره بهمن الکترونی را آغاز می‌کند. با این حال، این الکترون‌های نسبت به حالت منفی، انرژی کمتری دارند، زیرا به جای اینکه به سمت داخل بروند، به سمت بیرون می‌روند و در یک گرادیان پتانسیل پایین‌تر شتاب می‌گیرند. سپس بهمن‌های الکترونی ثانویه، توسط الکترون‌هایی که در ناحیه فعال شتاب می‌گیرند، ایجاد نمی‌شوند، بلکه توسط فوتون‌ها و یون‌های مثبت که با خود امیتر برخورد می‌کنند، ایجاد می‌شوند و توسط اثر فوتوالکتریک الکترون‌های ثانویه را به بیرون ساطع می‌کنند. الکترون‌هایی که از پلاسما جدا می‌شوند با مولکول‌های الکترونگاتیو مانند اکسیژن و هیدروژن ترکیب می‌شوند و یون‌های منفی را تشکیل می‌دهند که به سمت کالکتور حرکت می‌کنند. کرونا مثبت معمولاً به صورت لکه‌هایی ظاهر می‌شوند، که در شکل زیر مشاهده می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی استفاده از تخلیه کرونا به عنوان یک پیشران یونی برای یک میکروروبات پرنده و همچنین بررسی میزان نیروی پیشران، توان مصرفی و ضریب اثربخشی در ولتاژهای متفاوت در کرونا مثبت و منفی برای یک میکروروبات در حالت یک امیتر و دوامیتر می‌باشد.

نوآوری تحقیق حاضر نسبت به نمونه‌های مشابه استفاده از پیشران با دو سری امیتر به صورت دو طبقه و همچنین بررسی حالت‌های مختلف بستن امیترها به صورت سری و موازی است و به دست آوردن نسبت تراست به وزن بیشتر در حالت دوامیتری می‌باشد در صورتی که در نمونه‌های مشابه همواره از حالت‌های تک امیتری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

در این مقاله، عملکرد یک میکروروبات پرنده در مقیاس کوچک مورد بررسی قرار گرفت. این یونوکرافت از یک سیم مفتولی فولادی با قطر ۰/۲ میلی‌متر و مشخصات تعیین شده (پاورقی)^۵ به عنوان امیتر (ساطع‌کننده) استفاده شده است. ابعاد میکروروبات پرنده، ۵ سانتی‌متر در ۵ سانتی‌متر و جرم آن حدود ۱/۱۵ گرم است که از پیکربندی صفحه و سوزن تهیه شده است. مواد مورد استفاده در صفحه و پایه سوزن‌ها از آلومینیوم تی ۳ با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و همچنین پایه‌های جداکننده از زمین از سبک‌ترین چوب بالسا موجود تهیه شده است. طریقه ساخت این صفحه و سوزن با دستگاه لیزرکات دیاموند لیزر انجام شده است، که از دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. میکروروبات پرنده از سه جزء کالکتور، امیتر و پایه می‌باشد. نقشه‌های این پیشران به صورت شکل ۱ ارائه شده است که به صورت فایل اتوکد آماده شده و با دستگاه لیزر ساخته شده است. کلیه آزمایشات در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد، فشار محیط و رطوبت ۳۰ درصد انجام شده است. وزن نمونه که پارامتر مهمی در انجام محاسبات مربوطه است، در پیشران با یک سری امیتر (نمونه اول)، ۱/۱۵ گرم و در پیشران با دو سری امیتر (نمونه دوم)، ۱/۴۵ گرم بود.

⁵ -grade AISI-304L

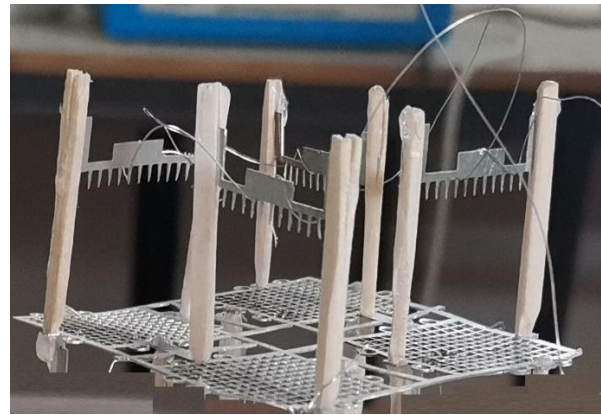
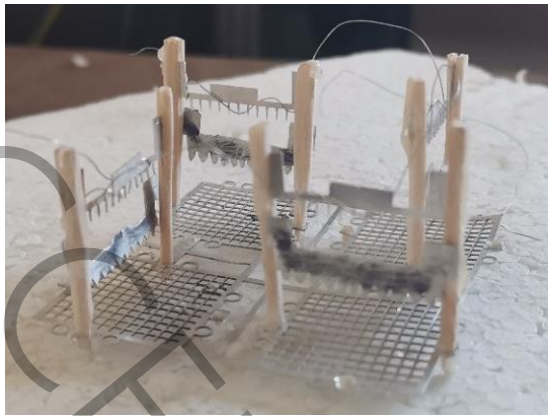


شکل ۱. نقشه شماتیک از کالکتور و امیتر

Figure 1. Schematic diagram of the collector and emitter

۱-۲. مراحل ساخت میکرو ربات تک و دو امیتری

برای طراحی و ساخت این پیشران، نمونه‌های مشابه خارجی مربوط به مراجع [۴-۶] مورد بررسی قرار گرفت. سپس با بررسی این نمونه‌ها مشخص گردید، آلیاژ استفاده شده برای کالکتور و امیترها از جنس آلومینیوم و جنس پایه‌های متصل کننده کالکتور به امیترها از جنس سیلیکون است با سعی خطا و استفاده از آلیاژهای مختلف فلز آلومینیوم (تی ۳، ۱۱۰۰، ۲۰۲۴، ۷۰۵۰ و ۷۰۷۵) از نظر قابلیت شکل دهی و جرم ایده آل تنها آلیاژ کاربردی برای این تحقیق آلومینیوم تی ۳ تأیید شد تا یک جرم بهینه برای کالکتور جرم بهینه و استحکام لازم برای امیتر در این مدل پیشران به دست آمد، سپس این پیشران ابتدا در سایز ۵/۷×۵/۷ سانتی‌متر (نمونه مشابه خارجی ۲×۲ سانتی‌متر) طراحی گردید. ابتدا با آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰، شروع ساخت دستی امیترها روی نقشه ۱-۱ امیترها مطابق شکل ۱ ساخته شد که نمونه اولیه به علت نرم بودن این مدل آلیاژ آلومینیوم ناموفق بود. سپس از آلیاژ T3 با ضخامت ۰٫۱ میلی‌متر استفاده شد که این نمونه موفقیت آمیز بود. یک سری کالکتور و یک سری امیتر با لیزر ساخته شد. سپس پایه‌های پیشران را از جنس چوب بالسا با سبک‌ترین تراکم ساخته شد، امیترها را در فاصله‌های ۳/۵، ۳/۳ و ۳ سانتی‌متر از صفحه قرار داده شد. در این حالت، کرونا به سختی تشکیل شد. سپس در فاصله ۱/۵ سانتی‌متری این عمل را تکرار شد که همان ولتاژهای اولیه سازه شروع به جرقه زدن کرد. این کار را با فاصله‌های ۱/۷۵، ۱/۷۵۹ و ۲/۲ سانتی‌متر امتحان شد که نتایج نیروی پیشران کم‌کم رو به بهبود بود که نهایتاً در فاصله ۲/۴ سانتی‌متر فاصله بهینه سازه با جرم ۱/۱۵ گرم به دست آمد، که در شکل ۲ نمایش داده شده است. سپس تعداد امیترها به دو سری افزایش داده شد و با نتایج به دست آمده مشخص شد که فاصله بهینه، نقطه‌ای است که مرکز دو سری امیتر باید ۲/۶۵ سانتی‌متر از صفحه فاصله داشته باشد. در نهایت دو پیشران تک و دو امیتری (سری) را با آلومینیوم تی ۳ ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت (لازم به ذکر است برای رسیدن به این فاصله بیش از ۲۰ تا ۲۵ بار فاصله امیترها از کالکتورها تغییر یافته تا فاصله بهینه جهت تولید بیشترین نیروی تراست بدست آید). به دلیل ولتاژ و فرکانس بالای عملکردی محرک پلاسمایی، همواره تابش امواج الکترومغناطیس از سیستم محرک پلاسمایی و سیم‌های انتقال ولتاژ صورت می‌گیرد، به منظور جلوگیری از این آثار بر روی ترازوی دیجیتالی و خراب شدن آن، ترازو درون قفس فارادی مانند شکل ۳، قرار داده شده است. در مقالات [۴ و ۶] نمونه ۲*۲ سانتی‌متر ساخته شده اما در این تحقیق ما علاوه بر ساخت نمونه ۲*۲ سانتی نمونه ۳*۳ سانتی و ۷/۵*۷/۵ سانتی‌متر را نیز ساختیم که بهینه‌ترین حالت برای ساخت همین نمونه ۵٫۶*۵٫۶ سانتی‌متری بود همچنین در این تحقیق ما نمونه ای با ۲ سری امیتر بررسی شد که نسبت به حالت تک امیتری ساخته شده در مقالات [۴ و ۶]، ۷۳ درصد تراست بیشتری را در کرونا منفی تولید گردید.



شکل ۲: پیشران تک امیتر و دو امیتری

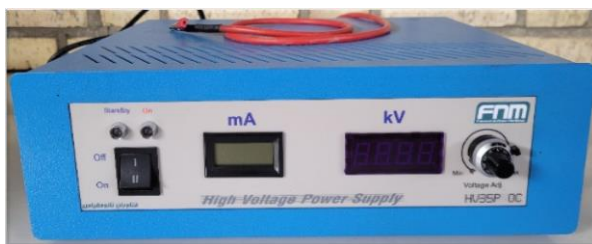
Figure 2. Single-emitter and double-emitter thrusters

۳. ابزار و تجهیزات مورد نیاز آزمایشگاهی

۳-۱. اندازه گیری ولتاژ و جریان الکتریکی

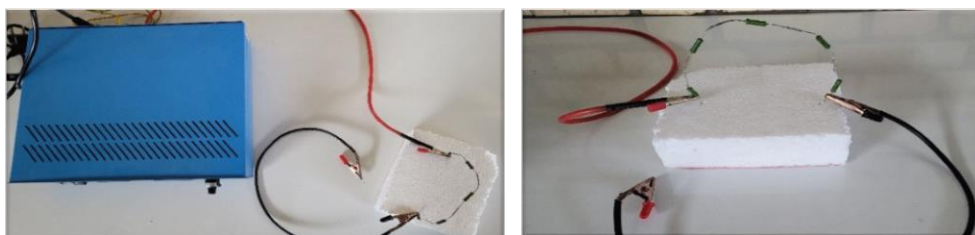
۳-۱-۱. منبع تغذیه ولتاژ بالا

برای ایجاد یک تخلیه کرونا مورد نیاز برای تولید نیروی پیشران باید از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا که ولتاژ مستقیم تولید می کند، استفاده کرد. منابعی که هم قابلیت تولید پولاریته مثبت و هم پولاریته منفی را داشته باشند. این منابع که به صورت دو دستگاه جدا مثبت و منفی با ولتاژ ورودی ۱۰۰-۲۴۰ ولت، تک فاز، ۵۰-۶۰ هرتز و ولتاژ خروجی مثبت ۳۵ کیلوولت و منفی ۳۵ کیلوولت و همچنین توان دستگاه ۳۵ وات می باشد که دارای نمایشگر ولتاژ خروجی با دقت دهم کیلوولت (۱۰۰ ولت) و نمایشگر جریان خروجی با دقت هزارم میلی آمپر می باشد. شکل ۳ تصویری از منبع تغذیه مثبت و شکل ۲-۳، تصویری از منبع تغذیه منفی نشان داده شده است. قابل ذکر است که ایجاد آرک در خروجی ولتاژ (بین الکترودهای لیفتر) باعث عبور جریان الکتریکی بیشتر از حد مجاز میکرو آمپر خواهد شد که می تواند منجر به خرابی میکرو آمپر و حتی ولت متر شود. لذا برای جلوگیری از وقوع این حادثه در قسمت خروجی از ۵ عدد مقاومت با ظرفیت ۱ مگا اهم که به صورت سری به هم متصل شده اند، استفاده شده است، که در شکل ۴ نشان نشان داده شده است.



شکل ۳: منبع تغذیه ولتاژ بالا مثبت و منفی

Figure 3. Positive and negative high voltage power supply



شکل ۴. پنج عدد مقاومت با ظرفیت ۱ مگا اهم که به صورت سری به هم متصل شده‌اند.

Figure 4. Five 1 mega ohm resistors connected in series

۳-۱-۲. اسیلوسکوپ

اسیلوسکوپ یک دستگاه اندازه گیری است که از آن برای مشاهده شکل موج ها و اندازه گیری ولتاژ، زمان تناوب، اختلاف فاز و همچنین مشاهده منحنی مشخصه ولت-آمپر عناصر نیمه هادی مانند دیود و ترانزیستور استفاده می شود. اسیلوسکوپ، در حقیقت یک ولت متر دقیق است، ولی توانایی اندازه گیری جریان را به طور مستقیم ندارد و برای اندازه گیری جریان باید از روش های غیر مستقیم مانند قانون اهم استفاده کرد. یکی از مزایای اسیلوسکوپ این است که برخلاف مولتی مترهای معمولی، در فرکانس های بالا نیز به خوبی کار می کند. اندازه گیری و مشاهده شکل موج ها در اسیلوسکوپ از ولتاژ با فرکانس صفر (دی سی) شروع و به فرکانس مشخصی ختم می گردد که معمولاً اسیلوسکوپ را با این فرکانس مشخص می کنند. مثلاً اسیلوسکوپ ۴۰ مگاهرتز، یعنی اسیلوسکوپی که می تواند ولتاژهای دی سی و ای سی تا ۴۰ مگاهرتز را نمایش دهد.



شکل ۵. اسیلوسکوپ چهار کاناله

Figure 5. Four-channel oscilloscope

۳-۱-۳. پراب

برای انتقال سیگنال های الکتریکی به اسیلوسکوپ، از پراب که به آن پروب نیز می گویند استفاده می شود. سیم رابط پراب معمولاً از جنس کابل کواکسیال می باشد تا میزان نویز به حداقل برسد نوک پراب به صورت گیره ای فنری است که می توان آن را به یک نقطه از مدار وصل کرد. اگر پوشش پلاستیکی نوک پراب را برداریم، نوک آن به صورت سوزنی می شود در که در بعضی مواقع از آن استفاده می گردد. انتهای فلزی سیم رابط که به ورودی اسیلوسکوپ وصل می شود دارای یک شیار مورب است که وقتی آن را به ورودی اسیلوسکوپ وصل می کنیم و ۹۰ درجه در جهت عقربه های ساعت می چرخانیم این قطعه کاملاً به اسیلوسکوپ متصل می شود. این پراب قابلیت اندازه گیری ولتاژ تا چهل کیلوولت را دارد. همچنین سیگنال های ولتاژ و جریان اندازه گیری شده، در اسیلوسکوپ دیجیتالی ۴ کاناله^۶ قابلیت ثبت شدن را دارد.

^۶ -BNC

^۷ - GW instek GDS-2104E-100MHz



شکل ۶. پروب ولتاژ بالا

Figure 6. High voltage probe

۳-۲. اندازه‌گیری نیروی پیشران

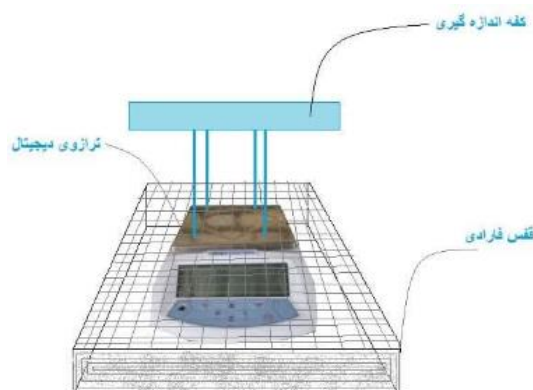
اندازه‌گیری نیروی پیشران تولیدشده به وسیله محرک پلاسمایی، پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد آن می‌باشد. برای اندازه‌گیری نیروی پیشران ترازوی دیجیتال^۸ با دقت صدم گرم برای محاسبه نیرو استفاده شده است. به دلیل ولتاژ و فرکانس بالای عملکردی محرک پلاسمایی، همواره تابش امواج الکترومغناطیس از سیستم محرک پلاسمایی و سیم‌های انتقال ولتاژ صورت می‌گیرد. به منظور جلوگیری از این آثار بر روی ترازوی دیجیتالی و خراب شدن آن، ترازو درون قفس فارادی قرارداده شده است. میزان نیروی پیشران، با استفاده از فرمول $T = m * g$ محاسبه می‌شود، که در آن g میزان شتاب گرانش زمین $\frac{m}{s^2}$ و m مقداری است که ترازو با برخورد باد تولید شده توسط پیشران الکترومغناطیسی به صفحه زیرین آن نشان می‌دهد.



شکل ۷. ترازوی دیجیتالی (EK-3200i)

Figure 7. Digital scale (EK-3200i)

⁸ - AND(EK-3200i)



شکل ۸. قفس فارادی ساخته شده جهت جلوگیری از آسیب ترازو و اندازه گیری تراست

Figure 8. Faraday cage constructed to prevent damage to the balance and to measure thrust.

جدول ۱. میزان دقت تجهیزات استفاده شده

Table 1. Accuracy of the equipment used

دستگاه		دقت	واحد
منبع تغذیه	ولتاژ	۰/۰۱	کیلو ولت
	جریان	۰/۰۰۱	میلی آمپر
ترازو		۰/۰۰۱	گرم
اسیلوسکوپ		۰/۰۳	کیلو هرتز
پرآب		۰-۳۵) ۰.۳٪	کیلو ولت

۳-۳. مراحل انجام آزمایش

بعد از چیدن تجهیزات و قبل از شروع آزمایش اتصال تجهیزات بررسی می‌شود، همچنین اتصال زمین تجهیزات مثل منبع تغذیه، پرآب و ولتاژ بالا و قفس فارادی بررسی می‌شود تا مشکلی بوجود نیاید. ۲- قبل از اعمال ولتاژ، مقیاس دیجیتال را صفر می‌شود. ۳- افزایش ولتاژ را تا هنگام ایجاد کرونا ادامه داده می‌شود، با شروع تخلیه کرونا، ولتاژ را به صورت پله‌ای و در مقیاس کیلوولت افزایش می‌یابد و عدد نشان داده توسط مقیاس دیجیتال متناظر با هر ولتاژ را یادداشت می‌گردد. این روند را تا هنگام تخلیه الکتریکی ادامه می‌یابد. با افزایش ولتاژ، باد تولید شده نیز افزایش می‌یابد و با برخورد به صفحه قرار داده شده در زیر بالارونده، نیروی وارد شده در ولتاژ مورد نظر توسط ترازوی دیجیتال تعیین شد. ۴- سپس با کاهش ولتاژ اطمینان حاصل می‌شود که مقیاس دیجیتال صفر است. ۵- عدد نشان داده شده توسط مقیاس دیجیتال را در شتاب جاذبه (۹.۸۲ متر بر مجذورثانیه) ضرب می‌شود تا نیروی پیشران حاصل شود. ۶- در هر مرحله برای اندازه‌گیری نیرو، مراحل فوق باید انجام شود.

جهت بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی هر آزمایش، پنج بار میزان نیروی پیشران و جریان الکتریکی اندازه‌گیری شده و نتایج موردبررسی قرار گرفته است؛ تا از دقت و صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. سپس، مقادیر اندازه‌گیری شده جهت ارزیابی

میانگین گیری شده است تا یک مقدار معرف به دست آید. همچنین، درصد خطای تجهیزات در محاسبه نیروی پیشران برای ترازو ۰,۱ درصد و برای ولتاژ متناظر آن، به علت خطای اسیلوسکوپ و پراب، ۲ درصد می باشد.

۴. نتایج و تحلیل یافته ها

آزمایشات مربوط به میکروروبات با یک و دو امیتر صورت گرفت. همچنین در سه حالت، تخلیه کرونا مثبت، تخلیه کرونا منفی و تخلیه کرونا مثبت-منفی تحقیقات انجام شد. برای محاسبه تراست، از رابطه $T = m * g$ استفاده شد. نتایج حاصل از انجام آزمایشات به شرح ذیل می باشد:

۴-۱. تکرار پذیری و آزمایش عدم قطعیت طی آزمایش های مختلف

درخصوص عدم قطعیت نیز مطابق جدول ۲ چهار مرتبه آزمایش با منبع های ولتاژ مثبت و ۴ مرتبه آزمایش با منبع های ولتاژ بررسی گردید و در نهایت با توجه به دقت ترازو جهت اندازه گیری تراست و همچنین خطای انسانی در مشاهده و تفسیر داده ها در نهایت از شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده و نمودارهای خطی موجود در مقاله رسم شده است.

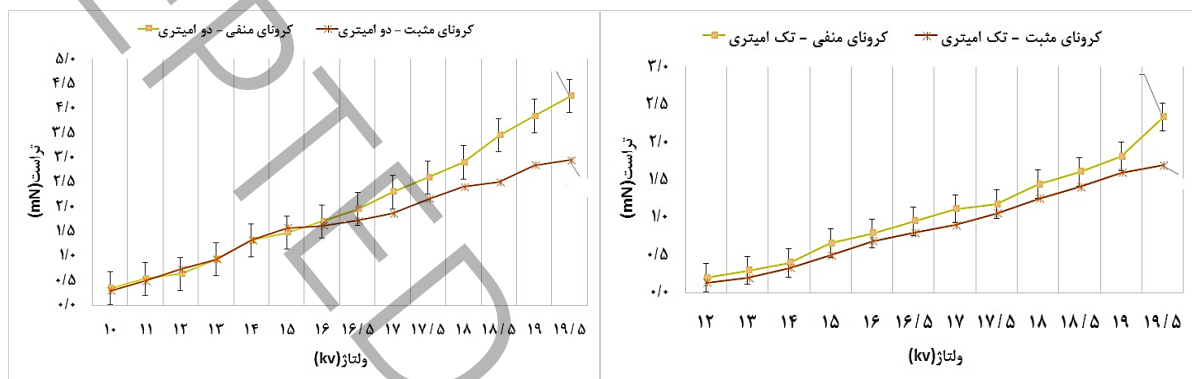
جدول ۲. مقادیر تراست به دست آمده در چهار مرتبه آزمایش برای پیشران با کرونا منفی در حالت تک و دو امیتری

Table 2. Thrust values obtained in four tests for the negative corona thruster in single and dual emitter mode

کرونا منفی							
تراست (میکروروبات دو امیتری) (mN)				تراست (میکروروبات تک امیتری) (mN)			
مرتبۀ اول	دوم	سوم	چهارم	مرتبۀ اول	دوم	سوم	چهارم
۰.۳۴۱	۰.۳۵	۰.۳۵	۰.۳۴۰	۰.۲۹۸	۰.۲۹	۰.۳	۰.۲۹۳
۰.۵۴۶	۰.۵۴	۰.۵۴	۰.۵۳۲	۰.۴۸۹	۰.۴۹۵	۰.۴۹	۰.۴۹۱
۰.۶۴	۰.۶۴	۰.۶۳	۰.۶۴۰	۰.۷۴۰	۰.۷۳۵	۰.۷۳۷	۰.۷۳۵
۰.۹۴۰	۰.۹۳	۰.۹۳	۰.۹۳۰	۰.۹۴۰	۰.۹۳	۰.۹۳۳	۰.۹۳۰
۱.۳۳۳	۱.۳۲	۱.۳۲	۱.۳۲۹	۱.۳۳۰	۱.۳۲	۱.۳۲۹	۱.۳۲۶
۱.۴۸۰	۱.۴۷	۱.۴۷	۱.۴۷۶	۱.۵۷۰	۱.۵۷۳	۱.۵۷۵	۱.۵۶۵
۱.۷۰۰	۱.۷۱	۱.۷	۱.۷۰۲	۱.۶۲۵	۱.۶۲	۱.۶۱	۱.۶۳۰
۱.۹۵۲	۱.۹۵	۱.۹۶	۱.۹۴۸	۱.۷۲۰	۱.۷۲۱	۱.۷۱۸	۱.۷۱۵
۲.۳۰۵	۲.۳	۲.۳	۲.۳۰۰	۱.۸۷۰	۱.۸۶۵	۱.۸۶	۱.۸۶۸
۲.۵۹۵	۲.۶	۲.۶۱	۲.۵۹۸	۲.۱۵۶	۲.۱۶۳	۲.۱۶۲	۲.۱۶۰
۲.۹۰۱	۲.۹۱	۲.۹	۲.۹۰۸	۲.۴۱۰	۲.۴	۲.۴۱	۲.۴۰۵
۳.۴۵۰	۳.۴۶	۳.۴۴	۳.۴۵۹	۲.۵۱۰	۲.۵	۲.۵۰۱	۲.۵۰۴
۳.۸۵۰	۳.۸۴	۳.۸۵	۳.۸۴۰	۲.۸۵	۲.۸۴	۲.۸۵۱	۲.۸۴۹
۴.۲۴۵	۴.۲۵	۴.۲۶	۴.۲۴۵	۲.۹۵	۲.۹۴۹	۲.۹۴	۲.۹۴۳

۴-۲. مقایسه نیروی پیشران بدست آمده از میکروروبات با یک و دو سری امیتر

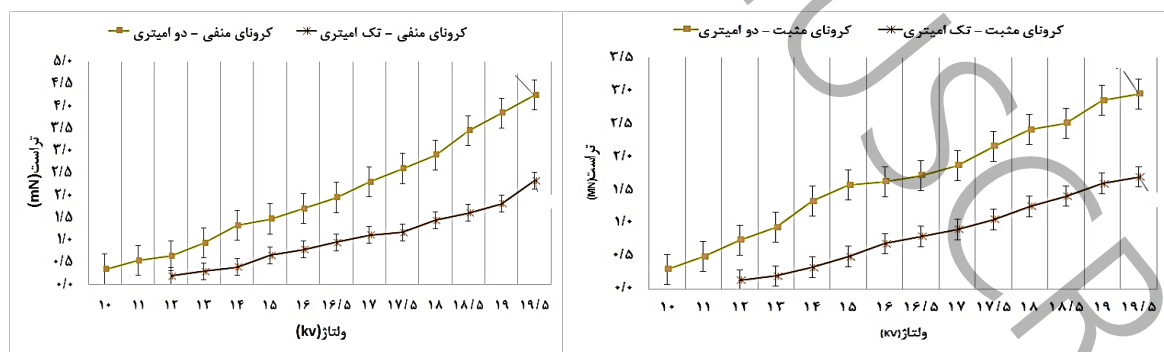
با توجه به نمودارهای شکل ۹ تا قبل از تشکیل کرونا، نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا، نیروی پیشران افزایش می‌یابد. همانگونه که در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد، در حالت تک امیتری در ولتاژ ۱۰ کیلوولت با شروع تخلیه کرونا و با افزایش ولتاژ تا ۱۹٫۵ کیلوولت، افزایش نیروی پیشران مشاهده می‌شود. میزان نیروی پیشران در کرونای منفی ۴۶ درصد بیشتر از کرونای مثبت است. در کرونای مثبت، تقریباً با افزایش ولتاژ به میزان یک کیلوولت، ۰٫۲۳ میلی نیوتن به میزان نیروی پیشران افزایش می‌یابد. همچنین در حالت دو امیتری میزان نیروی پیشران، در کرونای منفی ۴۴ درصد بیشتر از کرونای مثبت است. زیرا در کرونای منفی، تقریباً با افزایش ولتاژ به میزان یک کیلوولت، ۰٫۳۸ میلی نیوتن میزان نیروی پیشران افزایش می‌یابد.



شکل ۹. نمودار نیروی تراست برحسب ولتاژ در میکروروبات تک و دو سری امیتری جهت مقایسه در کرونای مثبت و منفی

Figure 9. Thrust force versus voltage diagram for single and double emitter series micro robots for comparison in positive and negative corona

در شکل ۱۰، نمودار تغییرات نیروی پیشران مربوط به سیستم‌های پیشران یک و دو امیتری در دو کرونای مثبت و منفی مقایسه شده‌است. از مقایسه دو نمودار شکل ۱۰ نیز می‌توان نتیجه گرفت که میزان تولید نیروی پیشران، در پیشران‌ش با دو سری امیتر در حالت کرونای منفی، ۷۹ درصد بیشتر از پیشران‌ش با یک سری امیتر است. در کرونای مثبت نیز میزان نیروی پیشران، در حالت دو امیتری ۷۳ درصد بیشتر از حالت تک امیتری است و این امر ممکن است به علت افزایش میزان یونیزاسیون تشکیل شده بین کالکتور و امیترها باشد.

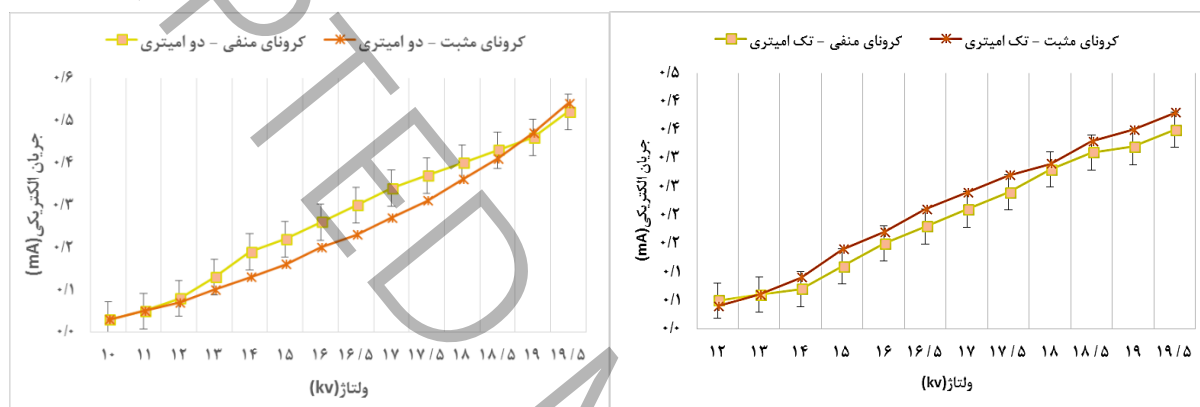


شکل ۱۰. نمودار نیروی پیشران برحسب ولتاژ در دو کرونای مثبت و منفی جهت مقایسه میکروروبات تک و دو سری امیتری

Figure 10. Thrust force diagram in terms of positive and negative corona voltage in single and double emitter thrusters

۳-۴. مقایسه میزان جریان الکتریکی در میکروروبات با یک و دو سری امیتری

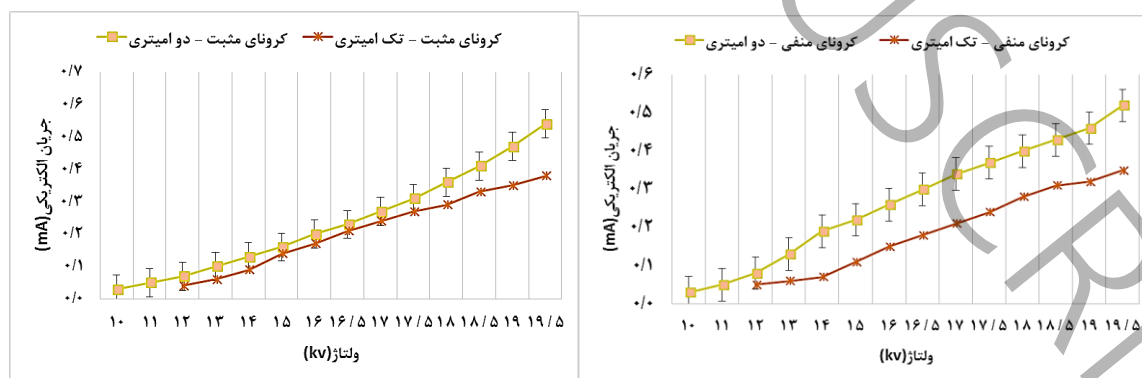
در شکل ۱۱، نمودار تغییرات جریان الکتریکی برحسب ولتاژ برای دو میکروروبات یک و دو امیتری برای دو کرونا مثبت و منفی نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می گردد، تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی شود و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا، جریان الکتریکی افزایش می یابد. در حالت تک امیتری، جریان الکتریکی با کرونا مثبت ۸ درصد بیشتر از کرونا منفی است. در میکروروبات تک امیتری، تقریباً با افزایش ولتاژ یک کیلوولت، ۰٫۰۵ میلی آمپر جریان الکتریکی افزایش می یابد. همچنین جریان الکتریکی در حالت دو امیتری در کرونا مثبت به میزان ۴ درصد بیشتر از کرونا منفی است. در میکروروبات دو امیتری، تقریباً با افزایش ولتاژ هر کیلوولت، ۰٫۰۸ میلی آمپر جریان الکتریکی افزایش می یابد.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات جریان الکتریکی برحسب ولتاژ برای میکروروبات تک و دو سری امیتری جهت مقایسه در کرونا مثبت و منفی

Figure 11. Diagram of changes in electric current as a function of voltage in the positive and negative corona for single and double emitter thrusters

در شکل ۱۲، به مقایسه نمودار تغییرات جریان الکتریکی برحسب ولتاژ، در دو کرونا مثبت و منفی برای مقایسه عملکرد میکروروبات تک و دو امیتری پرداخته شده است. از مقایسه دو نمودار شکل ۱۲ می توان نتیجه گرفت که میزان تغییرات جریان الکتریکی، در کرونا منفی حالت دو امیتری، ۴۸ درصد بیشتر از حالت تک امیتری است. همچنین، در کرونا مثبت حالت دو امیتری، میزان جریان الکتریکی ۴۲ درصد بیشتر از حالت تک امیتری است.

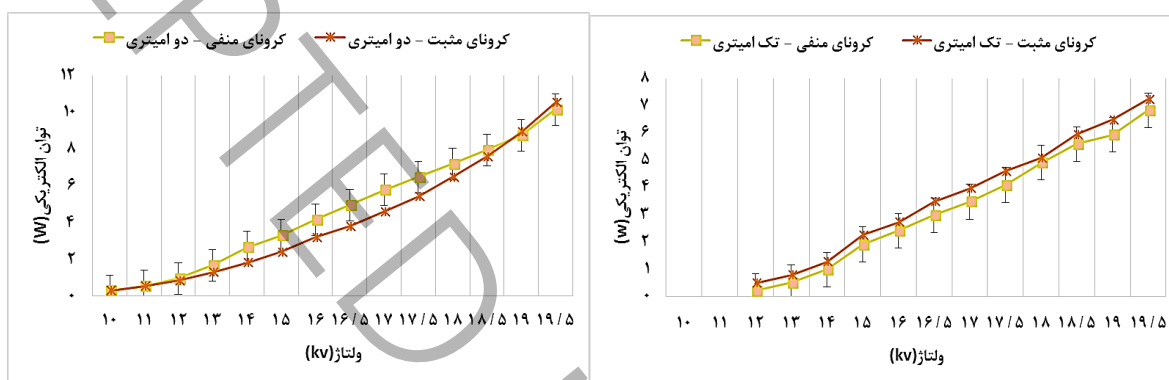


شکل ۱۲. نمودار میزان جریان الکتریکی برحسب ولتاژ برای میکروروبات یک و دو امیتری برای مقایسه دو تخلیه کرونا مثبت و منفی

Figure 12. Electric current versus voltage diagram for single and double emitter thrusters for comparing positive and negative corona discharges

۴-۴. مقایسه میزان توان الکتریکی برای میکروروبات‌ها با یک و دو سری امیتر

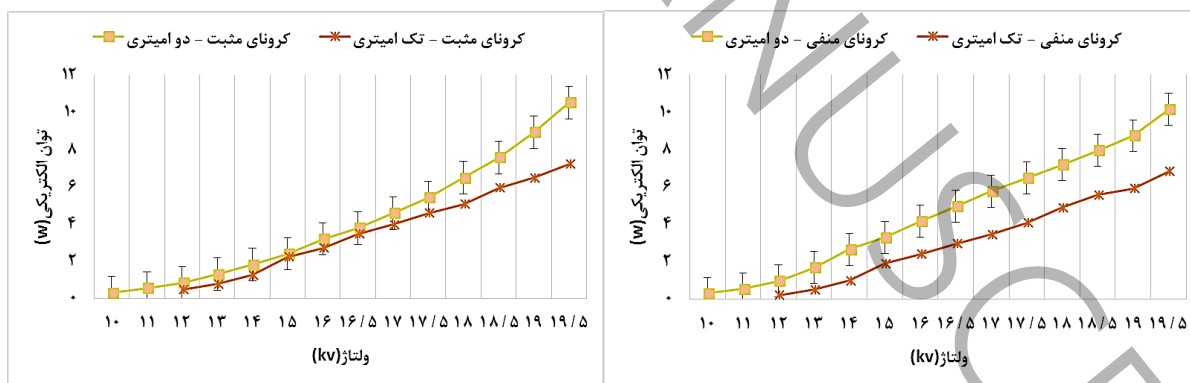
نحوه محاسبه توان الکتریکی مصرفی با استفاده از رابطه $P = V * I$ به دست می‌آید، که V میزان ولتاژ الکتریکی و I میزان جریان الکتریکی است. نمودار توان الکتریکی بر حسب ولتاژ برای میکروروبات یک و دو امیتری برای دو کرونا مثبت و منفی در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی تراست مشاهده نمی‌شود، بطبع توان الکتریکی مصرفی صفر است و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا، توان الکتریکی مصرفی افزایش می‌یابد. در حالت تک‌امیتری، توان الکتریکی مصرفی در کرونا مثبت ۶ درصد بیشتر از کرونا منفی است. تقریباً با افزایش یک کیلوولت ولتاژ، توان مصرفی به میزان ۱/۲ وات افزایش می‌یابد، همچنین توان الکتریکی مصرفی در تخلیه کرونا مثبت ۴ درصد بیشتر از تخلیه کرونا منفی است. همچنین در کرونا مثبت، با افزایش هر یک کیلوولت ولتاژ، توان مصرفی به میزان ۱/۵۲ وات افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳. نمودار میزان توان الکتریکی بر حسب ولتاژ برای میکروروبات تک و دو سری امیتری برای کرونا مثبت و منفی

Figure 13. Electrical power versus voltage diagram for single and double emitter thrusters in positive and negative corona

در شکل ۱۴، هدف مقایسه میکروروبات تک و دو امیتری برای تخلیه کرونا مثبت و منفی است. می‌توان نتیجه گرفت که میزان تغییرات توان الکتریکی مصرفی، در تخلیه کرونا منفی دو امیتری به میزان ۴۸ درصد بیشتر از حالت تک‌امیتری است. همچنین در تخلیه کرونا مثبت، حالت دو امیتری ۴۵ درصد بیشتر از حالت تک‌امیتری است.



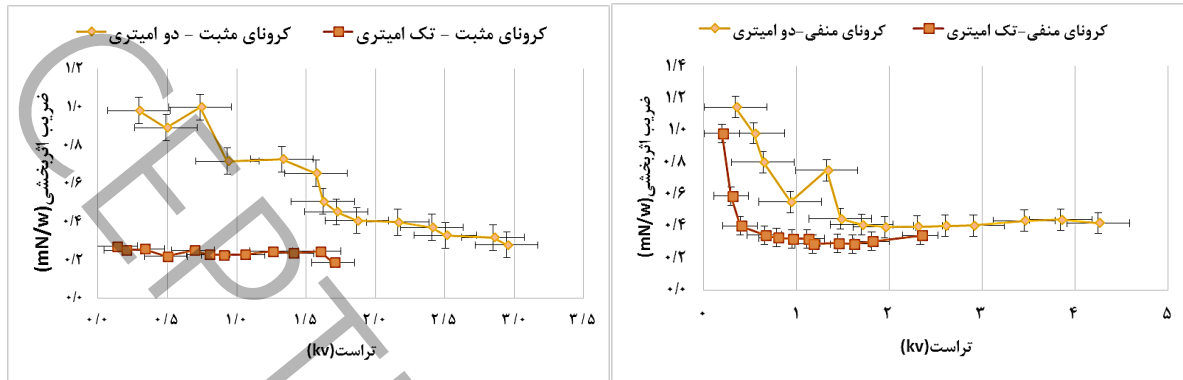
شکل ۱۴. نمودار میزان توان الکتریکی بر حسب ولتاژ در دو کرونا مثبت و منفی برای مقایسه میکروروبات تک و دو سری امیتری

Figure 14. Diagram of electrical power versus voltage in two positive and negative coronas for comparing single and double emitters

۴-۵. مقایسه میزان ضریب اثربخشی میکروروبات با یک و دو سری امیتری

نحوه محاسبه ضریب اثربخشی با استفاده از رابطه $\eta = \frac{T}{P}$ به دست می‌آید، که T میزان نیروی پیشران و P میزان توان مصرفی است. در شکل ۱۵، به مقایسه میزان ضریب اثربخشی برای حالت یک و دو امیتری در هر دو کرونا مثبت و منفی پرداخته شده

است. در هر دو نمودار شکل ۱۵ مشخص است، که با افزایش میزان توان مصرفی، علی‌رغم افزایش میزان نیروی پیشران، ضریب اثربخشی کاهش می‌یابد. در تخلیه کرونا منفی، ضریب اثربخشی حالت تک امیتری با شیب بیشتری از دو امیتری در حال کاهش است، در تخلیه کرونا مثبت نیز روند کاهش ضریب اثربخشی در حالت دو امیتری بسیار سریعتر از حالت تک امیتری است.



شکل ۱۵. نمودار ضریب اثر بخشی بر حسب نیروی پیشران برای میکروربات تک و دو سری امیتری جهت مقایسه در کرونا مثبت و منفی

Figure 15. Diagram of the efficiency coefficient in terms of propellant force for single and double emitter propellants in positive and negative corona

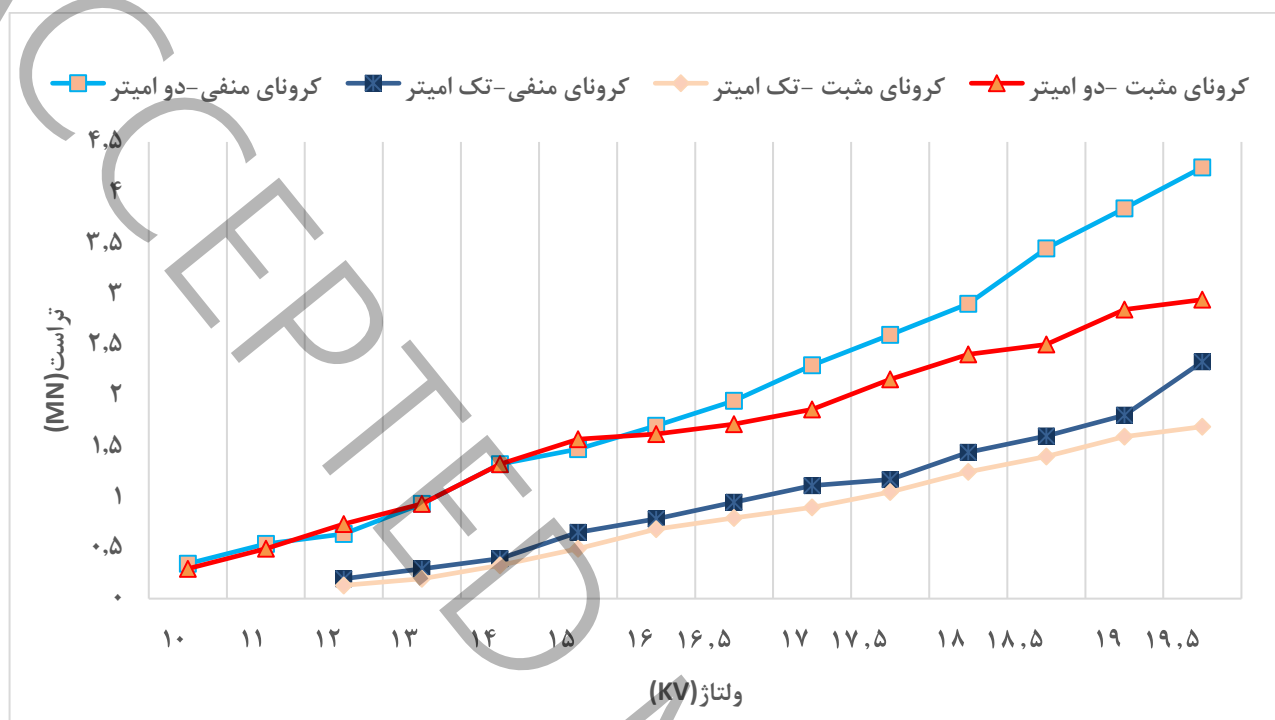
۴-۶. مقادیر میانگین تراست، جریان الکتریکی، توان الکتریکی و ضریب اثربخشی پیشران

جدول ۳. مقادیر میانگین تراست، جریان الکتریکی، توان الکتریکی و ضریب اثربخشی پیشران با کرونا مثبت و منفی در حالت تک و دو امیتری

Table 3. Average values of thrust, electric current, electric power, and thruster effectiveness coefficient with positive and negative corona in single and double emitter thrusters

کرونا منفی - تک امیتر								کرونا مثبت - دو امیتر							
ولتاژ (Kv)	تراست (mN)	جریان الکتریکی (mA)	توان الکتریکی (w)	ضریب اثر بخشی (mN/w)	تراست (mN)	جریان الکتریکی (mA)	توان الکتریکی (w)	ولتاژ (Kv)	تراست (mN)	جریان الکتریکی (mA)	توان الکتریکی (w)	ضریب اثر بخشی (mN/w)	تراست (mN)	جریان الکتریکی (mA)	توان الکتریکی (w)
۱۰								۱۰	۰.۳۴۴	۰.۰۳	۰.۳	۰.۹۸۲	۰.۳۴۴	۰.۰۳	۰.۳
۱۱								۱۱	۰.۵۴۰	۰.۰۵	۰.۵۵	۰.۸۹۳	۰.۵۴۰	۰.۰۵	۰.۵۵
۱۲								۱۲	۰.۶۳۸	۰.۰۸	۰.۹۶	۰.۸۰۰	۰.۶۳۸	۰.۰۸	۰.۹۶
۱۳								۱۳	۰.۹۳۳	۰.۱۳	۱.۶۹	۰.۵۵۲	۰.۹۳۳	۰.۱۳	۱.۶۹
۱۴								۱۴	۱.۳۲۶	۰.۱۹	۲.۶۶	۰.۷۵۰	۱.۳۲۶	۰.۱۹	۲.۶۶
۱۵								۱۵	۱.۴۷۳	۰.۲۲	۳.۳	۰.۴۴۶	۱.۴۷۳	۰.۲۲	۳.۳
۱۶								۱۶	۱.۷۰۲	۰.۲۶	۴.۱۶	۰.۴۰۹	۱.۷۰۲	۰.۲۶	۴.۱۶
۱۶.۵								۱۶.۵	۱.۹۵۰	۰.۳	۴.۹۵	۰.۳۹۴	۱.۹۵۰	۰.۳	۴.۹۵
۱۷								۱۷	۲.۳۰۰	۰.۳۴	۵.۷۸	۰.۳۹۸	۲.۳۰۰	۰.۳۴	۵.۷۸
۱۷.۵								۱۷.۵	۲.۶۰۰	۰.۳۷	۶.۴۷۵	۰.۴۰۲	۲.۶۰۰	۰.۳۷	۶.۴۷۵
۱۸								۱۸	۲.۹۰۵	۰.۴	۷.۲	۰.۴۰۳	۲.۹۰۵	۰.۴	۷.۲
۱۸.۵								۱۸.۵	۳.۴۵۲	۰.۴۳	۷.۹۵۵	۰.۴۳۴	۳.۴۵۲	۰.۴۳	۷.۹۵۵
۱۹								۱۹	۳.۸۴۶	۰.۴۶	۸.۷۴	۰.۴۴۰	۳.۸۴۶	۰.۴۶	۸.۷۴
۱۹.۵								۱۹.۵	۴.۲۵۰	۰.۵۲	۱۰.۱۴	۰.۴۱۹	۴.۲۵۰	۰.۵۲	۱۰.۱۴
۱۰								۱۰	۰.۳۴۴	۰.۰۳	۰.۳	۰.۹۸۲	۰.۳۴۴	۰.۰۳	۰.۳
۱۱								۱۱	۰.۵۴۰	۰.۰۵	۰.۵۵	۰.۸۹۳	۰.۵۴۰	۰.۰۵	۰.۵۵
۱۲								۱۲	۰.۶۳۸	۰.۰۸	۰.۹۶	۰.۸۰۰	۰.۶۳۸	۰.۰۸	۰.۹۶
۱۳								۱۳	۰.۹۳۳	۰.۱۳	۱.۶۹	۰.۵۵۲	۰.۹۳۳	۰.۱۳	۱.۶۹
۱۴								۱۴	۱.۳۲۶	۰.۱۹	۲.۶۶	۰.۷۵۰	۱.۳۲۶	۰.۱۹	۲.۶۶
۱۵								۱۵	۱.۴۷۳	۰.۲۲	۳.۳	۰.۴۴۶	۱.۴۷۳	۰.۲۲	۳.۳
۱۶								۱۶	۱.۷۰۲	۰.۲۶	۴.۱۶	۰.۴۰۹	۱.۷۰۲	۰.۲۶	۴.۱۶
۱۶.۵								۱۶.۵	۱.۹۵۰	۰.۳	۴.۹۵	۰.۳۹۴	۱.۹۵۰	۰.۳	۴.۹۵
۱۷								۱۷	۲.۳۰۰	۰.۳۴	۵.۷۸	۰.۳۹۸	۲.۳۰۰	۰.۳۴	۵.۷۸
۱۷.۵								۱۷.۵	۲.۶۰۰	۰.۳۷	۶.۴۷۵	۰.۴۰۲	۲.۶۰۰	۰.۳۷	۶.۴۷۵
۱۸								۱۸	۲.۹۰۵	۰.۴	۷.۲	۰.۴۰۳	۲.۹۰۵	۰.۴	۷.۲
۱۸.۵								۱۸.۵	۳.۴۵۲	۰.۴۳	۷.۹۵۵	۰.۴۳۴	۳.۴۵۲	۰.۴۳	۷.۹۵۵
۱۹								۱۹	۳.۸۴۶	۰.۴۶	۸.۷۴	۰.۴۴۰	۳.۸۴۶	۰.۴۶	۸.۷۴
۱۹.۵								۱۹.۵	۴.۲۵۰	۰.۵۲	۱۰.۱۴	۰.۴۱۹	۴.۲۵۰	۰.۵۲	۱۰.۱۴

مقایسه تراست در حالت های مختلف تک و دو امیتری و همچنین کرونا ی مثبت و منفی که به بررسی یکجای حالت های مختلف بستن امیترهای پیشران می پردازد، مطابق شکل ۱۶ می باشد.



شکل ۱۶. تراست در حالت های مختلف تک و دو امیتری در کرونا ی مثبت و منفی

Figure 16. Thrust in different single and double emitter modes in positive and negative corona

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، ابتدا نمونه های ساخته شده از موارد مشابه خارجی مورد بررسی قرار گرفت که نمونه های ساخته شده در ابعاد ۲×۲ سانتی متر بود و با بررسی آنها به دست آمد که آلیاژ استفاده شده برای کالکتور و امیترها از جنس آلومینیوم و جنس پایه های متصل کننده کالکتور به امیترها از جنس سیلیکون ساخته شده، ابتدا نمونه ۵,۶×۵,۶ سانتی جهت طراحی انتخاب شد که پس از تکمیل نقشه های کالکتور و امیترها با با نرم سالید ورک و خروجی اتوکد مراحل ساخت شروع گردید: ابتدا با آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ به صورت دستی امیترها (روی نقشه ۱-۱ امیترها) ساخته شد، نمونه اولیه به علت نرم بودن این مدل آلیاژ آلومینیوم ناموفق بود که متریال جایگزین آلیاژ آلومینیوم تی ۳ با ضخامت ۰,۱ میلی متر به علت استحکام بالا و وزن پایین و کاربرد در صنایع هوایی مورد استفاده قرار گرفت که استفاده از این نمونه موفقیت آمیز بود و نتیجه بر این شد که از همین آلیاژ برای ساخت کالکتور با لیزرکات نیز استفاده شود، برای پایه های اتصال امیترها به کالکتور نیز با بررسی انواع چوب بالسا، از سبک ترین نوع این چوب (در ایرفویل هواپیماهای فوق سبک) استفاده شد و پایه های مورد نیاز را به صورت دستی ساخته شد. در نهایت، نمونه اولیه این میکروربات با یک امیتر ساخته شد و تست های مورد نیاز انجام شد، در نهایت امیترها نیز با لیزرکات ساخته شدند و آزمایش ها با ۲ سری امیتر از سر گرفته شد که نتایج حاصل از آزمایش های مختلف به شرح ذیل می باشد:

عملگرهای کرونا می تواند باعث ایجاد نیروی پیشران شود که به طور مستقیم با میزان ولتاژ ورودی آن در ارتباط است. با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته، در حالت تک امیتری در ولتاژهای برابر با کرونا ی منفی نیروی پیشران بیشتری تولید می شود، بطوری که در ولتاژ ۱۹ کیلوولت، میزان نیروی پیشران در کرونا ی منفی ۱۵ درصد بیشتر از کرونا ی مثبت است.

در حالت دو امیتری نیز افزایش نیروی پیشران در کرونا منفی بیشتر از کرونا مثبت است، به طوری که در ولتاژ ۱۹.۵ کیلوولت، نیروی پیشران در کرونا منفی، ۴۴ درصد بیشتر از کرونا مثبت است. همچنین در کرونا منفی میزان تولید نیروی پیشران، در میکروربات با دو سری امیتر در حالت کرونا منفی ۷۹ درصد بیشتر از میکروربات با یک سری امیتر در کرونا منفی است.

در کرونا مثبت نیز میزان نیروی پیشران، در میکروربات با دو سری امیتر در حالت کرونا منفی ۷۳ درصد بیشتر از پیشران با یک سری امیتر در همین کرونا منفی است. تمامی نتایج فوق بر این امر دلالت دارد که پیشران با دوسری امیتر علی رغم اینکه وزن بیشتری نسبت به حالت تک امیتری دارد، تراست قابل توجهی نسبت به حالت تک امیتری تولید می کند و نمونه بهینه تری است.

۲- با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی و در نتیجه توان الکتریکی مصرفی به صورت سهموی افزایش می یابد. در پیشران تک امیتری در حالت کرونا مثبت، شیب افزایش توان الکتریکی بیشتر است، به طوری که مقدار توان الکتریکی مصرفی در حالت تک امیتری با تخلیه کرونا مثبت ۲۳ درصد بیشتر از تخلیه کرونا منفی است.

در حالت دو امیتری نیز در کرونا مثبت، ابتدا میزان توان الکتریکی به علت پایین بودن جریان الکتریکی تا ولتاژ ۱۵ کیلوولت از میزان توان الکتریکی در حالت کرونا منفی کمتر است. اما از این ولتاژ به بعد به علت بیشتر بودن شیب جریان در کرونا مثبت، میزان توان الکتریکی نیز بیشتر از حالت کرونا منفی می شود.

۳- در حالت تک امیتری در کرونا منفی با افزایش نیروی پیشران، میزان ضریب اثربخشی کاهش می یابد. در حالت دو امیتری، روند کاهش ضریب اثربخشی در تخلیه کرونا منفی سریعتر از تخلیه کرونا مثبت صورت می گیرد. میزان کاهش ضریب اثر بخشی تخلیه کرونا مثبت ۲.۵ برابر تخلیه کرونا منفی است که در نهایت، ۵۰ درصد کمتر از کرونا منفی می رسد.

در نهایت در کرونا مثبت، افزایش ولتاژ در پیشران دو امیتری نسبت به تک امیتری تأثیر قابل ملاحظه ای در کاهش راندمان تولیدی توسط عملگرهای پلاسما دارد و منجر به کاهش راندمان به دست آمده از کرونا می گردد. ولی در کرونا منفی، افزایش ولتاژ در پیشران تک امیتری تأثیر بسزایی در کاهش راندمان تولیدی نسبت به پیشران دو امیتری دارد. در آخر می توان نتیجه گرفت که نمونه دو امیتری به مراتب بهینه تر از حالت تک امیتری است.

در این تحقیق با استفاده از دو سری امیتر توانستیم به تراست بیشتر و عملکرد بهتر پیشران دست پیدا کنیم و در نهایت منجر به بدست آمدن تراست مورد نیاز جهت بلند شدن میکروربات شد همچنین متوجه شدیم که از کرونا منفی برای این پیشران نتایج بهتری بدست می آید، اما افزودن هر امیتر نیازمند پایه های بلندتر عایق و اتصال این امیترها به یکدیگر می باشد که باعث کاهش نیروی رانش به وزن می شود که می توان در تحقیقات آتی این مورد را با استفاده از قفل های مکانیکی روی خود اجزا این چالش را از بین برد. همچنین دریافتیم که با کاهش مداوم فاصله الکترودها می توان راندمان یعنی میزان رانش به وزن را افزایش داد.

۶- مراجع

- [1] A. P. Chattoch, On the velocity and mass of the ions in the electricwind, in Air, Philosopical Magazine, (2005) 401-420.
- [2] K. Adamiak, P. Atten, Simulation of corona discharge in point-plane configuration, Journal of Electrostatic, 61(2) (2008) 85-98.
- [3] N. Monrolin., F. Plouraboune, O. Praud, Electrohydrodynamic thrust for in atmosphere propulsion, AIAA Journal, 55(2) (2017) 4296-4305.
- [4] D. S. Drew, Lambert, N. O., Schindler, C. B., & Pister, K. S, Toward controlled flight of the ionocraft: a flying microrobot using electrohydrodynamic thrust with onboard sensing and no moving parts, IEEE Robotics and Automation Letters, 3(4) (2018) 2807-2813.

- [5] D. S. Drew and K. J. Pister, Geometric optimization of microfabricated silicon electrodes for corona discharge-based electrohydrodynamic thruster's, *Journal of Micromachines*, 8(5) (2018) 1-13.
- [6] D. S. Drew, Contreras, and K. S. Pister, First thrust from a microfabricated atmospheric ion engine, in *Proc. IEEE 30th International Conference Electro Mechanical Systems*, January (2018).
- [7] J. Chu, MIT Engineers fly first-ever plane with no moving parts, *MIT News*, November (2023).
- [8] Undefined Technologies. Next generation silent drone, (2023).
- [9] Y. Park, Nguyen, K. Kweon, J. Choi, J. Structural analysis of a composite target-drone, *International Journal of Aeronautic Space Science*, 12(1) (2011) 84-91.
- [10] F. Romano, Herdrich, G. Crisp, N. H. Edmondson, S. Haigh, S. et al. Design of an intake and a thruster for an atmosphere-breathing electric propulsion system, *Springer Nature Link, CEASS Space Journal*, 14 (2022) 707-715.
- [11] N. Habibi, Amanifard, N. Deylami, H. M. Dolati, F. Numerical Investigation of the Effect of Corona Discharge on the Heat Transfer and Pressure Drop over a Single Slot, *Journal of Mechanical of structures and fluxes*, (2019). (In Persian)
- [12] A. Fathi, Ahangar, M. Numerical simulation of electrohydrodynamic flow produced by wire-tocylinder in atmospheric condition, *Journal of Modarres Mechanical Engineering*, 18(2) (2018) 323-330. (In Persian)
- [13] A. Zamani, Khoshkhoo, R. Hashemzadeh, G. Experimental study of three lifters using positive and negative corona discharge, *Journal of Advance Defense Sciences, Technology*, 13(4) (2023) 251-262. (In Persian)
- [14] P. Babasafari, Khoshkhoo, R. Eshraghi, H. Experimental investigation of the effect of different corona plasma actuator arrangements on the amount of thrust produced on a flat surface, *Journal of Aeronautical Engineering*, 25(1) (2023) 144-153. (In Persian)