



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.

Review History:

Received: Jun. 13, 2025
Revised: Aug. 23, 2025
Accepted: Aug. 31, 2025
Available Online: Sep. 18, 2025

Keywords:

Corona Plasma Actuator
Microrobot
Needle-Plate Configuration
Positive Corona Discharge
Negative Corona Discharge

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

*Corresponding author's email: r.khoshkhoo@mut.ac.ir



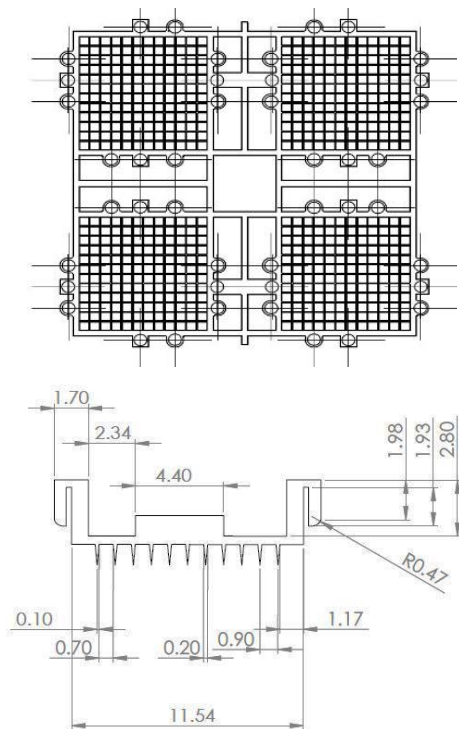


Fig. 1. Schematic diagram of the collector and emitter

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).

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

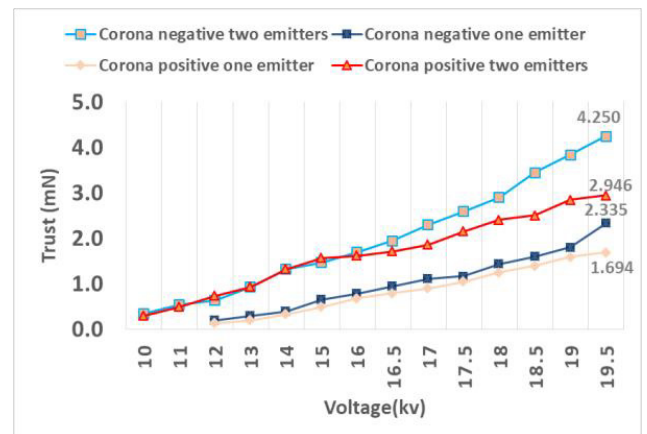


Fig. 2. Trust of single and double emitter samples in positive and negative corona

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.

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.

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.
- [4] 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.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۳
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

کلمات کلیدی:

عملگر پلاسمای کرونا
میکرو ربات
پیکربندی صفحه و سوزن
تخلیه کرونا مثبت
تخلیه کرونا منفی

خلاصه: این مقاله به طراحی و ساخت یک پیشران جهت استفاده در میکروروبات پرنده یا میکرو پهپاد با استفاده از تخلیه کرونا کنترل شده جریان الکتروهیدرو دینامیکی پرداخته است، یکی نمونه از عملگرهای پلاسمای عملگرهای پلاسمای کرونا 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 الکتروهیدرو دینامیکی مبتنی بر تخلیه عملگرهای کرونا 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 کرونا منفی، ۷۹ درصد بیشتر از حالت تک امیتری است و در حالت دو امیتری، تراست تولیدی در تخلیه کرونا منفی، ۴۴ درصد بیشتر از تخلیه کرونا مثبت می باشد، همچنین در کرونا منفی، افزایش ولتاژ در نمونه تک امیتری تاثیر بسزایی در کاهش راندمان تولیدی نسبت به پیشران دو امیتری دارد.

۱- مقدمه

مهندسی و دانشمندان هوافضا برای ایجاد تکنولوژی های جدید در حوزه طراحی و ساخت سیستم های پیشران حالت جامد و کنترل جریان، به سمت فیزیک پلاسمای سوق پیدا کرده اند. امروزه، الکتروآیرو دینامیک که در آن نیروهای الکتریکی به یون ها در سیال سرعت می بخشند، به عنوان یک روش جایگزین برای تولید نیروی پیشران پهپادهای 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 کرونا کنترل شده می تواند از طریق باردار کردن ذرات اطراف آند و انتقال مومنتوم آن ها به ذرات خنثی دورتر از آند، جریانی را ایجاد کند که به آن جریان الکتروهیدرو دینامیکی^۱ می گویند، این تخلیه کرونا 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 ی دیگر به عنوان الکتروود کالکتور رخ می دهد، که امیتر می تواند ولتاژ مثبت یا منفی داشته باشد و الکتروود دیگر، تجمع کننده (کالکتور) معمولاً به زمین وصل می شود. اگر ساطع کننده دارای بار مثبت باشد، جریان الکترون ها به سمت امیتر بازمی گردند و با برخورد به مولکول های هوا، یون های مثبت ایجاد می کند، که این یون ها توسط امیتر دفع و توسط کالکتور جذب می شوند. در سمت کالکتور، یون ها بر روی مولکول های هوا تأثیر گذاشته و باعث حرکتشان می شود. اولین مشاهده جریان الکتروهیدرو دینامیک توسط هاگزبی 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 تخلیه ی کرونا در پیکربندی نقطه-صفحه که توسط آتن و آدمیاک مورد استفاده قرار گرفت. مدلی با دو الکتروود با شعاع های متفاوت بود که هوا بین آنها قرار می گرفت. الکتروود نوک تیز دارای ولتاژ بالای مثبت بود [۲]. در سال ۲۰۱۷، پراود و همکاران، دو نیروی الکتروهیدرو دینامی تولید شده توسط پیکربندی الکتروود سیم- سیلندر تحت ولتاژ بالا دی سی

1. Electrohydrodynamic

* نویسنده عهده دار مکاتبات: r.khoshkhou@mut.ac.ir

قرارگرفت. آنها به این نتیجه رسیدند، که با افزایش عدد رینولدز، افزایش ضریب انتقال حرارت در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد و کاهش فاصله الکترودمیتر از لبه شکاف، برافزایش ضریب انتقال حرارت، توان مصرفی و افت فشار جریان تأثیرگذار است [۱۱].

در سال ۱۳۹۸، فتحی و همکارش، شبیه‌سازی عددی عملگر پلاسمای کرونا برای درک فیزیک حاکم بر جریان پلاسمای بین دو الکترودمیتر 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 برحسب ولتاژ در دو تخلیه کرونای 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 کرونای مثبت، ۲۰ درصد و در کرونای منفی، ۱۴ درصد، در نمونه مربعی برای کرونای مثبت، ۲۵ درصد و در کرونای منفی، ۲۸ درصد و برای نمونه سه ضلعی با راس مشترک برای کرونای مثبت، ۲۷ درصد و در کرونای 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 برحسب ولتاژ در دو تخلیه کرونای مثبت و منفی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت.

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 امکان‌پذیر 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 ام‌ای‌تی پهپاد یونی بدون قطعه متحرک با جرم ۲٫۳ کیلوگرم را ارتقاء دادند که پیشرانه این پهپاد کاملاً یونی با یک بال ۵ متری شامل امیترها و کالکتورها به صورت خطی بود، امیتر یک سیم طولی و کالکتورها فویل آلومینیومی بودند بدنه پهپاد دارای تجهیزاتی برای منبع تغذیه و تجهیزات اویونیک بود ساختند [۷].

در سال ۲۰۲۳، یک شرکت مستقر در تگزاس آمریکا محصولی با نام ونتوس خاموش را توسعه داد که زمان تقریبی پرواز آن در حالت خوشبینانه حدود ۵ دقیقه بوده اما این شرکت در سال‌های 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 پهپاد متوجه شدند که مقدار قابل توجهی از ضربه باید توسط پایه و ارابه 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 قرارگیری در مدار نزدیک سطح زمین^۲ 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 تراستر 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 دویعدی، مغشوش، غیرقابل تراکم و پایدار به صورت عددی مورد مطالعه

1. Undefined Technologies
2. VLEO

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].

میکروروبات پرنده و همچنین بررسی میزان نیروی پیشران، توان مصرفی و ضریب اثربخشی در ولتاژهای متفاوت در کروناهای مثبت و منفی برای یک میکرو روبات 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 دو امیتری 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) ^۱ به‌عنوان 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 جدا کننده 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.

۲-۱- 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

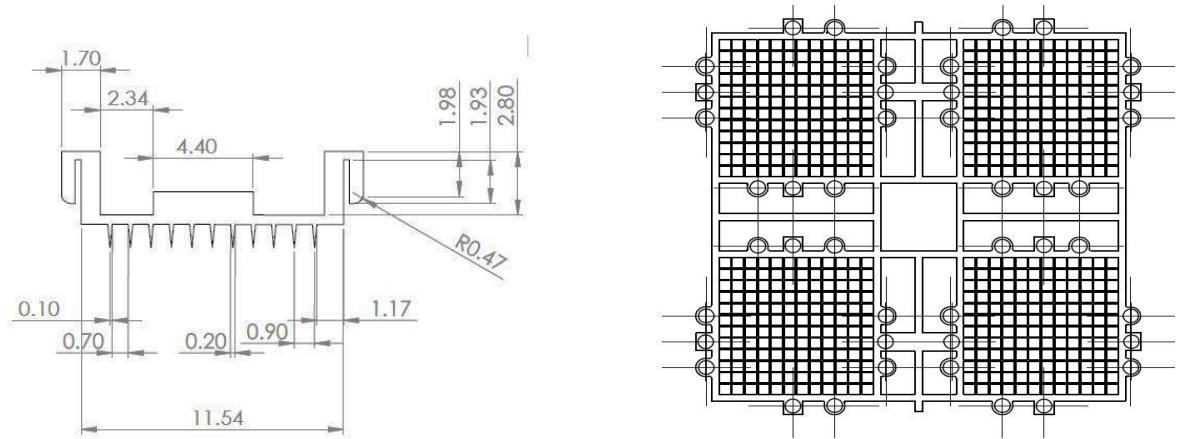
۱-۱- مکانیسم عملکرد کروناهای مثبت و منفی

اگر آند، امیتر باشد، پلاسما یک کروناهای مثبت است. اگر کاتد، امیتر باشد، پلاسما یک کروناهای منفی است. مکانیسم‌هایی که توسط آن یونیزاسیون پیوسته حفظ می‌شود، بین دو قطب متفاوت است که منجر به خواص متفاوتی می‌شود کروناهای 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 کروناهای 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 پلاسماهای به وجود آمده، فوتون‌ها آزاد می‌شوند و باعث درخشش ضعیف می‌شود. این فوتون‌ها، ممکن است به‌صورت جریان‌های کاتدی جهت‌دار ظاهر شوند، سپس باعث یونیزاسیون بیشتر در هوای خنثی اطراف می‌شوند. پلاسما، شروع یک سری از بهمن‌های الکترون ثانویه است. یون‌های مثبت ایجادشده 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.

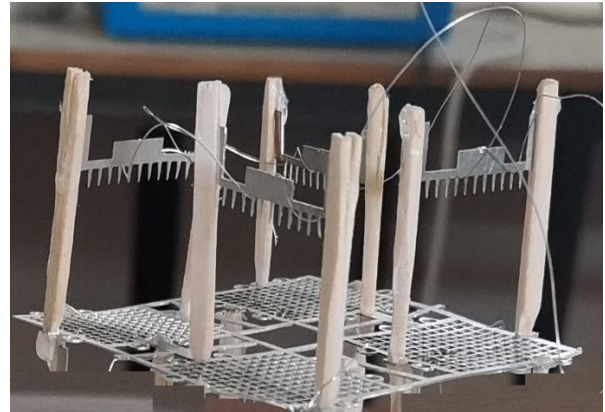
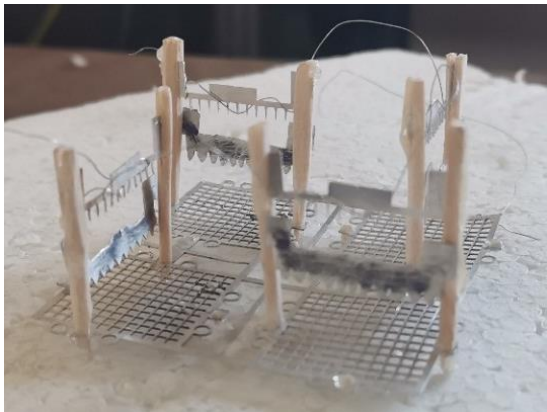
در مورد کرونا مثبت، الکترون اولیه آزادشده توسط یونیزاسیون خارجی اولیه از امیتر دور می‌شود و دوباره بهمن الکترونی را آغاز می‌کند. باین‌حال، این الکترون‌های نسبت به حالت منفی، انرژی کمتری دارند، زیرا به‌جای اینکه به سمت داخل بروند، به سمت بیرون می‌روند و در یک گردایان پتانسیل پایین‌تر شتاب می‌گیرند. سپس 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 به‌صورت لکه‌هایی ظاهر می‌شوند، که در شکل زیر مشاهده می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی استفاده از تخلیه کرونا به‌عنوان یک پیشران یونی برای یک

1. grade AISI-304L



شکل ۱. نقشه شماتیک از کالکتور و امیتر

Fig. 1. Schematic diagram of the collector and emitter



شکل ۲. پیشران تک امیتر و دو امیتری

Fig. 2. Single-emitter and double-emitter thrusters

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 $5/7 \times 5/7$ سانتی متر (نمونه مشابه خارجی 2×2 سانتی متر) 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 T_3 با ضخامت ۰٫۱ میلی متر 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 و ۳/۳ و ۳ سانتی متر از صفحه قرار داده شد. در این حالت، کرنا به سختی تشکیل شد. سپس در فاصله $1/5$ سانتی متری این عمل را تکرار شد که همان ولتاژهای اولیه سازه شروع به جرقه زدن کرد. این کار را با فاصله‌های $1/75$ ، $1/59$ و $2/2$ سانتی متر امتحان شد که نتایج نیروی پیشران کم‌کم رو به بهبود بود که نهایتاً در فاصله $2/4$ سانتی متر فاصله بهینه سازه با جرم $1/15$ 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 $2/65$ سانتی‌متر از صفحه فاصله داشته باشد. در نهایت دو پیشران تک و دو امیتری (سری)



شکل ۳. منبع تغذیه ولتاژ بالا مثبت و منفی

Fig. 3. Positive and negative high voltage power supply

هزارم میلی‌آمپر می‌باشد. شکل ۳ تصویری از منبع تغذیه مثبت و شکل ۳-۲، تصویری از منبع تغذیه منفی نشان داده شده است. قابل ذکر است که ایجاد آرک در خروجی ولتاژ (بین الکترودهای لیفت) باعث عبور جریان الکتریکی بیشتر از حد مجاز میکرو آمپر خواهد شد که می‌تواند منجر به خرابی میکرو آمپر و حتی ولت‌متر 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 شده‌اند، استفاده شده است، که در شکل ۴ نشان نشان داده شده است.

۳-۱-۲- اسیلوسکوپ

اسیلوسکوپ یک دستگاه اندازه‌گیری است که از آن برای مشاهده شکل موج‌ها و اندازه‌گیری ولتاژ، زمان تناوب، اختلاف فاز و همچنین مشاهده منحنی مشخصه ولت-آمپر عناصر نیمه هادی مانند دیود و ترانزیستور استفاده می‌شود. اسیلوسکوپ، در حقیقت یک ولت‌متر دقیق است، ولی توانایی اندازه‌گیری جریان را به طور مستقیم ندارد و برای اندازه‌گیری جریان باید از روش‌های غیر مستقیم مانند قانون اهم استفاده کرد. یکی از مزایای اسیلوسکوپ این است که برخلاف مولتی‌مترهای معمولی، در فرکانس‌های بالا نیز به خوبی کار می‌کند. اندازه‌گیری و مشاهده شکل موج‌ها در اسیلوسکوپ از ولتاژ با فرکانس صفر (دی سی) شروع و به فرکانس مشخصی ختم می‌گردد که معمولاً اسیلوسکوپ را با این فرکانس مشخص می‌کنند. مثلاً اسیلوسکوپ ۴۰ مگاهرتز، یعنی اسیلوسکویی که می‌تواند ولتاژهای دی سی و ای سی تا ۴۰ مگاهرتز را نمایش دهد.

۳-۱-۳- پراب

برای انتقال سیگنال‌های الکتریکی به اسیلوسکوپ، از پراب که به آن

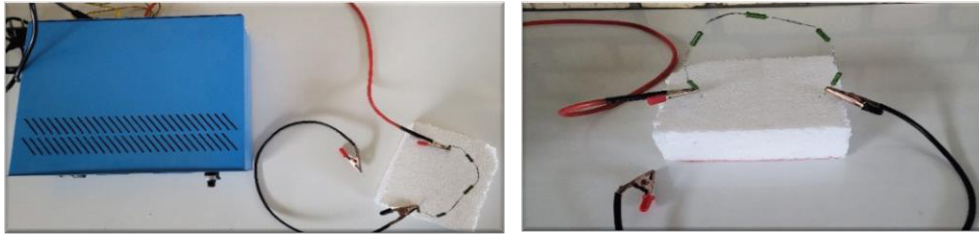
را با آلومینیوم تی ۳ ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت (لازم به ذکر است برای رسیدن به این فاصله بیش از ۲۰ تا ۲۵ بار فاصله امپترها از کالکتورها تغییر یافته تا فاصله بهینه جهت تولید بیشترین نیروی تراست بدست آید). به دلیل ولتاژ و فرکانس بالای عملکردی محرک پلاسمایی، همواره تابش امواج الکترومغناطیس از سیستم محرک پلاسمایی و سیم‌های انتقال ولتاژ صورت می‌گیرد، به منظور جلوگیری از این آثار بر روی ترازوی دیجیتال 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 سانتی‌متر 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 امپتر بررسی شد که نسبت به حالت تک امپتری ساخته شده در مقالات [۴ و ۶]، ۷۳ درصد تراست بیشتری را در کرونا ی منفی تولید گردید.

۳- ابزار و تجهیزات مورد نیاز آزمایشگاهی

۳-۱- اندازه‌گیری 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 می‌کند، استفاده کرد. منابعی که هم قابلیت تولید پولارایته مثبت و هم پولارایته 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 می‌باشد که دارای نمایشگر ولتاژ خروجی با دقت دهم کیلوولت (۱۰۰ ولت) و نمایشگر جریان خروجی با دقت



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

Fig. 4. Five 1 mega ohm resistors connected in series



شکل ۶. پروب ولتاژ بالا.

Fig. 6. High voltage probe.



شکل ۵. اسیلوسکوپ چهار کاناله.

Fig. 5. Four-channel oscilloscope.

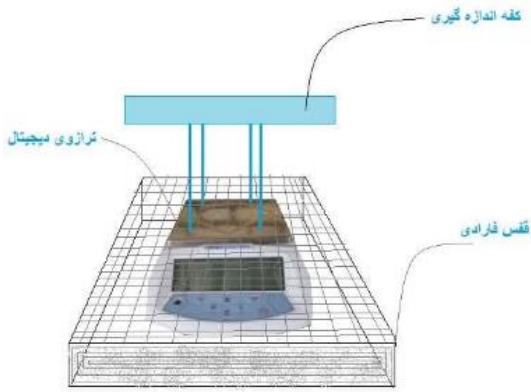
۳-۲- اندازه‌گیری نیروی پیشران

اندازه‌گیری نیروی پیشران تولیدشده به وسیله محرک پلاسمایی، پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد آن می‌باشد. برای اندازه‌گیری نیروی پیشران ترازوی دیجیتال^۳ 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 قرار داده شده است. میزان نیروی پیشران، با استفاده از فرمول $T = m * g$ محاسبه می‌شود، که در آن g میزان شتاب گرانش زمین $\frac{9.82}{s^2}$ و m مقداری است که ترازو با برخورد باد تولید شده توسط پیشران الکتروهیدرودینامیکی به صفحه زیرین آن نشان می‌دهد.

پروب نیز می‌گویند استفاده می‌شود. سیم رابط پراب معمولاً از جنس کابلی کواکسیال می‌باشد تا میزان نویز به حداقل برسد نوک پراب به صورت گیره‌ای فنی است که می‌توان آن را به یک نقطه از مدار وصل کرد. اگر پوشش پلاستیکی نوک پراب را برداریم، نوک آن به صورت سوزنی می‌شود در که در بعضی مواقع از آن استفاده می‌گردد. انتهای فلزی سیم رابط که به ورودی اسیلوسکوپ وصل می‌شود دارای یک شیار مورب است که وقتی آن را به ورودی اسیلوسکوپ وصل می‌کنیم و ۹۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخانیم این قطعه کاملاً به اسیلوسکوپ متصل می‌شود. این پراب قابلیت اندازه‌گیری ولتاژ تا چهار کیلوولت را دارد. همچنین سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده، در اسیلوسکوپ دیجیتالی^۴ کاناله^۲ قابلیت ثبت شدن را دارد.

3. AND(EK-3200i)

1. BNC
2. GW instek GDS-2104E-100MHz



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

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



شکل ۷. ترازوی دیجیتال (EK-3200i).

Fig. 7. Digital scale (EK-3200i)

جدول ۱. میزان دقت تجهیزات استفاده شده

Table 1. Accuracy of the equipment used

واحد	دقت	دستگاه
کیلو ولت	۰/۰۱	ولتاژ
میلی آمپر	۰/۰۰۱	جریان
گرم	۰/۰۰۱	ترازو
کیلو هرتز	۰/۰۳	اسیلوسکوپ
کیلو ولت	۰ ≤ %۳ (۰ - ۳۵)	پرآب

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 می شود که مقیاس دیجیتال صفر است. ۵- عدد نشان داده شده توسط مقیاس دیجیتال را در شتاب جاذبه (۹/۸۲ متر بر مجذورثانیه) ضرب می شود تا نیروی پیشران حاصل شود. ۶- در هر مرحله برای اندازه گیری نیرو، مراحل فوق باید انجام شود.

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

۳-۳- مراحل انجام آزمایش

بعد از چپش تجهیزات و قبل از شروع آزمایش اتصال تجهیزات بررسی می شود، همچنین اتصال زمین تجهیزات مثل منبع تغذیه، پرآب ولتاژ بالا و قفس فارادی بررسی می شود تا مشکلی بوجود نیاید. ۲- قبل از اعمال ولتاژ، مقیاس دیجیتال را صفر می شود. ۳- افزایش ولتاژ را تا هنگام ایجاد کرونا ادامه داده می شود، با شروع تخلیه کرونا، ولتاژ را به صورت پله ای و در مقیاس کیلوولت افزایش می یابد و عدد نشان داده توسط مقیاس دیجیتال متناظر با هر ولتاژ را یادداشت می گردد. این روند را تا هنگام تخلیه الکتریکی ادامه می یابد. با افزایش ولتاژ، باد تولید شده نیز افزایش می یابد و با برخورد به

اندازه‌گیری شده جهت ارزیابی میانگین‌گیری شده است تا یک مقدار معرف به‌دست 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 می‌باشد.

۴- نتایج و تحلیل یافته‌ها

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

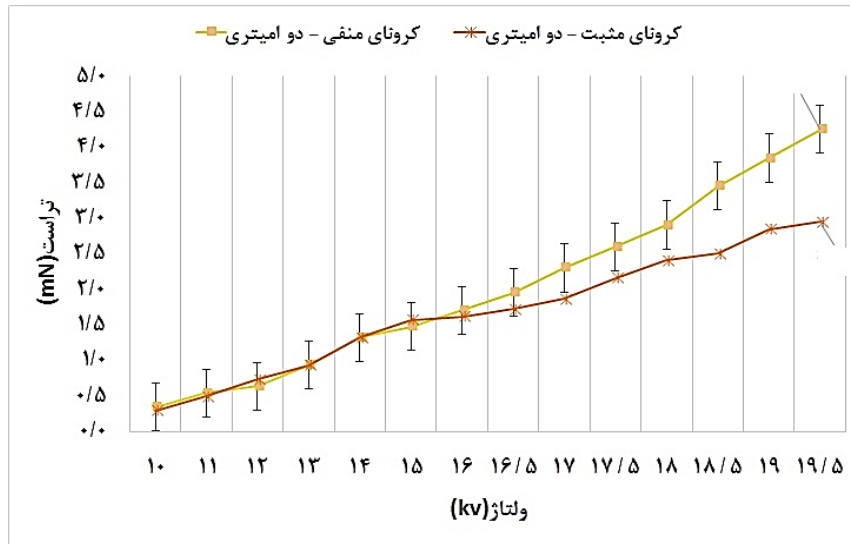
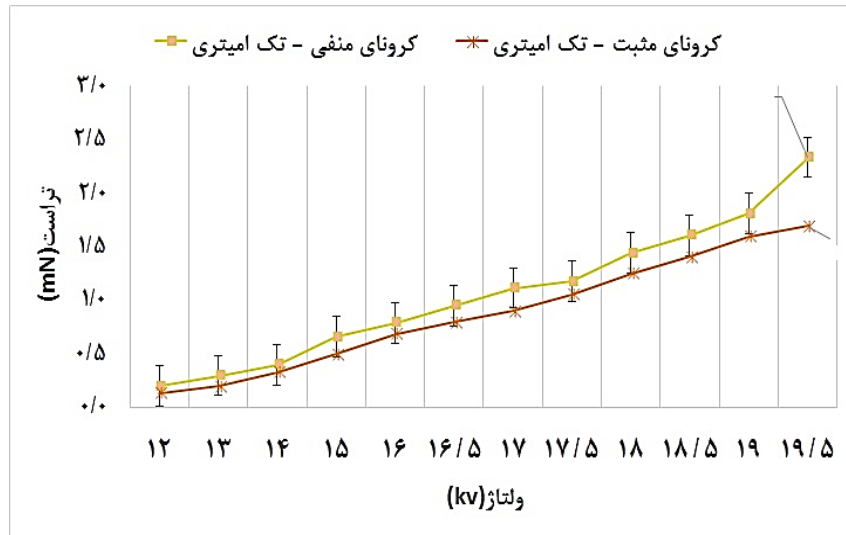
۴-۱- تکرار پذیری و آزمایش عدم قطعیت طی آزمایش‌های مختلف درخصوص عدم قطعیت نیز مطابق جدول ۲ چهار مرتبه آزمایش با منبع‌های ولتاژ مثبت و ۴ مرتبه آزمایش با منبع‌های ولتاژ بررسی گردید و در نهایت با توجه به دقت ترازو جهت اندازه‌گیری تراست و همچنین خطای انسانی در مشاهده و تفسیر داده‌ها در نهایت از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده و نمودارهای خطی موجود در مقاله رسم شده‌است.

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

جدول ۲. مقادیر تراست به دست آمده در چهار مرتبه آزمایش برای پیشران با کرونای 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

کرونای منفی							
تراست (میکروروبات دو امیتری) (mN)				تراست (میکروروبات تک امیتری) (mN)			
چهارم	سوم	دوم	مرتبه اول	چهارم	سوم	دوم	مرتبه اول
۰.۲۹۳	۰.۳	۰.۲۹	۰.۲۹۸	۰.۳۴۰	۰.۳۵	۰.۳۵	۰.۳۴۱
۰.۴۹۱	۰.۴۹	۰.۴۹۵	۰.۴۸۹	۰.۵۳۲	۰.۵۴	۰.۵۴	۰.۵۴۶
۰.۷۳۵	۰.۷۳۷	۰.۷۳۵	۰.۷۴۰	۰.۶۴۰	۰.۶۳	۰.۶۴	۰.۶۴
۰.۹۳۰	۰.۹۳۳	۰.۹۳	۰.۹۴۰	۰.۹۳۰	۰.۹۳	۰.۹۳	۰.۹۴۰
۱.۳۲۶	۱.۳۲۹	۱.۳۲	۱.۳۳۰	۱.۳۲۹	۱.۳۲	۱.۳۲	۱.۳۲۳
۱.۵۶۵	۱.۵۷۵	۱.۵۷۳	۱.۵۷۰	۱.۴۷۶	۱.۴۷	۱.۴۷	۱.۴۸۰
۱.۶۳۰	۱.۶۱	۱.۶۲	۱.۶۲۵	۱.۷۰۲	۱.۷	۱.۷۱	۱.۷۰۰
۱.۷۱۵	۱.۷۱۸	۱.۷۲۱	۱.۷۲۰	۱.۹۴۸	۱.۹۶	۱.۹۵	۱.۹۵۲
۱.۸۶۸	۱.۸۶	۱.۸۶۵	۱.۸۷۰	۲.۳۰۰	۲.۳	۲.۳	۲.۳۰۵
۲.۱۶۰	۲.۱۶۲	۲.۱۶۳	۲.۱۵۶	۲.۵۹۸	۲.۶۱	۲.۶	۲.۵۹۵
۲.۴۰۵	۲.۴۱	۲.۴	۲.۴۱۰	۲.۹۰۸	۲.۹	۲.۹۱	۲.۹۰۱
۲.۵۰۴	۲.۵۰۱	۲.۵	۲.۵۱۰	۳.۴۵۹	۳.۴۴	۳.۴۶	۳.۴۵۰
۲.۸۴۹	۲.۸۵۱	۲.۸۴	۲.۸۵	۳.۸۴۰	۳.۸۵	۳.۸۴	۳.۸۵۰
۲.۹۴۳	۲.۹۴	۲.۹۴۹	۲.۹۵	۴.۲۴۵	۴.۲۶	۴.۲۵	۴.۲۴۵

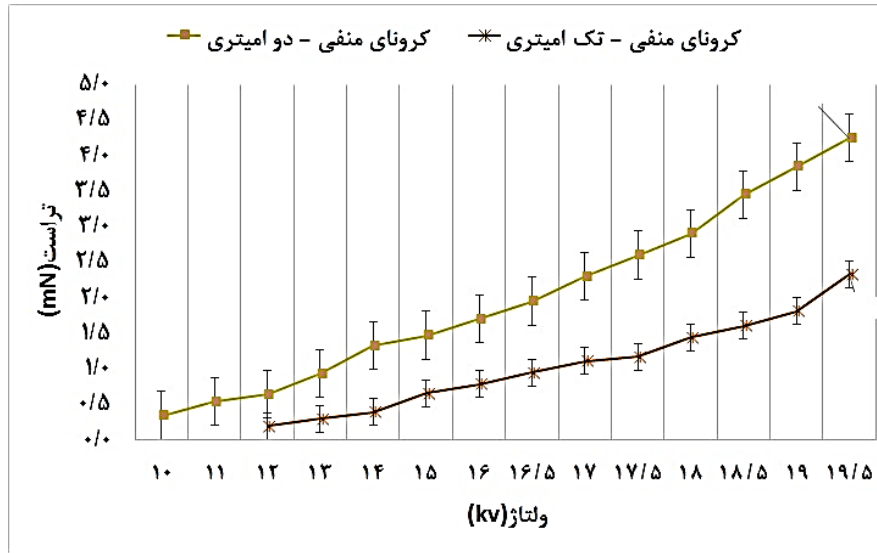
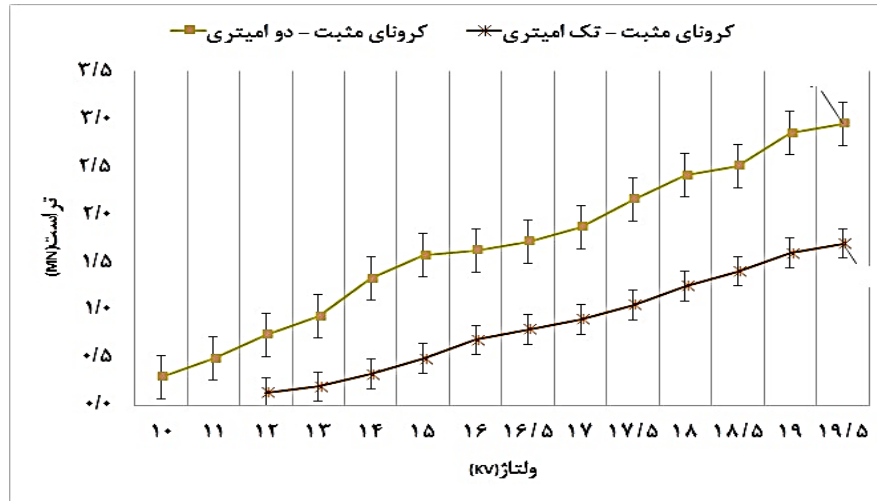


شکل ۹. نمودار نیروی تراست برحسب ولتاژ در میکروروبات تک و دو سری امیتری جهت مقایسه در کرونا مثبت و منفی

Fig. 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 کرونا مثبت و منفی مقایسه شده است. از مقایسه دو نمودار شکل ۱۰ نیز می‌توان نتیجه گرفت که میزان تولید نیروی پیشران، در پیشران با دو سری امیتر در حالت کرونا منفی، ۷۹ درصد بیشتر از پیشران با یک سری امیتر است. در کرونا 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.

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 کرونا منفی ۴۶ درصد بیشتر از کرونا مثبت است. در کرونا مثبت، تقریباً با افزایش ولتاژ به میزان یک کیلوولت، ۰٫۲۳ میلی‌نیوتن به میزان نیروی پیشران افزایش می‌یابد. همچنین در حالت دو امیتری میزان نیروی پیشران، در کرونا منفی ۴۴ درصد بیشتر از کرونا مثبت است. زیرا در کرونا منفی، تقریباً با افزایش ولتاژ به میزان یک کیلوولت، ۰٫۳۸ میلی‌نیوتن میزان نیروی پیشران افزایش می‌یابد.



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

Fig. 10. Thrust force versus voltage diagram for single and double emitter series micro robots for comparison in positive and negative corona

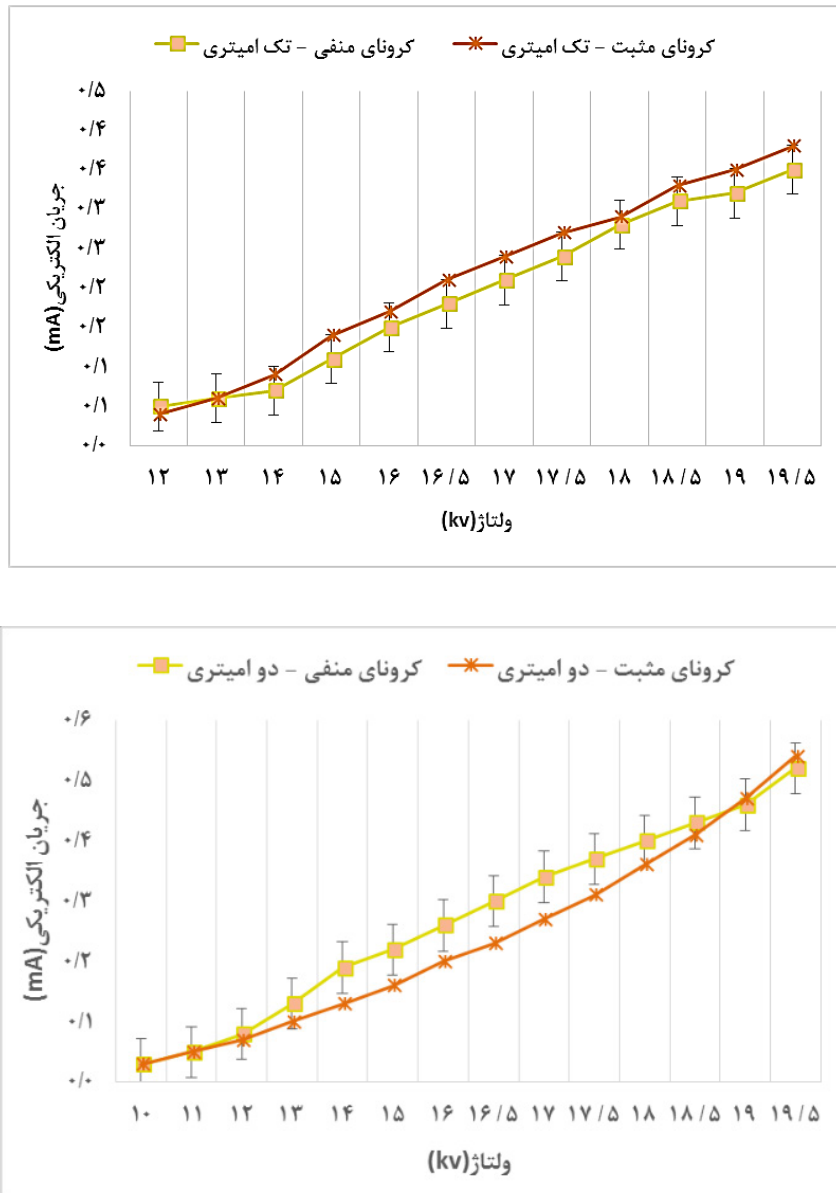
از کرونا منفی است. در میکروروبات تک امیتری، تقریباً با افزایش ولتاژ یک کیلوولت، $0/05$ میلی آمپر جریان الکتریکی افزایش می یابد. همچنین جریان الکتریکی در حالت دو امیتری در کرونا مثبت به میزان ۴ درصد بیشتر از کرونا منفی است. در میکروروبات دو امیتری، تقریباً با افزایش ولتاژ هر کیلوولت، $0/08$ میلی آمپر جریان الکتریکی افزایش می یابد.

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

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 تک 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



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

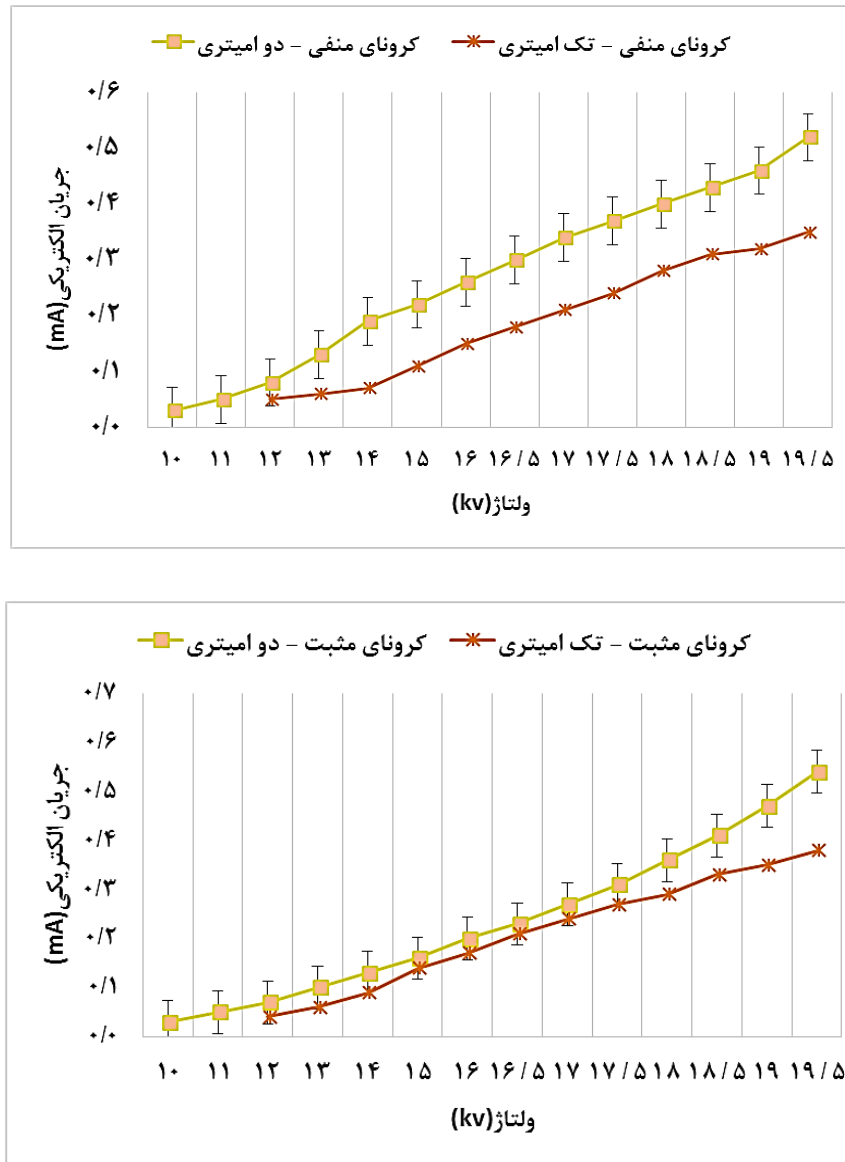
Fig. 11. Diagram of changes in electric current as a function of voltage in the positive and negative corona for single and double emitter thrusters

به دست می‌آید، که V میزان ولتاژ الکتریکی و I میزان جریان الکتریکی است. نمودار توان الکتریکی برحسب ولتاژ برای میکروروبات تک 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

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.

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

نحوه محاسبه توان الکتریکی مصرفی با استفاده از رابطه $P = V * I$



شکل ۱۲. نمودار میزان جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ برای میکروربات تک و دو امیتری برای مقایسه دو تخلیه کرونا مثبت و منفی

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

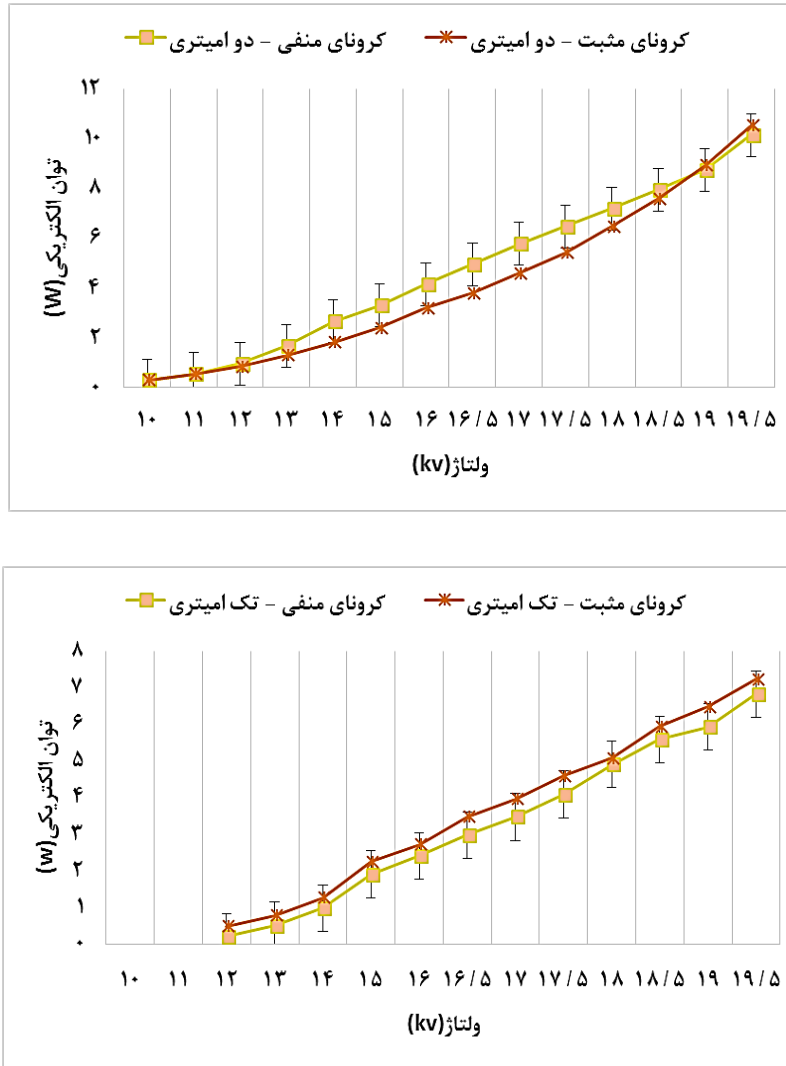
امیتری ۴۵ درصد بیشتر از حالت تک امیتری است.

۴-۵- مقایسه میزان ضریب اثربخشی میکرو ربات 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

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.

در شکل ۱۴، هدف مقایسه میکروربات 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 تک امیتری است. همچنین در تخلیه کرونا مثبت، حالت دو



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

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

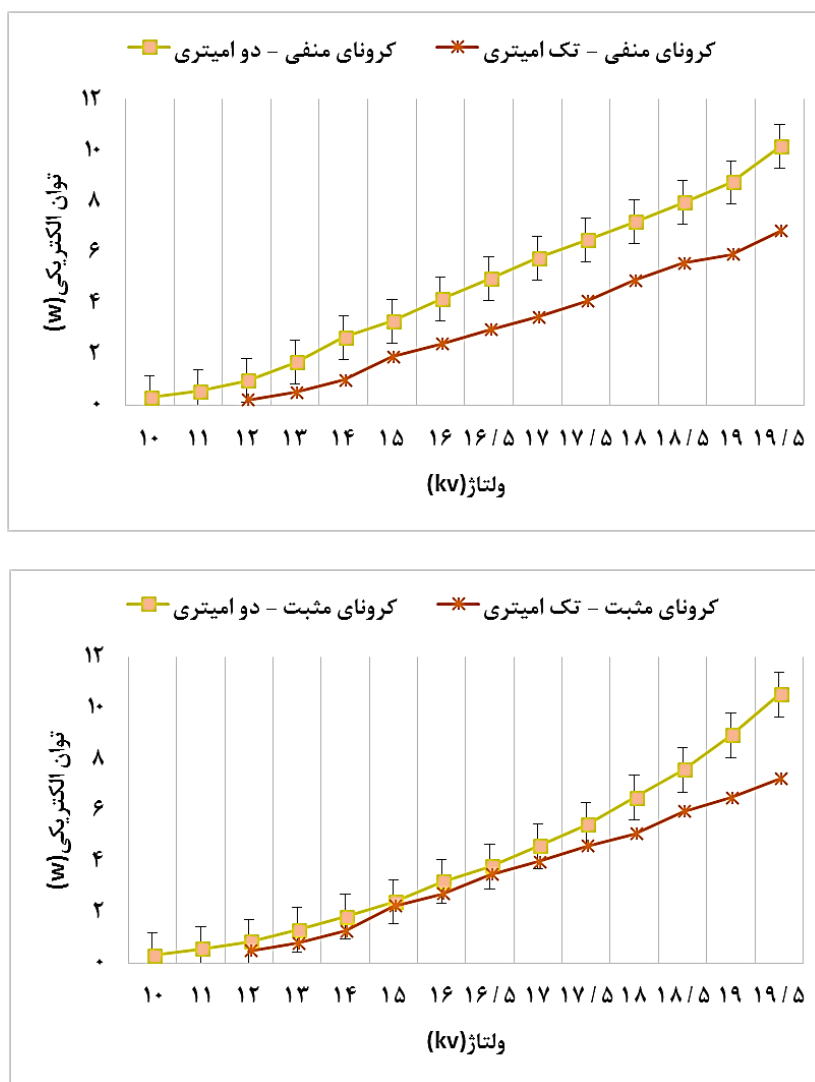
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، ابتدا نمونه‌های ساخته شده از موارد مشابه خارجی مورد بررسی قرار گرفت که نمونه‌های ساخته شده در ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر بود و با بررسی آنها به دست آمد که آلیاژ استفاده شده برای کالکتور و امیترها از جنس آلومینیوم و جنس پایه‌های 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 نقشه‌های 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

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.

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

مقایسه تراست در حالت‌های مختلف تک و دو امیتری و همچنین کرونا مثبت و منفی که به بررسی یکجای حالت‌های مختلف بستن امیترهای پیشران می‌پردازد، مطابق شکل ۱۶ می‌باشد.



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

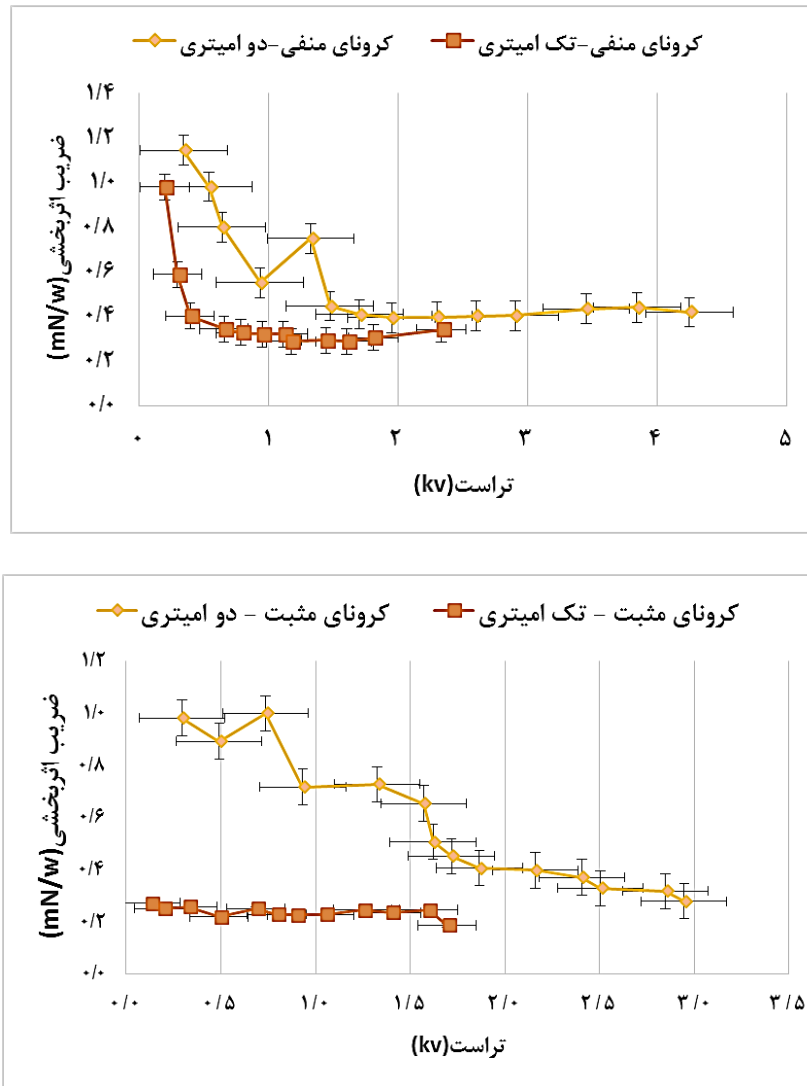
Fig. 14. Diagram of electrical power versus voltage in two positive and negative coronas for comparing single and double emitters

شرح ذیل می‌باشد:

عملگرهای کرونا می‌تواند 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 منفی نیروی پیشران بیشتری تولید می‌شود، بطوری که در ولتاژ ۱۹ کیلوولت، میزان نیروی پیشران در کرونا منفی ۱۵ درصد بیشتر از کرونا 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

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 موفقیت‌آمیز بود و نتیجه بر این شد که از همین آلیاژ برای ساخت کالکتور با لیزرکات نیز استفاده شود، برای پایه‌های اتصال امیترها به کالکتور نیز با بررسی انواع چوب بالسا، از سبک‌ترین نوع این چوب (در ایرفویل هواپیماهای فوق سبک) استفاده شد و پایه‌های مورد نیاز را به صورت دستی ساخته‌شد. در نهایت، نمونه اولیه این میکروروبات با یک امیتر ساخته شد و تست‌های مورد نیاز انجام شد، در نهایت امیترها نیز با لیزرکات ساخته شدند و آزمایش‌ها با ۲ سری امیتر از سر گرفته شد که نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف به



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

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

۲- با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی و در نتیجه توان الکتریکی مصرفی به صورت سهموی افزایش می‌یابد. 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

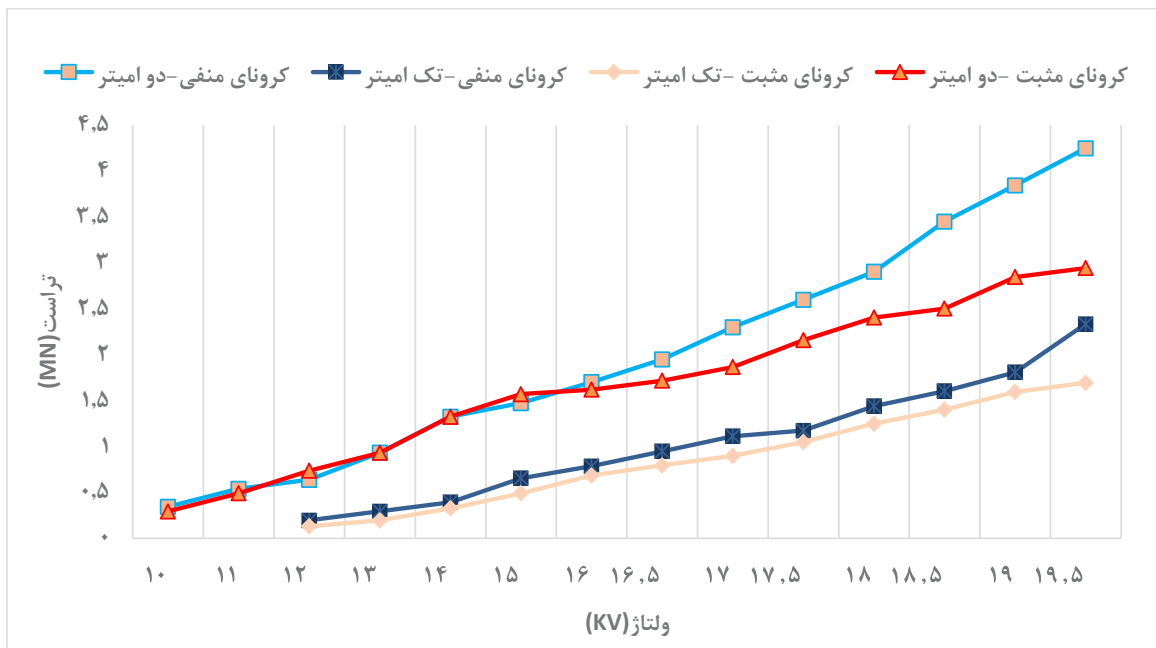
منفی میزان تولید نیروی پیشران، در میکروروبات با دو سری امیتر در حالت کرونا منفی ۷۹ درصد بیشتر از میکروروبات با یک سری امیتر در کرونا منفی است.

در کرونا مثبت نیز میزان نیروی پیشران، در میکروروبات 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 می‌کند و نمونه بهینه‌تری است.

جدول ۳. مقادیر میانگین تراست، جریان الکتریکی، توان ضریب اثربخشی پیشران با کرونای 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

کرونای مثبت - دو امیتر				کرونای منفی - دو امیتر				ولتاژ (Kv)	کرونای مثبت - تک امیتر				کرونای منفی - تک امیتر				ولتاژ (Kv)
ضریب اثر بخشی (mN/w)	توان الکتریکی (w)	جریان الکتریکی (mA)	تراست (mN)	ضریب اثر بخشی (mN/w)	توان الکتریکی (w)	جریان الکتریکی (mA)	تراست (mN)		ضریب اثر بخشی (mN/w)	توان الکتریکی (w)	جریان الکتریکی (mA)	تراست (mN)	ضریب اثر بخشی (mN/w)	توان الکتریکی (w)	جریان الکتریکی (mA)	تراست (mN)	
۰.۹۸۲	۰.۳	۰.۳	۰.۲۹۵	۱.۱۴۶	۰.۳	۰.۳	۰.۳۴۴									۱۰	
۰.۸۹۳	۰.۵۵	۰.۰۵	۰.۴۹۱	۰.۹۸۲	۰.۵۵	۰.۰۵	۰.۵۴۰									۱۱	
۱.۰۰۰	۰.۸۴	۰.۰۷	۰.۷۳۷	۰.۸۰۰	۰.۹۶	۰.۰۸	۰.۶۳۸	۰.۲۷۳	۰.۴۸	۰.۰۴	۰.۱۳۱	۰.۹۸۰	۰.۲	۰.۰۵	۰.۱۹۶	۱۲	
۰.۷۱۸	۱.۳	۰.۱	۰.۹۳۳	۰.۵۵۲	۱.۶۹	۰.۱۳	۰.۹۳۳	۰.۲۵۲	۰.۷۸	۰.۰۶	۰.۱۹۶	۰.۵۸۹	۰.۵	۰.۰۶	۰.۲۹۵	۱۳	
۰.۷۲۸	۱.۸۲	۰.۱۳	۱.۳۲۶	۰.۷۵۰	۲.۶۶	۰.۱۹	۱.۳۲۶	۰.۲۶۰	۱.۲۶	۰.۰۹	۰.۳۲۷	۰.۴۰۱	۰.۹۸	۰.۰۷	۰.۳۹۳	۱۴	
۰.۶۵۵	۲.۴	۰.۱۶	۱.۵۷۱	۰.۴۴۶	۳.۲	۰.۲۲	۱.۴۷۳	۰.۲۱۹	۲.۲۴	۰.۱۴	۰.۴۹۱	۰.۳۴۵	۱.۹	۰.۱۱	۰.۶۵۵	۱۵	
۰.۵۰۶	۳.۲	۰.۲	۱.۶۲۰	۰.۴۰۹	۴.۱۶	۰.۲۶	۱.۷۰۲	۰.۲۵۲	۲.۷۲	۰.۱۷	۰.۶۸۵	۰.۳۲۷	۲.۴	۰.۱۵	۰.۷۸۶	۱۶	
۰.۴۵۳	۳.۷۹۵	۰.۲۳	۱.۷۱۹	۰.۳۹۴	۴.۹۵	۰.۳	۱.۹۵۰	۰.۲۲۹	۳.۴۶۵	۰.۲۱	۰.۷۹۵	۰.۳۲۰	۲.۹۷	۰.۱۸	۰.۹۴۹	۱۶.۵	
۰.۴۰۶	۴.۵۹	۰.۲۷	۱.۸۶۶	۰.۳۹۸	۵.۷۸	۰.۳۴	۲.۳۰۰	۰.۲۲۷	۳.۹۶	۰.۲۴	۰.۸۹۹	۰.۳۲۱	۳.۴۶۵	۰.۲۱	۱.۱۱۳	۱۷	
۰.۳۹۸	۵.۴۲۵	۰.۳۱	۲.۱۶۰	۰.۴۰۲	۶.۴۷۵	۰.۳۷	۲.۶۰۰	۰.۲۲۹	۴.۵۹	۰.۲۷	۱.۰۵۰	۰.۲۸۸	۴.۰۸	۰.۲۴	۱.۱۷۴	۱۷.۵	
۰.۳۷۱	۶.۴۸	۰.۳۶	۲.۴۰۶	۰.۴۰۳	۷.۲	۰.۴	۲.۹۰۵	۰.۲۴۶	۵.۰۷۵	۰.۲۹	۱.۲۵۰	۰.۲۹۴	۴.۹	۰.۲۸	۱.۴۴۰	۱۸	
۰.۳۳۰	۷.۵۸۵	۰.۴۱	۲.۵۰۴	۰.۴۳۴	۷.۹۵۵	۰.۴۳	۳.۴۵۲	۰.۲۳۶	۵.۹۴	۰.۳۳	۱.۴۰۲	۰.۲۸۷	۵.۵۸	۰.۳۱	۱.۶۰۴	۱۸.۵	
۰.۳۱۹	۸.۹۳	۰.۴۷	۲.۸۴۸	۰.۴۴۰	۸.۷۴	۰.۴۶	۳.۸۴۶	۰.۲۴۶	۶.۴۷۵	۰.۳۵	۱.۵۹۵	۰.۳۰۶	۵.۹۲	۰.۳۲	۱.۸۰۹	۱۹	
۰.۲۸۰	۱۰.۵۳	۰.۵۴	۲.۹۴۶	۰.۴۱۹	۱۰.۱۴	۰.۵۲	۴.۲۵۰	۰.۱۸۸	۷.۲۲	۰.۳۸	۱.۶۹۴	۰.۳۴۲	۶.۸۲۵	۰.۳۵	۲.۳۳۵	۱۹.۵	



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

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

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, Khoshkhou, 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, Khoshkhou, 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).

از حالت کرونا منفی می‌شود.

۳- در حالت تک امیتری در کرونا منفی با افزایش نیروی پیشران، میزان ضریب‌اثربخشی کاهش می‌یابد. در حالت دو امیتری، روند کاهش ضریب‌اثربخشی در تخلیه کرونا منفی سریعتر از تخلیه کرونا مثبت صورت می‌گیرد. میزان کاهش ضریب اثر بخشی تخلیه کرونا مثبت ۲/۵ برابر تخلیه کرونا منفی است که در نهایت، ۵۰ درصد کمتر از کرونا منفی می‌رسد.

در نهایت در کرونا مثبت، افزایش ولتاژ در پیشران دو امیتری نسبت به تک امیتری تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش راندمان تولیدی توسط عملگرهای پلاسما دارد و منجر به کاهش راندمان به‌دست‌آمده از کرونا می‌گردد. ولی در کرونا منفی، افزایش ولتاژ در پیشران تک امیتری تأثیر بسزایی در کاهش راندمان تولیدی نسبت به پیشران دو امیتری دارد. در آخر می‌توان نتیجه گرفت که نمونه دو امیتری به مراتب بهینه‌تر 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 میکروروبات شد همچنین متوجه شدیم که از کرونا منفی برای این پیشران نتایج بهتری بدست می‌آید، اما افزودن هر امیتر نیازمند پایه های بلندتر عایق و اتصال این امیترها به یکدیگر می‌باشد که باعث کاهش نیروی رانش به وزن می‌شود که می‌توان 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 می‌توان راندمان یعنی میزان رانش به وزن را افزایش داد.

منابع

- [1] A. P. Chattoch, On the velocity and mass of the ions in the electricwind, 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.
- [4] D. S. Drew, Lambert, N. O., Schindler, C. B., & Pister, K. S, Toward controlled flight of the ionocraft: a flying

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Cheshmenia, R. Khoshkhoo, Design and Construction of An Electro-Hydrodynamic Thruster for Use in a Flying Microrobot, Amirkabir J. Mech Eng., 57(5) (2025) 567-588.

DOI: [10.22060/mej.2025.24284.7853](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24284.7853)



