

## بررسی و شبیه سازی عددی اثر متقابل تخلیه ی کرونا و جریان هوا بریکدیگر

مهسا پلخانی<sup>۱</sup>، روح الله خوشخو<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، گرایش ایروودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی هوافضا، گرایش ایروودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

\* نویسنده مسئول: r.khoshkhoo@mut.ac.ir

کلید واژه: شبیه سازی عددی، عملگر پلاسمای کرونا، نیروی پیشران

### چکیده

یک روش ایجاد پلاسما، استفاده از عملگرهای پلاسمای کرونا می باشد. تحقیق حاضر، عملگر پلاسمای کرونا با پیکربندی سیم-سیلندر مورد بررسی و شبیه سازی صورت گرفته است. در ابتدا، نتایج شبیه سازی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و سپس تاثیر جریان هوا روی تخلیه ی کرونا بر میزان نیروی پیشران تولیدی و تغییرات سرعت جریان هوا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ، میزان نیروی پیشران در ابتدا افزایش و سپس ثابت باقی می ماند. همچنین، اضافه کردن جریان هوا به سیستم، میزان ماکزیمم سرعت جریان هوا را افزایش داده که ناشی از تاثیر پلاسما بر جریان هوا می باشد.

## Survey and Numerical Simulation of Interaction Effect of the Corona Discharge and Airflow Velocity Together

Mahsa Polkhani<sup>۱</sup>, Rouhollah Khoshkhoo<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> MSc Student, Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

<sup>۲</sup> Assistant Professor, Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

\*corresponding e-mail: r.khoshkhoo@mut.ac.ir

### Abstract

A method for plasma formation is designed using the corona plasma actuators. In present study, the corona plasma actuator with a wire-cylinder configuration is investigated and simulated. In the present study, the corona discharge configuration has been validated, and then, the effect of airflow on corona discharge on the amount of thrust and airflow velocity changes is surveyed. The results show that, by increasing voltage, at first, the amount of thrust is increased and then it is remained constant. Also, by adding airflow velocity to the system increases the maximum airflow velocity due to the effect of plasma on airflow.

**Keywords:** Corona Plasma Actuator, Numerical Simulation, Thrust.

### مقدمه

پیشنهاد شده است [۱]. این عملگر از دو الکترود با شعاع های متفاوت به منظور ایجاد تخلیه ی کرونا تشکیل شده است. میدان الکتریکی در نزدیکی ماده ی رسانا می تواند به حدی متمرکز شود، که هوای مجاور را یونیزه کند. این مسئله می تواند منجر به تخلیه ی جزئی انرژی الکتریکی شود که به آن کرونا می گویند. تخلیه کرونا در جریان هوا صورت گرفته که منجر به تولید باد یونی می گردد و می تواند جهت بهبود عملکرد وسایل پرنده مورد توجه قرار گیرد [۲].

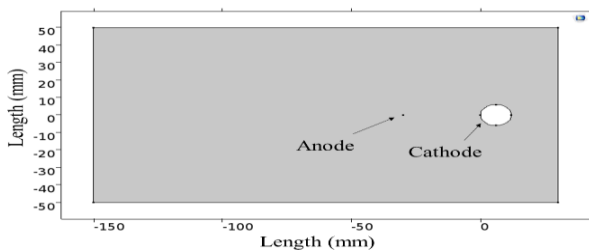
یکی از اقسام سامانه های کنترل جریان، که در دو دهه گذشته همواره مورد توجه بشر بوده است، استفاده از عملگرهای پلاسما است. در بین انواع عملگرهای پلاسما که می توانند جهت کنترل جریان مورد استفاده قرار گیرند، عملگر پلاسمای کرونا دارای اهمیت بسیاری از نظر تولید باد یونی می باشد. امروزه، الکتروآیروودینامیک به عنوان یک روش جایگزین برای تولید نیروی پیشران و یا کنترل جریان، بدون قطعات متحرک، تقریباً بی صدا و بدون نیاز به سوخت و احتراق،



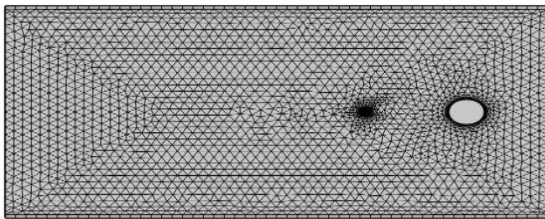
### مشخصات مسئله

#### – هندسه مسئله و شبکه محاسباتی

در این تحقیق، از پیکربندی سیم-سیلندر استفاده شده است. جهت انجام شبیه‌سازی کرونا، از تخلیه کرونا مثبت استفاده شده است. فاصله‌ی دو الکترود از هم ۳۰ میلی‌متر و قطر الکترودها به ترتیب ۲۵ میکرومتر و ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. شماتیکی از هندسه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. شبکه مورد استفاده نیز دارای ۵۴۹۴ المان می‌باشد، که در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۱- هندسه‌ی مورد استفاده برای شبیه‌سازی



شکل ۲- شبکه مورد استفاده

#### – معادلات حاکم

شبیه‌سازی عددی تخلیه کرونا نیازمند در نظر گرفتن همزمان معادلات الکترواستاتیکی و ناویر-استوکس می‌باشد. جریان به صورت دوبعدی، تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در جریان‌های پلاسما، میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از طریق رابطه پواسون (۱) به یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$\nabla \cdot E = -\nabla^2 V = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

که  $q$  نشان دهنده‌ی چگالی بار الکتریکی و  $\epsilon_0$  ثابت گذرده‌ی هوا می‌باشد. همچنین چگالی جریان از رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه است:

$$j = \mu_p E q + U q - D \nabla q \quad (2)$$

در این معادله،  $\mu_p$  ضریب تحریر پذیر یون‌های هوا،  $U$  سرعت جریان و  $D$  ضریب نفوذپذیری یون‌هاست. پیوستگی چگالی بار الکتریکی با در نظر گرفتن معادله‌ی (۳) تضمین می‌گردد:

کولاس و همکاران در یک پیکربندی متشکل از ۵ الکترود، شامل یک آند متصل به ولتاژ مثبت و دو کاتد متصل به زمین و دو کاتد متصل به ولتاژ منفی، رژیم تخلیه‌ی کرونا را بهینه‌سازی کردند. آنها سرعت باد یونی را تا  $10 \text{ m/s}$  اندازه گرفتند و نیروی EHD را تا  $350 \text{ mN}$  بر واحد طول الکترود محاسبه، توان مصرفی  $210 \text{ W/m}$  اندازه گیری، در نتیجه مقدار راندمان  $1/7 \text{ mN/W}$  به ثبت رساندند [۳]. موری و همکاران پدیده‌ی الکترو هیدرودینامیک را در یک پیکربندی سوزن-صفحه به صورت تجربی مطالعه کردند. در این پژوهش جامع، رابطه‌ی جریان الکتریکی حاصل از تخلیه‌ی کرونا با ابعاد کاتد و فاصله‌ی بین الکترودها، تاثیر افزایش فاصله‌ی الکترودها بر راندمان رانشگر و تفاوت میزان نیروی پیشران حاصل از اعمال ولتاژهای مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفت و با افزایش ولتاژ تا  $24 \text{ kV}$ ، میزان نیروی پیشران حاصل تا  $90 \text{ mN/m}$  اندازه گیری شد [۴].

طی تحقیقات صورت گرفته توسط فتحی و آهنگر در رابطه با تخلیه‌ی کرونا در پیکربندی سیم-سیلندر، از آند با شعاع  $12/5$  میکرومتر و کاتدی با شعاع  $6$  میلی‌متر استفاده شد. در این تحقیق، مشخصات جریان ناشی از تخلیه کرونا از قبیل سرعت، نیروی پیشران، دما، جریان الکتریکی، خطوط جریان و بازده مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ اعمالی بر آند، نیروی پیشران و جریان الکتریکی، افزایش راندمان نیروی پیشران، کاهش می‌یابد [۵].

پژوهش‌های گیل‌مور و برت بر روی یک نمونه از پیکربندی سیم-استوانه به صورت سری بود. آنها دریافتند که در فاصله‌ی بیشتر بین الکترودها، نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی، کاهش می‌یابد [۶].

در این تحقیق، با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقات گذشته سعی شده تا با استفاده از شبیه‌سازی عددی و با توجه به برهمکنش جریان هوا و محرک کرونا بریکدیگر، نرخ تغییرات سرعت جریان هوا و میزان نیروی پیشران تولیدی در سرعت جریان‌های پایین مورد بررسی قرار گیرد، تا قابلیت این عملگر به عنوان سامانه پیشران ارزیابی شود.

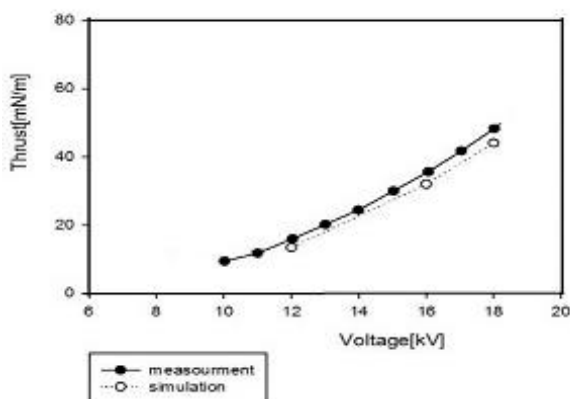
مرجع [۴] مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نیروی پیشران برحسب مقادیر ولتاژ اعمالی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده می‌باشد، نتایج شبیه‌سازی با دقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند. بیشترین میزان خطا در حدود ۸/۹ درصد است. نیروی پیشران تولیدشده بر اثر تخلیه‌ی کرونا با افزایش ولتاژ اعمالی، افزایش می‌یابد.

مقایسه‌ی تغییرات جریان الکتریکی حاصل از شبیه‌سازی عددی برحسب ولتاژ با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرجع [۴] در شکل ۴ ارائه شده است. با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. بیشینه اختلاف مابین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی برابر ۶/۷ درصد می‌باشد.

در عملگرهای الکتریکی، پارامتر عملکردی راندمان نیروی پیشران طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود که نتایج مربوط به آن در آزمایشگاه و شبیه‌سازی صورت گرفته در شکل ۵ مقایسه گردیده است. ضریب اثربخشی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\theta = \frac{F_{EHD}}{P} = \frac{d}{\mu V} \quad (۸)$$

که  $F_{EHD}$  بیانگر نیروی الکتروهیدرودینامیکی و  $P$  توان مصرفی می‌باشد. اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی، نیروی پیشران افزایش یافته، اما بازده یا ضریب اثربخشی، کاهش می‌یابد. بیشینه خطا به دست آمده از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق، ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل ۳- نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب ولتاژ

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (۳)$$

بافرض جریان به صورت تراکم ناپذیر در پیرامون الکترودها، معادله‌ی پیوستگی به صورت معادله (۴) به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (۴)$$

باترکیب معادلات (۲)، (۳) و (۴) رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot (\mu_p E q - D \nabla q) + U \cdot \nabla q = 0 \quad (۵)$$

همچنین با درنظر گرفتن نیروی حجمی ناشی از میدان الکترواستاتیکی، معادله‌ی ممتوم به صورت رابطه‌ی (۶) خواهد بود:

$$\rho U \cdot \nabla U = \nabla P + \mu \nabla^2 U + q E \quad (۶)$$

که دراین رابطه،  $\rho$  چگالی هوا،  $P$  فشار هوا و  $\mu$  لزجت دینامیکی هوا می‌باشد. ضمناً  $qE$  نشانگر نیروی کولمب می‌باشد. درنهایت، برای بررسی تاثیر تخلیه‌ی کرونا بر دمای جریان، معادله‌ی انرژی به صورت رابطه‌ی به شکل رابطه‌ی (۷) نوشته می‌شود:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = -\nabla \cdot (K \nabla T) + E j \quad (۷)$$

دراین معادله  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه‌ی هوا و  $K$  ضریب انتقال حرارت هوا می‌باشد. همچنین عبارت  $E j$  بیانگر حرارت اهمی ناشی ازافت ولتاژ بین دو الکتروده است.

#### شرایط مرزی و اولیه

شبیه‌سازی در شرایط اتمسفریک انجام و فشار ثابت  $p = 1 \text{ atm}$  بر روی تمامی مرزهای خارجی اعمال شده است. در مرزهای خارجی فرض می‌شود که چگالی اتم‌های خنثی بیشتر از ذرات باردار بوده و مقدار پتانسیل و چگالی بار الکتریکی بر روی آنها برابر صفر است. بر روی الکتروده کاتد نیز چگالی بار الکتریکی و ولتاژ اعمالی برابر صفر می‌باشد.

#### روش حل عددی

حل عددی معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار کامسول نسخه ۵.۵ انجام شده است. این نرم‌افزار مسائل رابه روش المان محدود حل کرده و برای مطالعه‌ی جریان‌های پلاسما مناسب می‌باشد.

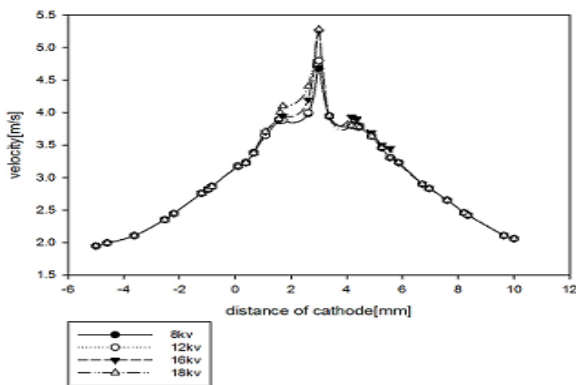
#### نتیجه گیری

جهت انجام صحت مدل عددی، سه پارامتر نیروی پیشران و جریان الکتریکی و ضریب تاثیر ناشی از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی

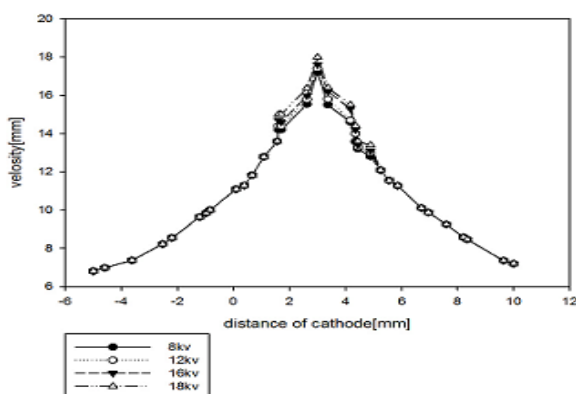


– بررسی رفتار و الگوی جریان سیال پلاسما

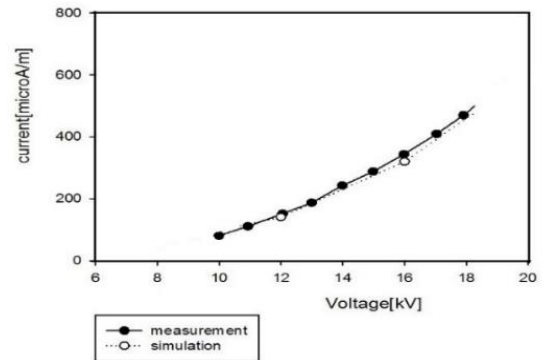
افزایش سرعت بر روی کاتد به دلیل افزایش نیروی کولمب بین دو الکتروود ناشی از پلاسما و همچنین هندسه‌ی موجود در مسیر جریان می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص شده است، با افزایش ولتاژ، سرعت قبل از رسیدن به سطح کاتد تغییرات کمی نسبت به هم داشته، روی سطح کاتد بیشترین اختلاف سرعت و پس از کاتد سرعت‌ها تقریباً یکسان شده و بیشترین تفاوت سرعت در نزدیکی و روی سطح کاتد می‌باشد. در سرعت ورودی، ۱۰ متر بر ثانیه کمترین سرعت روی سطح کاتد مربوط به ولتاژ ۸ کیلو ولت و برابر با ۲۲/۵۳ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار مربوط به ولتاژ ۱۸ کیلوولت و برابر با ۲۴/۵۵ متر بر ثانیه می‌باشد. با دانستن شرایط یکسان مسئله در مورد سرعت ورودی و هندسه، تنها دلیل این تفاوت بین سرعت ناشی از اختلاف ولتاژها که مربوط به پلاسما و تخلیه‌ی کرونا می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت، که با ایجاد شرایط تخلیه‌ی کرونا می‌توان سرعت را افزایش داد. جهت تعیین فاصله و ولتاژ برای بیشترین تاثیر بر روی سرعت، نیازمند پژوهش‌های بیشتری است.



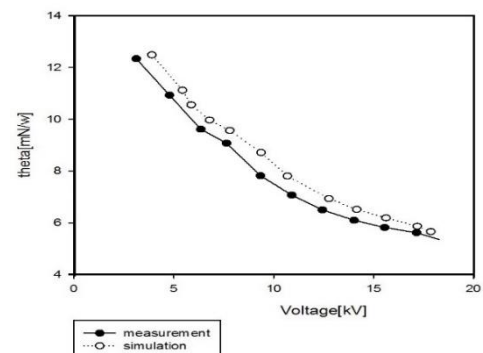
الف) جریان ورودی ۲ متر بر ثانیه



ب) جریان ورودی ۷ متر بر ثانیه



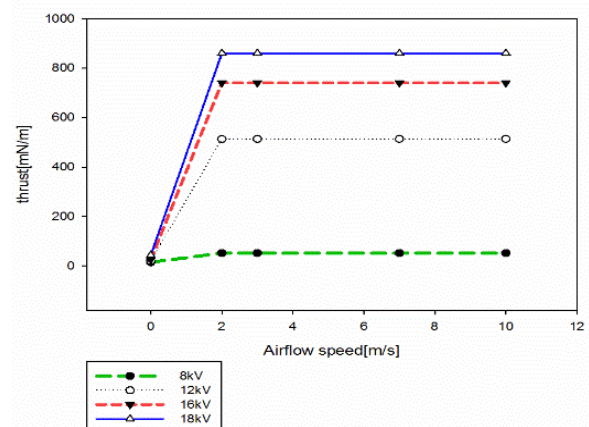
شکل ۴- مقایسه تغییرات جریان با ولتاژ در آزمایشگاه و شبیه سازی



شکل ۵- مقایسه تغییرات ضریب اثربخشی با ولتاژ، تجربی و شبیه سازی

– تاثیر جریان سیال بر نیروی پیشران در تخلیه کرونا

بررسی‌های انجام شده در مورد نیروی پیشران و نمایش آن در شکل ۶، حاکی از افزایش نیروی پیشران در هنگام افزایش سرعت جریان هوا است. اما نیروی پیشران، در ابتدا روند افزایشی و پس از رسیدن به بیشینه مقدار، روند ثابتی پیدا می‌کند حاکی از ثابت بودن مقدار بار فضایی تولیدی می‌باشد.



شکل ۶- نمودار تغییرات نیروی پیشران با سرعت در چند ولتاژ متفاوت.

## مراجع

[۱]- Chattock, A. P., Walker, W. E., Walker & Dixon, E. H. (۱۹۰۱). On the specific velocities of ions in the discharge from points. *Taylor Francis*, ۱, ۱, ۷۹-۹۸.

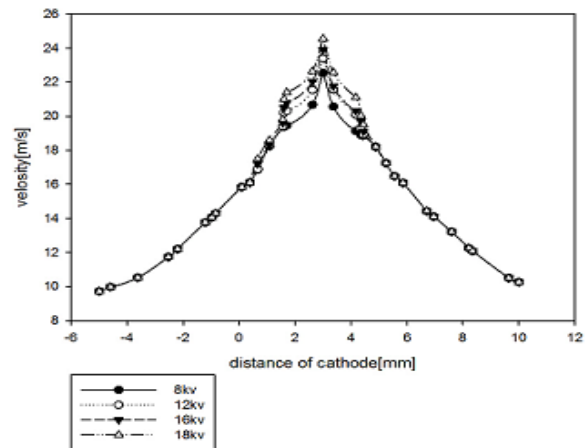
[2]- Xu., H., He, Y., Kieran, S., Christopher, G., Sean, K., Cooper, H., Thomas S., Mark, R.W., David, J. P. & Steven, R. (۲۰۱۸). Flight of an aero plane with solid-state propulsion, *Nature*, ۵۶۳.

[۳]- Colas, D. F., Ferret, A., Pai, D. Z., Lacoste, A., Laux. O., (۲۰۱۰). Ion wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Applied Physics*, ۱۰۸, ۱۰, ۱-۶.

[۴]- Moreau, E., Benard, N., Lan-Sun-Luk, J. D., Chabriat, J. P. (۲۰۱۳). Electrohydrodynamic force produced by a wire-to-cylinder dc corona discharge in air at atmospheric pressure, *Journal of Physics D Applied Physics*, ۴۶, ۴۷, ۱-۱۴.

[۵]- علیرضا فتحی، مهدی آهنگر. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی عددی رژیم تخلیه کرونا ایجادشده توسط پیکربندی سیم-سیلندر، در شرایط اتمسفریک، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*. ۱۸، ۲، ۳۲۳-۳۲۰.

[۶]- Gilmore K. C., and Barrett, S., (۲۰۱۵). Electrohydrodynamic thrust density using positive corona-induced ionic winds for in atmosphere propulsion. *Mathematical, Physical and Engineering Science Journal*, ۲۱۷۵, ۴۷۱.



ج) جریان ورودی ۱۰ متر بر ثانیه

شکل ۷- تغییر پروفیل سرعت با ولتاژ.

## جمع بندی

در پژوهش حاضر، مشخصات جریان الکترو هیدرودینامیک ناشی از رژیم تخلیه کرونای مثبت بین دو الکتروود با پیکربندی سیم-سیلندر، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی مشخصه‌های الکتریکی و الگوی جریان سیال، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- در یک ولتاژ ثابت (ولتاژ بین ۸ تا ۱۸ کیلوولت)، با افزایش سرعت جریان هوا، میدان الکتریکی افزایش و در یک سرعت جریان هوای، با افزایش ولتاژ، مقدار میدان الکتریکی افزایش می‌یابد.
- بررسی‌های انجام شده در مورد نیروی پیشران حاکی از افزایش نیروی پیشران در هنگام حضور جریان هوا بوده، ولی میزان افزایش تا ثابت شدن مقدار بار فضایی در اطراف الکتروودها ادامه خواهد داشت و پس از آن تغییر نمی‌کند. بیشترین مقدار نیروی پیشران مربوط به سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و در ولتاژ ۱۸ کیلوولت می‌باشد.
- افزایش ولتاژ در هر یک از سرعت‌ها، منجر به بیشتر شدن مقدار سرعت جریان هوا بر روی سطح کاتد شد و بیشترین اختلاف سرعت در حالت وجود پلاسما و عدم وجود آن، در ولتاژ ۱۸ و سرعت ورودی ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه و حدود ۲ متر بر ثانیه می‌باشد.