

## شبیه سازی عددی و مقایسه رژیم تخلیه کرونای مثبت و منفی تولیدشده در پیکربندی سیم-استوانه

## در شرایط اتمسفریک

معصومه آقایی ملک آبادی<sup>1</sup>، روح الله خوشخو<sup>2\*</sup><sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران<sup>2</sup> استادیار، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

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

کلید واژه: شبیه سازی عددی، شرایط اتمسفریک، عملگر پلاسمای کرونا

## چکیده

در یک دهه اخیر، استفاده از عملگرهای پلاسمای کرونا جهت کنترل جریان سیال مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، دو رژیم مختلف تخلیه کرونای مثبت و منفی در پیکربندی سیم-سیلندر مورد شبیه سازی قرار گرفته است. بدین منظور، معادلات الکترواستاتیکی و معادلات ناویر استوکس به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار کامسول حل شده اند. در ابتدا، نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی دیگران مورد صحت سنجی قرار گرفته و سپس مشخصات جریان هوای عبوری ناشی از تخلیه کرونای مثبت و منفی از قبیل سرعت، دما، میزان نیروی پیشران و توان مصرفی مورد مطالعه ای عددی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که با افزایش ولتاژ اعمالی بر آند، میزان نیروی پیشران و سرعت جریان سیال افزایش می یابد. علاوه بر این، توان الکتریکی مصرفی و دمای بیشینه و تغییرات سرعت جریان در کرونای مثبت از کرونای منفی کمتر است.

## Numerical Simulation and comparison of Positive and Negative Corona Discharge Generated in Wire-Cylinder Configuration under Atmospheric Conditions

Masoumeh Aghaei Malekabadi<sup>1</sup>, Rouhollah Khoshkhoo<sup>2\*</sup><sup>1</sup> MSc Student, Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran<sup>2</sup> Assistant Professor, Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University, Iran

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

## Abstract

In the last decade, the use of corona plasma actuators for control fluid flow has received more attention. In this research, two different positive and negative corona discharge have been simulated in the wire-cylinder configuration. For this purpose, the electrostatic and the Navier-Stokes equations are solved in finite element method using Comsol software. First, the simulation results are validated with the others experimental results, then the characteristics of the air flow due to positive and negative corona discharge, such as speed, temperature, thrust and power consumption are studied. The results show that by increasing voltage applied to the anode, the amount of thrust and fluid flow velocity increases. In addition, the power consumption and maximum temperature of the positive corona are lower than the negative corona. While the rate of velocity changes in the positive corona is greater than the negative corona.

**Keywords:** Atmospheric Conditions, Corona Plasma Actuator, Numerical Simulation

## مقدمه

جریان حول اجسام، کنترل جدایش در لایه مرزی است. یکی از راه های کنترل جریان استفاده از عملگرهای پلاسما می باشد. در این بین، عملگر پلاسمای کرونا، عملگرهایی هستند که بر پایه تخلیه الکتریکی کرونا می باشند. در این نوع عملگر، اختلاف ولتاژ بین

کنترل جریان یکی از مهمترین مسائل اساسی در علم آیرودینامیک می باشد که از دیرباز مورد توجه و علاقه دانشمندان علم آیرودینامیک قرار گرفته است. هدف اصلی از کنترل

در سال 2008، جول لارسن و همکاران برای اولین بار از نرم افزار کامسول برای شبیه سازی عددی جریان الکترو هیدرودینامیک استفاده و سپس آن را با نتایج تجربی مقایسه کردند [5].

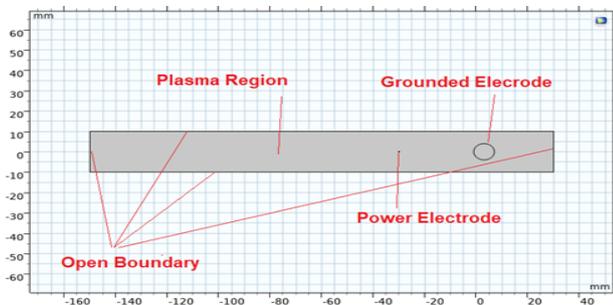
موریانو و همکاران برای درک بهتر پدیده الکترو هیدرودینامیک، آن را در یک پیکربندی سیم-سیلندریه صورت تجربی مطالعه کردند [6]. در این پژوهش، رابطه ی جریان الکتریکی با ابعاد کاتد و فاصله ی بین دو الکتروود و تفاوت میزان نیروی پیشران حاصل از اعمال ولتاژهای مثبت و منفی بررسی شد، گرچه مرجع [6] به صورت جامع اثرات پارامترهای عملکردی و هندسی در رژیم تخلیه کرونا را مورد مطالعه ی تجربی قرار داده است. اما رفتار الگوی جریان الکترو هیدرودینامیک مورد بررسی قرار نگرفته اند.

بنابراین برای درک بهتر فیزیک حاکم بر جریان پلاسما بین دو الکتروود، نمونه آزمایش بکار گرفته شده در مرجع [6] به صورت عددی شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در این شبیه سازی تلاش شده تا علاوه بر مطالعه پارامترهای عملکردی جریان الکترو هیدرودینامیک بین دو الکتروود، الگو و رفتار جریان سیال، مشخصه های الکتریکی رژیم تخلیه کرونا ی مثبت و منفی مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

### مشخصات مسئله

#### – هندسه مسئله و شبکه محاسباتی

هندسه بکار گرفته شده در مرجع [6] به صورت شماتیک در شکل ۲ قابل مشاهده است که فاصله ی دو الکتروود از هم ۲۵ میلی متر و قطر هریک از الکتروودها به ترتیب ۲۵ میکرومتر و ۱۲ میلی متر است.

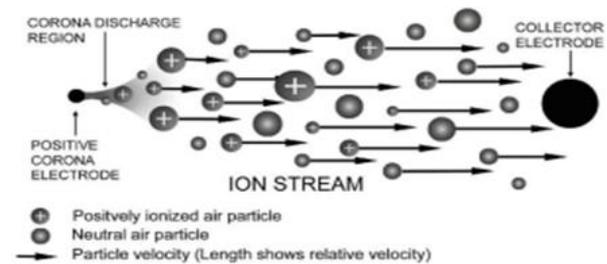


شکل ۲. هندسه ی مسئله

شبکه تولید شده که از نوع بی سازمان و مثلثی می باشد، در شکل ۳ نشان داده شده است. شبکه ی تولیدی دارای ۱۸۹۰ سلول محاسباتی بوده

دوالکتروود با ضخامت متفاوت تا جایی که قوس الکتریکی رخ ندهد، میدان الکتریکی در اطراف الکتروود آند ایجاد می کند که به طبع آن هوای اطراف آند یونیزه شده و پدیده تخلیه کرونا به وجود می آید. مطابق شکل ۱ که فرایند تخلیه کرونا را نشان می دهد، با به وجود آمدن یک میدان الکتریکی قوی در اطراف الکتروود آند، مولکول های هوایونیزه شده و به سمت الکتروود کاتد حرکت می کنند. برخورد یون ها با مولکول های خنثی باعث انتقال مومنتم شده و جریانی را بین دو الکتروود به وجود می آورد [۱].

تخلیه کرونا بسته به نوع ولتاژ اعمالی به الکتروود تخلیه کننده به دو گروه مثبت و منفی تقسیم می شوند. در کرونا ی منفی، یک ولتاژ منفی به الکتروود تخلیه کننده اعمال می شود. الکترون ها و یون های منفی به سمت صفحه زمین حرکت می کنند و یون های مثبت به سمت الکتروود حرکت می کنند. در کرونا ی مثبت، ولتاژ اعمالی و جهت جابجایی یون ها برخلاف کرونا ی منفی است.



شکل ۱. شماتیک تخلیه کرونا [۱]

یک تخلیه کرونا ی کنترل شده می تواند از طریق بارداد کردن ذرات اطراف آند و انتقال مومنتم آنها به ذرات خنثی دورتر از آند، جریانی را ایجاد می کند که جریان الکترو هیدرودینامیکی (EHD) می گویند. اولین مشاهده ی جریان EHD در سال 1709 توسط هاگزبی صورت گرفت [۲]. در اواخر قرن نوزدهم، چتوک برای نخستین بار باد الکتریکی را به صورت کمی مطالعه کرد [۳]. در سال 1957 هارنی مشخصات الکتریکی تخلیه کرونا و تغییر پارامترهای آیرودینامیکی جریان را برای بررسی میزان نیروی تولید شده توسط این پدیده بررسی نمود که نتایج وی تبدیل به مرجعی برای پژوهش های آینده گردید [۴].



که در این رابطه،  $\rho$  چگالی هوا،  $P$  فشار هوا و  $\mu$  لزجت دینامیکی هوا می باشد. ضمناً  $qE$  نشانگر نیروی کولمب می باشد. در نهایت برای بررسی تاثیر تخلیه ی کرونا بردمای جریان، معادله ی انرژی به صورت رابطه ای به شکل رابطه ی (7) نوشته می شود:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = -\nabla \cdot (K \nabla T) + Ej \quad (7)$$

در این معادله  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه ی هوا و  $K$  ضریب انتقال حرارت هوا می باشد. همچنین عبارت  $Ej$  بیانگر حرارت اهمی ناشی از افت ولتاژ بین دو الکترود است.

#### - شرایط مرزی و اولیه

باتوجه به اینکه شبیه سازی در شرایط اتمسفریک انجام می شود، فشار ثابت  $p = 1 \text{ atm}$  بر روی تمامی مرزهای خارجی اعمال شده است. در مرزهای خارجی فرض می شود که چگالی اتم های خنثی بیشتر از ذرات باردار است و مقدار پتانسیل و چگالی بار الکتریکی بر روی آنها برابر صفر است. بر روی الکترود کاتد نیز چگالی بار الکتریکی و ولتاژ اعمالی برابر صفر می باشد.

#### - روش حل عددی

حل عددی معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار کامسول نسخه ۵.۵ انجام شده است. این نرم افزار مسائل رابه روش المان محدود حل کرده و برای مطالعه ی جریان های پلاسما مناسب می باشد.

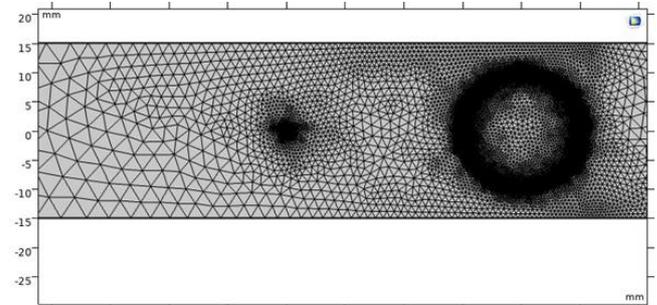
#### نتیجه گیری

برای بررسی صحت مدل عددی، دو پارامتر نیروی پیشران و جریان الکتریکی با نتایج مرجع [۶] مقایسه شده اند و خطای بیشینه ی آنها محاسبه شده است. جهت اختصار نویسی، مقایسه نتایج فقط برای کرونا ی منفی بیان گردیده است.

در شکل ۴، نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب ولتاژ نشان داده شده است. مشاهده می شود که نیروی پیشران با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می یابد. بیشترین میزان خطا برای کرونا ی مثبت ۶/۶ درصد و برای کرونا ی منفی ۷/۱۸ درصد است که حاکی از تطابق خوب نتایج عددی با مقادیر تجربی است.

در شکل ۵، نمودار تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ نشان داده شده است. با افزایش ولتاژ، جریان الکتریکی نیز افزایش می یابد.

و با اعمال گزینه توزیع (Distribution) روی سطح الکترودها در نرم افزار، در اطراف آند و کاتد تعداد سلولها بیشتر و ریزتر و در باقی دامنه ی حل ابعاد سلولها درشتتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. شبکه بندی

#### - معادلات حاکم

شبیه سازی عددی تخلیه کرونا نیازمند در نظر گرفتن همزمان معادلات الکترواستاتیک و ناویر-استوکس می باشد. در جریان های پلاسما، میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از طریق رابطه پواسون (۱) به یکدیگر مرتبط می شوند:

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

که  $q$  نشان دهنده ی چگالی بار الکتریکی و  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی هوا می باشد. همچنین چگالی جریان از رابطه ی (۲) قابل محاسبه است:

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

در این معادله،  $\mu_p$  ضریب تحریک پذیری یون های هوا،  $U$  سرعت جریان و  $D$  ضریب نفوذ پذیری یون هاست. پیوستگی چگالی بار الکتریکی با در نظر گرفتن معادله ی (۳) تضمین می گردد:

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (3)$$

بافرض جریان به صورت تراکم ناپذیر در پیرامون الکترودها، معادله ی پیوستگی به صورت معادله (۴) به دست می آید:

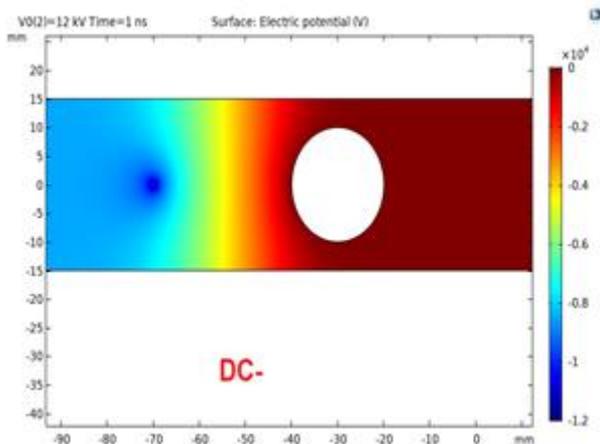
$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

باترکیب معادلات (۲)، (۳) و (۴) رابطه ی (۵) به دست می آید:

$$\nabla \cdot (\mu_p E q - D \nabla q) + U \cdot \nabla q = 0 \quad (5)$$

همچنین با در نظر گرفتن نیروی حجمی ناشی از میدان الکترواستاتیک، معادله ی ممتوم به صورت رابطه ی (۶) خواهد بود:

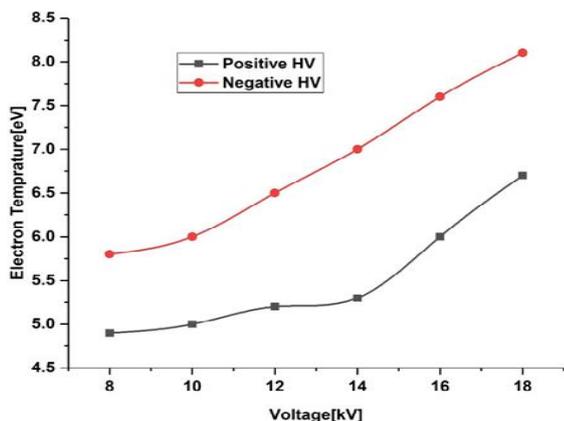
$$\rho U \cdot \nabla U = \nabla P + \mu \nabla^2 U + q E \quad (6)$$



شکل 6. توزیع پتانسیل الکتریکی

#### – بررسی اثر تخلیه کرونا بردمای سیال

باتوجه به رابطه‌ی مستقیم دما و ولتاژ به ترتیب با حرارت اهمی و میدان الکتریکی براساس رابطه‌ی (۲)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ولتاژ اعمالی، دما روندی صعودی دارد که این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است. با این حال باید در نظر داشت که چون جریان الکتروهایدرودینامیک در خانواده‌ی جریان‌های پلاسمایی رژیم سرد قرار دارد، افزایش دما به واسطه‌ی افزایش ولتاژ اعمالی در این نوع از جریان‌ها چشم‌گیر نمی‌باشد.



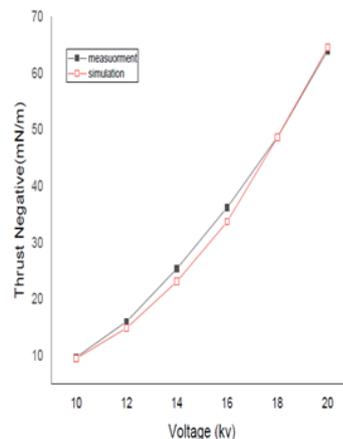
شکل ۷. نمودار دمای بیشینه کرونای مثبت و منفی برحسب ولتاژ

#### – بررسی توان الکتریکی مصرفی نسبت به ولتاژ

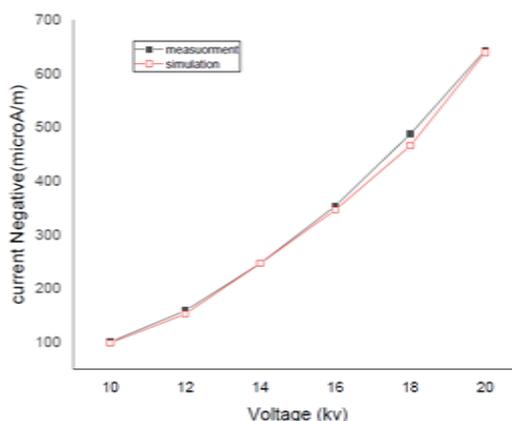
توان الکتریکی مصرفی از حاصل ضرب ولتاژ در جریان طبق رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$P = V \times I = C \times V^2 (V - V_0) \quad (8)$$

بیشترین میزان خطا برای کرونای مثبت در حدود ۵/۱۴ درصد و برای کرونای منفی ۶/۰۸ درصد است. جریان الکتریکی نیز همچون نیروی پیشران به صورت سهمی برحسب ولتاژ تغییر می‌کند.



شکل ۴. نمودار تغییرات نیروی پیشران کرونای منفی برحسب ولتاژ



شکل ۵. نمودار تغییرات جریان الکتریکی کرونای منفی برحسب ولتاژ

#### – الگوی توزیع پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی

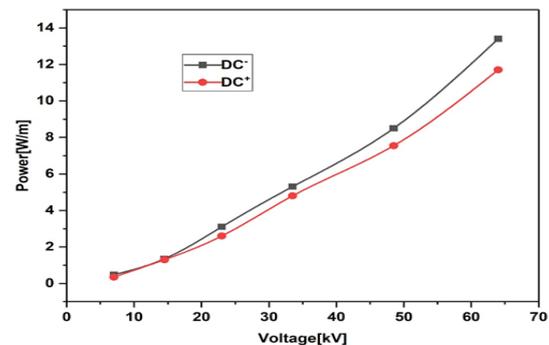
در شکل ۶، الگوی توزیع پتانسیل الکتریکی پس از رسیدن به شرایط پایا مشاهده می‌شود. مقدار پتانسیل الکتریکی در سطح آند بیشینه است و با حرکت به سمت کاتد کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. باتوجه به اینکه مرزهای بیرونی در بی‌نهایت فیزیکی واقع شده‌اند، مقدار پتانسیل در این مرزها نیز به صفر میل می‌کند.

- مقدار پتانسیل الکتریکی در سطح آند بیشینه است و با حرکت به سمت کاتد کاهش می‌یابد تا به صفر برسد.
- در تولید نیروی پیشران یکسان، کرونا مثبت توان الکتریکی مصرفی کمتری نسبت به کرونا منفی مورد نیاز دارد.
- در یک میزان ولتاژ، دمای بیشینه تولیدی در کرونا منفی بیشتر از کرونا مثبت است.
- تغییرات سرعت جریان ناشی از تخلیه کرونا مثبت در یک ولتاژ یکسان کمتر از کرونا منفی می‌باشد.

### مرجع ها

- [1] Yang, F., Jewell-Larsen, N. E., Brown, D. L., Parker, D.A., Pendergrass, K. A., Krichtafovitch, I. A., and Mamishev, A. V. (2003). Corona Driven Air Propulsion for Cooling of Electronics. 8<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.
- [2] Hauksbee .F.(1709), *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects*, London: Brugis, Edition 1.
- [3] Chattock.A. P.(1899), On the velocity and mass of the ions in the electric wind in air. *Philosophical Magazine*. 48, 294, 401–420.
- [4] Harney.D. J.(1957), *An Aerodynamic Study of the Electric Wind*, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.
- [5] Jewell-Larsen, N. E., Karpov, S. V., Krichtafovitch, I. A., Jayanty ,V., Hsu ,C. P., Mamishev ,A.V.(2008), Modeling of corona-induced electrohydrodynamic flow with COMSOL multi physics, *Proceedings ESA Annual Meeting on Electrostatics*, Minneapolis, Minnesota , Paper E1.
- [6] Moreau, E., Benard ,N., Lan-Sun-Luk, J. D., Chabriat ,J. P. (2013), Electrohydrodynamic force produced by a wire-to-cylinder dc corona discharge in air at atmospheric pressure, *Journal of Physics D Applied Physics*, 46, 47, 1-14.

برای بهینه‌سازی بهتر تولید بیشترین نیروی پیشران به کمترین توان الکتریکی نیاز است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در کرونا مثبت توان الکتریکی مصرفی کمتری مورد نیاز است.



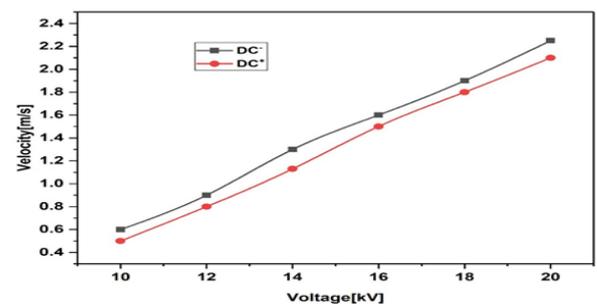
شکل ۸. نمودار توان الکتریکی مصرفی کرونا مثبت و منفی برحسب ولتاژ

### - بررسی تغییرات سرعت در تخلیه کرونا

رابطه‌ی سرعت با ولتاژ طبق رابطه‌ی (۹) در جریان الکترو هیدرودینامیک رابطه‌ای خطی می‌باشد:

$$I = C \times V(V - V_0) \quad (9)$$

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت در یک ولتاژ یکسان برای کرونا منفی بیشتر از مثبت می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات سرعت کرونا مثبت و منفی برحسب ولتاژ

### جمع بندی

در این تحقیق، مشخصات جریان الکترو هیدرودینامیک ناشی از رژیم تخلیه کرونا مثبت و منفی بین دو الکتروود با پیکربندی سیم-سیلندر، به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار کامسول مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی مشخصه‌های الکتریکی و الگوی جریان سیال، نتایج زیر حاصل شد: