

# شبیه‌سازی عددی تأثیر دما، رطوبت و باد جانبی بر تخلیه پلاسمای کرونا در پیکربندی سیم-استوانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

روح الله خوشخو<sup>۱</sup>، رضا کرامتیان<sup>۲</sup>، معصومه آقایی ملک‌آبادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. r.khoshkhoo@aut.ac.ir

<sup>۲،۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

## چکیده

امروزه، استفاده از تکنولوژی پلازما جهت کاهش صدای هواپیما، افزایش اختفاء راداری، کاهش آلودگی زیست محیطی، افزایش سرعت وسایل پرنده و افزایش راندمان در مصرف انرژی جزء اهداف اصلی صنعت هوایی می‌باشد. یکی از اقسام پیشران پلازما، استفاده از تخلیه پلاسمای کرونا است که از دو الکترود با شعاع‌های متفاوت تشکیل شده است. تحقیق حاضر بر روی یک پیکربندی سیم-استوانه تخلیه کرونا صورت گرفته و مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. سپس تأثیر زاویه حمله بین دو الکترود روی تخلیه کرونا بررسی شد. نتایج به دست آمده، حاکی از آن است که افزایش میزان جانبی می‌تواند میزان ضریب اثربخشی تخلیه کرونا را تا ۵۰ درصد در ولتاژ ثابت، کاهش دهد. در نهایت، در این تحقیق، تأثیر رطوبت و دما بر تخلیه کرونا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد، با افزایش میزان درصد رطوبت و دما، میزان ضریب اثربخشی، توان مصرفی و میزان نیروی پیشران نیز افزایش محسوسی می‌یابد. در ولتاژ ثابت ۱۰ کیلوولت، با افزایش ۷۵ درصدی میزان رطوبت، میزان راندمان تا حدود ۵۸ درصد و با افزایش ۳۰ درجه‌ای دما، میزان راندمان تا ۶۰ درصد می‌تواند افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: عملگر پلاسمای کرونا، شبیه‌سازی عددی، تأثیر باد جانبی، نیروی پیشران، رطوبت، دما

## Numerical simulation of the effect of temperature, humidity and lateral Wind on corona plasma discharge in wire-cylinder configuration

Rouhollah Khoshkhoo<sup>1\*</sup>, Reza Keramatian<sup>2</sup>, Masoumeh Aghaei Malekabadi<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Aerospace Engineering-Aerodynamics, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran  
2, 3. MSc. Student, Aerospace Engineering-Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

### Abstract

Today, utilizing plasma technology to reduce aircraft noise, enhance radar stealth, diminish environmental pollution, increase the speed of flying vehicles, and improve energy efficiency are among the primary objectives of the aviation industry. One type of plasma propulsion involves using corona discharge, which consists of two electrodes with different radii. The current study focuses on a wire-cylinder configuration of corona discharge and has been validated. Then, the effect of the attack angle between the two electrodes on the corona discharge was examined. The results indicate that an increase in lateral wind can reduce the effectiveness of corona discharge by up to 50 percent at a constant voltage. Finally, this research investigates the impact of humidity and temperature on corona discharge. Numerical results show that with an increase in humidity percentage and temperature, the efficiency coefficient, power consumption, and thrust significantly increase. At a constant voltage of 10 kilovolts, a 75 percent increase in humidity can enhance efficiency by about 58 percent, and a 30-degree increase in temperature can increase efficiency by up to 60 percent.

**Keywords:** Corona Plasma Actuator, Numerical Simulation, Lateral Wind Effect, Thrust, Humidity, Temperature.

۱۵۱

سال ۱۴ - شماره ۱

پیاورد تابستان ۱۴۰۴

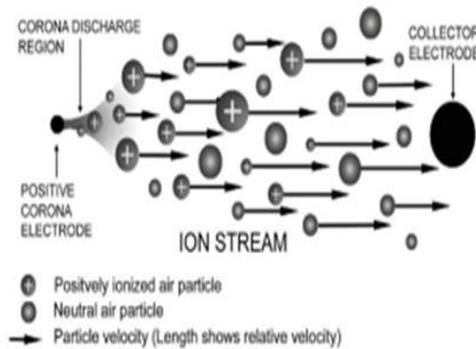
نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



## ۱- مقدمه

صفحه زمین حرکت می‌کنند و یون‌های مثبت به سمت الکتروود حرکت می‌کنند. در کرونا‌ی مثبت، ولتاژ اعمالی و جهت جابجایی یون‌ها برخلاف کرونا‌ی منفی است.



شکل ۱. شماتیک تخلیه کرونا [۲]

تخلیه کرونا‌ی کنترل شده می‌تواند از طریق باردار کردن ذرات اطراف آند و انتقال مومنتم آنها به ذرات خنثی دورتر از آند، جریان سیالی را ایجاد کند که به آن جریان الکتروهیدرودینامیکی<sup>۱</sup> (EHD) گفته می‌شود. این رانشگرها دارای وزن سبک و سهولت در ساخت بوده و قادر به انجام کار در گستره‌ی وسیعی از شرایط محیطی می‌باشند، اما از طرفی راندمان پایینی دارند و به دلیل افزایش تحرک یون‌ها در ارتفاعات بالا، این راندمان کاهش می‌یابد. به هر حال، مطالعات و تحقیقات صورت گرفته جهت افزایش راندمان این رانشگرها می‌باشد. بوندار و باستین در پژوهش خود با استفاده از سرعت ورودی  $50 \text{ m/s}$  توانستند میزان راندمان رانشگر را تا  $7/5$  درصد افزایش دهند [۴ و ۳]. در سال ۱۹۵۷، هارنی مشخصات تخلیه کرونا و تغییر پارامترهای آیرودینامیکی جریان را برای بررسی میزان نیروی پیشران توسط این پدیده بررسی نمود. در این تحقیق، رابطه‌ای بین فشار جریان هوا و جریان الکتریکی در تخلیه کرونا بین دو الکتروود صفحه‌ای به دست آورد [۵].

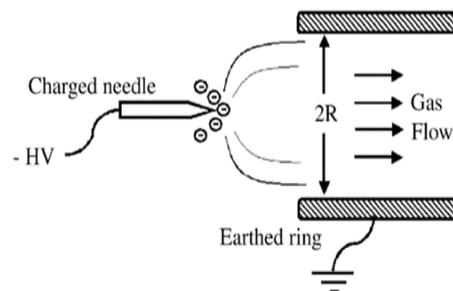
در ۱۰۰ سال گذشته، از زمان اولین پرواز هواپیما تاکنون، برای پرواز از سطوح متحرک مثل پروانه‌ها و توربین‌ها استفاده می‌شده که بیشتر آن‌ها با سوخت فسیلی کار می‌کنند. امروزه، الکتروآیرودینامیک که در آن نیروهای الکتریکی به یون‌ها در سیال سرعت می‌بخشند، به عنوان یک روش جایگزین برای تولید نیروی پیشران هواپیماهای پیشرو، بدون قطعات متحرک، تقریباً بی‌صدا و بدون نیاز به سوخت و احتراق، پیشنهاد شده است [۱].

یک نمونه از عملگرهای پلاسما، عملگر پلاسما‌ی کرونا می‌باشد. عملگر پلاسما‌ی کرونا، عملگرهایی هستند که بر پایه تخلیه الکتریکی کرونا می‌باشند. در این نوع عملگر، با افزایش اختلاف ولتاژ بین دو الکتروود با ضخامت‌های متفاوت تا جایی که قوس الکتریکی رخ ندهد، میدان الکتریکی در اطراف الکتروود آند افزایش می‌یابد که به تبع آن گازهای اطراف آند یونیزه شده و پدیده تخلیه کرونا بوجود می‌آید. این فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱، با به وجود آمدن یک میدان الکتریکی قوی در اطراف الکتروود آند (الکتروود سیم)، مولکول‌های هوا یونیزه شده و به سمت الکتروود کاتد (الکتروود استوانه) حرکت می‌کنند. برخورد یون‌ها با مولکول‌های خنثی باعث انتقال مومنتم شده و جریانی را بین دو الکتروود به وجود می‌آورد [۲].

تخلیه کرونا بسته به نوع ولتاژ اعمالی به الکتروود تخلیه کننده به دو نوع کرونا‌ی مثبت و منفی تقسیم می‌شوند. در کرونا‌ی منفی، یک ولتاژ منفی به الکتروود تخلیه کننده اعمال می‌شود. الکترون‌ها و یون‌های منفی به سمت

کریستنسون و همکاران به بررسی تئوری و تجربی تخلیه آیرودینامیکی کرونا یک سیستم پیشران پرداختند و متوجه شدند که میزان تولید پلاسما با مقدار ولتاژ کاربردی کرونا متناسب است و تحرک یونی عامل مهمی در میزان نیروی پیشران است [۶]. روابطی که طی این سال ها بر اساس پژوهش های تجربی بدست آمدند، تنها قادر به حل تحلیلی مسائل بسیار ساده یک بعدی بودند و در مسائل دو یا سه بعدی کارایی لازم را نداشتند. از این رو توسعهی روش های عددی برای مطالعهی جریان EHD به یک ضرورت بدل شد. در همین زمان، روش المان محدود نیز ابداع شد و دیویس یکی از نخستین پژوهش های عددی در زمینه تخلیه کرونا را انجام داد [۷].

ژائو و آدامیاک در سال ۲۰۰۵، جریان ثانویه حاصل از تخلیه کرونا در آرایش های الکترودی سوزنی- صفحه ای و سوزنی- شبکه ای را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند [۸]. ریکارد و همکاران به بررسی مشخصه های سرعت باد یونی حاصل از تخلیه کرونا منفی در لوله ای با هندسه الکترودی سوزنی- حلقه ای پرداختند که طرحواره ای از این آرایش در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که در هسته جریان، سرعت سیال کاهش می یابد [۹].



شکل ۲. طرحواره آرایش الکترودی سوزن- حلقه برای تولید باد یونی [۹]

در سال ۲۰۰۸، جول لارسن و همکاران به بررسی شبیه سازی تخلیه کرونا با استفاده از نرم افزار کامسول برای اولین بار پرداختند و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند و متوجه شدند که نتایج عددی و شبیه سازی توافق خوبی بایکدیگر دارند و در محدوده ولتاژ ۴ تا ۸ کیلوولت، میانگین درصد خطا بین نتایج تجربی و عددی در حدود ۴ درصد است [۱۰]. موریانو و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی تخلیه کرونا در پیکربندی سیم-استوانه پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که جریان الکتریکی متناسب با مجذور قطر الکتروود کالکتور می باشد. همچنین، در صورت فاصله بین الکتروودها بیشتر از ۳۰ میلی-متر، میزان تراست برحسب جریان الکتریکی در کرونای مثبت و منفی مشابه می باشد [۱۱].

موریانو در پژوهش تجربی بعدی در سال ۲۰۱۵، به بررسی تاثیر تعداد الکتروودهای جمع کننده بر میزان نیروی پیشران و ضریب اثربخشی پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از دو الکتروود جمع کننده نسبت به استفاده از یک سیم- یک الکتروود جمع کننده، دارای میزان نیروی پیشران و ضریب اثربخشی بیشتر خواهد بود. همچنین، بهترین راه جهت افزایش ضریب اثربخشی، افزایش میزان فاصله الکتروودها می باشد که این امر منجر به افزایش میزان ولتاژ نیز می گردد [۱۲]. وانگ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷، به بررسی بهبود انتقال حرارت با استفاده از تخلیه کرونا پرداختند. جهت انجام تحقیق، از پیکربندی سیم-استوانه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان ولتاژ و تعداد سیم ها (امیترها) میزان ضخامت لایه مرزی حرارتی را کاهش داده و میزان تغییرات سرعت در لایه مرزی را افزایش





می دهد. همچنین، افزایش تعداد سیم‌ها به سه سیم، میزان ضخامت لایه مرزی حرارتی تا  $39/8$  درصد کاهش می‌یابد [۱۳]. در سال ۲۰۱۸، بینیکسان و همکارانش، اثر دما بر روی تخلیه الکتریکی منفی را برای هوای خشک و فشار اتمسفر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای محیط اندازه پالس‌های تریشل<sup>۲</sup>، مدت زمان پالس و فرکانس پالس، افزایش می‌یابد [۱۴].

در سال ۱۳۹۷، طی تحقیقات صورت گرفته توسط فتحی و آهنگر در رابطه با تخلیه ی کرونا در پیکربندی سیم-سیلندر، مشخصات جریان ناشی از تخلیه کرونا از قبیل سرعت، نیروی پیشران، دما، جریان الکتریکی و بازده مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ اعمالی بر آند، نیروی پیشران و جریان الکتریکی افزایش و راندمان نیروی پیشران کاهش می‌یابد. علاوه بر این با در نظر گرفتن اثر گرمایش اهمی در معادله‌ی انرژی مشاهده شد که بیشینه‌ی دما در اطراف الکتروود آند رخ می‌دهد [۱۵].

یان و همکارش در سال ۲۰۲۲، به بررسی تجربی رفتار تخلیه کرونا در هوای مه‌آلود در پیکربندی صفحه صفحه پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تاثیر قطرات آب در هوای مه‌آلود از تاثیر رطوبت هوا بر تخلیه کرونا بیشتر است [۱۶]. زحمتکش پسند و همکاران در سال ۲۰۲۳، با استفاده از شبیه‌سازی به بررسی تاثیر شرایط آب و هوایی بر روی عملکرد تخلیه کرونا بر روی یک توربین باد با محور افقی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که افزایش میزان دما و رطوبت، میزان مکش جریان بر روی سطح پره توربین باد را کاهش می‌دهد و بر روی تخلیه

کرونا با پیکربندی صفحه-صفحه اثر منفی دارد [۱۷].

بنابراین برای درک بهتر فیزیک حاکم بر جریان پلاسمای بین دو الکتروود، نمونه آزمایش بکار گرفته شده در مرجع [۱۱] به صورت عددی شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات گذشته، تاثیر شرایط محیطی در تخلیه کرونا به طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته بود. همچنین، تاثیر زاویه بین الکتروودها و تاثیر تغییر همزمان فشار و دما نیز مورد بررسی قرار نگرفته بود. در این تحقیق تلاش شده تا به مطالعه تأثیر شرایط محیطی، از قبیل فشار هوای محیط، دما، رطوبت و تاثیر زاویه بین الکتروودها بر تخلیه کرونا در این پیکربندی پرداخته و مورد بررسی قرار گیرد. تا تحت شرایط محیطی مختلف، میزان چگالی پلاسما، میزان نیروی پیشران، ضریب اثربخشی، میزان توان مصرفی و میزان جریان الکتریکی به دست آید.

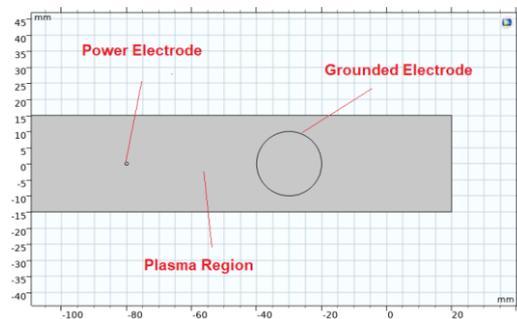
## ۲- مشخصات مسئله

### ۲-۱- هندسه مسئله و شبکه محاسباتی

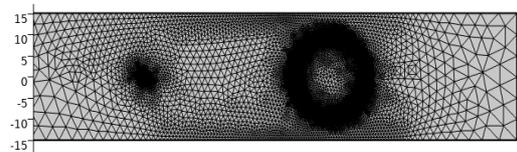
هندسه بکار گرفته شده در مرجع [۱۱] به صورت شماتیک در شکل ۳ قابل مشاهده است که فاصله‌ی دو الکتروود از هم ۲۵ میلی‌متر و قطر هر یک از الکتروودها به ترتیب ۲۵ میکرومتر و ۱۲ میلی‌متر است. در این شبیه‌سازی، رطوبت نسبی هوا ۶۲ درصد فرض شده و در این سیستم، جریان هوا به سیستم وارد نشده و تنها تخلیه کرونا مورد بررسی قرار گرفته است.

شبکه تولید شده که از نوع بی‌سازمان و مثلثی می‌باشد در شکل ۴ نشان داده شده است. شبکه‌بندی مثلثی بخاطر گرادیان میدان الکتریکی شدید گزینه مناسبی برای شبکه‌بندی می‌باشد.

برای تولید این شبکه از گزینه‌ی ساخت شبکه برای مطالعه‌ی جریان پلاسما در نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. شبکه‌ی تولیدی دارای ۵۴۹۴ سلول محاسباتی بوده و با اعمال گزینه توزیع<sup>۳</sup> روی سطح الکترودها در نرم‌افزار، در اطراف آند و کاتد تعداد سلول‌ها بیشتر و ابعاد آنها ریزتر و در باقی دامنه‌ی حل ابعاد سلول‌ها درشت‌تر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. شماتیکی از هندسه سیم-سیلندر مورد استفاده



شکل ۴. شبکه بندی هندسه سیم-سیلندر در نرم افزار کامسول

## ۲-۲- معادلات حاکم بر مسئله

شبیه‌سازی عددی تخلیه کرونا به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است و نیازمند در نظر گرفتن همزمان معادلات الکترواستاتیک و ناویر-استوکس می‌باشد. در جریان‌های پلاسما، میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از طریق رابطه پواسون (۱) به یکدیگر مرتبط می‌شوند [۱۴]:

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

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

$$j = \mu_p Eq + Uq - D\nabla q \quad (2)$$

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

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

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

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

با ترکیب معادلات (۲)، (۳) و (۴) رابطه‌ی (۵) به صورت زیر قابل محاسبه است:

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

همچنین با در نظر گرفتن نیروی حجمی ناشی از میدان الکتریکی، معادله‌ی ممنتوم به صورت رابطه‌ی (۶) خواهد بود:

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

که در این رابطه،  $\rho$  چگالی هوا،  $P$  فشار هوا و  $\mu$  لزجت دینامیکی هوا می‌باشد. ضمناً  $qE$  نشانگر نیروی کولمب می‌باشد. در نهایت برای بررسی تأثیر تخلیه‌ی کرونا بر دمای جریان، معادله‌ی انرژی به صورت رابطه‌ی (۷) بیان می‌گردد:

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

در این معادله  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه‌ی هوا و  $K$  ضریب انتقال گرمای هوا می‌باشد. همچنین عبارت  $Ej$  بیانگر گرمای اهمی ناشی از افت ولتاژ بین دو الکترودها می‌باشد.

میزان میدان الکتریکی بر روی الکترودها با توجه به صاف بودن سطح آن، با استفاده از فرمول پیک<sup>۴</sup> [۱۸]، در رژیم تخلیه کرونا تحت شرایط استاندارد، از رابطه (۸) تخمین زده می‌شود:

$$E_e = E_0 (1 + (0/0262 / \sqrt{R_0})) \quad (8)$$



در این رابطه  $R_e$  شعاع آند و  $E_0 = 3/31 \times 10^6$   $V/m$  است. در ادامه، تعدادی از روابط و معادلاتی که جهت بررسی نتایج به دست آمده مورد استفاده قرار می گیرد، ارائه شده است. در عملگرهای الکتریکی، پارامتر عملکردی ضریب تأثیر نیروی پیشران طبق رابطه ی زیر تعریف می شود:

$$\theta = \frac{F_{EHD}}{P} = \frac{d}{\mu V} \quad (9)$$

که  $\mu$  ضریب تحریک یونی و  $d$  فاصله بین الکترودها و ولتاژ بین الکترودها می باشد. طبق معادله (۹)، ضریب اثر بخشی با فاصله الکترودها،  $d$  افزایش می یابد و هنگامی که تحریک یونی  $\mu$  افزایش می یابد، میزان اثر بخشی کاهش می یابد. سرعت یونی ایجاد شده در تخلیه کرونا به دو عامل سرعت سیالی و رانشی وابسته است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$v_i = v + \mu E \quad (10)$$

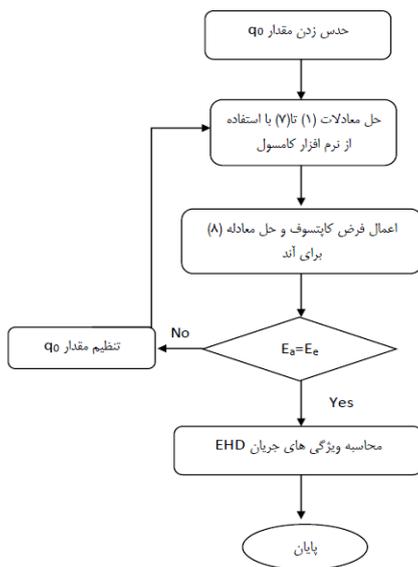
که در این رابطه،  $v_i$  میزان سرعت یونی و  $v$  میزان سرعت سیال و  $E$ ، میزان میدان الکتریکی و  $\mu$  ضریب تحرک یونی می باشد.

### ۲-۳- مکانیزم تولید چگالی بار الکتریکی

فاصله ی بین دو الکتروود را از لحاظ چگالی بار الکتریکی می توان به دو ناحیه تقسیم کرد. در نزدیکی کاتد به دلیل وجود تعداد تقریباً مساوی از الکترون ها و یون های مثبت، می توان از چگالی بار الکتریکی صرف نظر کرد، اما در اطراف آند، مقادیر چگالی یون های هم نام و اتم های خنثی هوا، غالب می باشند. بنابراین مقدار چگالی بار در این ناحیه قابل صرف نظر کردن نیست.

شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی می تواند با استفاده از فرض کاپتسوف<sup>۵</sup> در ناحیه ی یونیزاسیون اعمال شود. طبق این فرض، قبل از

شروع رژیم کرونا، میدان الکتریکی متناسب با اختلاف پتانسیل اعمالی افزایش می یابد، اما پس از شروع کرونا، مقدار آن ثابت می ماند. در این تحقیق، ناحیه ی یونیزاسیون کوچک در نظر گرفته شده و از آن صرف نظر شده است. بنابراین، شدت میدان الکتریکی در سطح آند، با استفاده از معادله (۸) تخمین زده شده است. با توجه به اینکه معادله ی صریحی برای تعیین مقدار چگالی بار الکتریکی بر روی سطح آند در دسترس نمی باشد، از یک روش تکرار برای مشخص کردن مقدار این متغیر استفاده شده است. در این روش، ابتدا مقدار چگالی بار الکتریکی حدس زده شده و سپس به ازای این مقدار، معادلات تا رسیدن به حالت پایا حل می شوند. در صورتی که مقدار متوسط میدان الکتریکی محاسباتی بر روی آند با مقدار بدست آمده از فرمول پیک برابر باشد، محاسبه چگالی بار الکتریکی پایان می پذیرد؛ در غیر این صورت حدس اولیه تصحیح و الگوریتم ذکر شده مجدداً تکرار می شود. الگوریتم محاسبه چگالی بار الکتریکی آند، در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. محاسبه چگالی بار الکتریکی آند

## ۴-۲- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به اینکه شبیه‌سازی در شرایط اتمسفریک انجام می‌شود، فشار محیط  $p=1 \text{ atm}$  در نظر گرفته شد. در مرزهای خارجی فرض شد که چگالی اتم‌های خنثی بیشتر از ذرات باردار است و لذا جریان هوا تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار نمی‌گیرد، بنابراین مقدار پتانسیل و چگالی بار الکتریکی بر روی آنها برابر صفر در نظر گرفته شده است. مقدار چگالی بار الکتریکی بر روی سطح کاتد با توجه به توضیحات بخش قبلی، برابر صفر در نظر گرفته شد. میزان ولتاژ الکتریکی بر این الکتروود کاتد برابر صفر فرض شد. لازم به ذکر است که دمای آزمایش نیز  $293/15$  درجه‌ی کلون گزارش شده است. در جدول ۱، شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی، چگالی بار الکتریکی و شرایط جریان آرام در کل دامنه حل مسئله نشان داده شده است.

جدول ۱. شرایط مرزی

مرز	چگالی بار الکتریکی	پتانسیل الکتریکی	جریان
جریان ورودی	$q=0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	جریان عمودی
جریان خروجی	$q=0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$P=1 \text{ atm}$
مرزهای باز	$q=0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	جریان آزاد
آند	روش تکراری	$V = V_0$	عدم لغزش
کاتد	$q=0$	$V = 0$	عدم لغزش

## ۳- روش حل عددی

حل عددی معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار کامسول  $5/5^e$  انجام شده است. در این نرم‌افزار، از روش المان محدود برای حل مسائل و بررسی جریان پلاسما استفاده می‌شود. از حلگر مستقیم

<sup>۷</sup> پارادیسو<sup>۸</sup> جهت کوپل کردن معادلات (۱) تا (۷) استفاده شده است [۱۹]. برای دستیابی به حل پایای معادلات ذکر شده، با توجه به غیرخطی بودن معادلات، گزینه‌ی "شدیداً غیر خطی"<sup>۹</sup> در تنظیمات حلگر مذکور فعال شد. همچنین در قسمت تنظیمات معادله غیر خطی، از محدوده خطای نسبی ۰/۰۱ استفاده شد.

## ۳-۱- انواع واکنش‌های صورت گرفته در شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی در شرایط اتمسفریک از ۷۸ درصد گاز نیتروژن و ۲۲ درصد گاز اکسیژن استفاده شده است. نهایتاً تعدادی واکنش که در این سیستم رخ می‌دهد، به آن اضافه شده است. واکنش‌های اضافه شده به سیستم به شرح زیر است:

### ۱- برخورد الکترون

واکنش‌های الکترون با گونه‌های خنثی که منجر به فرآیندهایی نظیر یونیزاسیون، چسبندگی، برانگیختگی و ... می‌شود، که در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. واکنش‌های برخورد الکترون

Reaction <sup>۱۰</sup>	Collision Type
$e+O_2 \Rightarrow 2e+O_2^+$	Ionization
$e+O_2 \Rightarrow O+O^-$	Attachment
$e+O_2 \Rightarrow e+O+O$	Excitation
$e+O_2 \Rightarrow e+O+Os$	Excitation
$e+O_2 \Rightarrow e+O_2s$	Excitation
$e+N_2 \Rightarrow 2e+N_2^+$	Ionization
$e+N_2 \Rightarrow e+N+N$	Excitation
$e+N_2 \Rightarrow e+N+Ns$	Excitation
$e+N_2 \Rightarrow e+N_2s$	Excitation
$e+N_2 \Rightarrow N_2^-$	Attachment
$N_2+N_2+e \Rightarrow N_2+N_2^-$	Attachment



## ۲- واکنش‌های Reaction

نوع دیگر واکنش‌ها در نرم‌افزار کامسول تحت عنوان Reaction هستند، که واکنش بین گونه‌های سنگین با یکدیگر است، که در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. واکنش‌های Reaction

Reaction	Reaction Rate <sup>۱۱</sup>
$O+O_2+N_2 \Rightarrow O_3+N_2$	199/7
$N+O_2 \Rightarrow NO+O$	51/2
$N+O_3 \Rightarrow NO+O_2$	120
$O+O_3 \Rightarrow O_2+O_2$	4700
$O+NO_2 \Rightarrow O_2+NO$	$5/4 \times 10^6$
$O+NO_3 \Rightarrow O_2+NO_2$	$1/2 \times 10^7$
$N+O_2 \Rightarrow NO+O$	46/35
$N+O_3 \Rightarrow NO+O_2$	140
$N+NO_3 \Rightarrow NO+NO_2$	$5/4 \times 10^6$
$O+NO_2+N_2 \Rightarrow NO_3+N_2$	$5/4 \times 10^5$
$Os+NO_2 \Rightarrow NO+O_2$	$4/5 \times 10^7$
$NO+O_3 \Rightarrow NO_2+O_2$	$1/2 \times 10^4$
$O+O_2+N_2 \Rightarrow O_3+N_2$	189
$O+O+N_2 \Rightarrow O_2+N_2$	242
$N+NO_2 \Rightarrow NO+NO$	$1/3 \times 10^6$
$e+N_2^+ \Rightarrow N_2$	$3 \times 10^{16}$
$N_2^++N_2^- \Rightarrow 2N_2$	$1/2 \times 10^{18}$

## ۳- واکنش سطحی<sup>۱۲</sup>

همان‌طور که از اسم این نوع واکنش مشخص است، واکنش روی سطح اجسام رخ می‌دهد. واکنش‌های سطحی که شامل فرآیندهای گسیل ثانویه<sup>۱۳</sup> می‌شوند. منظور از فرآیندهای گسیل ثانویه کنده شدن الکترون، از سطح الکتروود است که در پایسته شدن پلاسما نقش تعیین‌کننده‌ای دارد، که در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. در این جدول، یون اکسیژن یک بار یونیزه مثبت به صورت  $O_2^+$ ، یون نیتروژن یک بار یونیزه مثبت به صورت  $N_2^+$  و یون اکسیژن و نیتروژن یک بار

یونیزه منفی به ترتیب به صورت  $O_2^-$  و  $N_2^-$  نشان داده شده‌اند. اتم اکسیژن یک بار منفی نیز به صورت  $O^-$  نشان داده شده است.

جدول ۴. واکنش‌های سطحی

Reaction	Secondary Emission Coefficient	Mean Energy of Secondary Electron
$O_2^+ \Rightarrow O_2$	0/01	3
$O_2^- \Rightarrow O_2$	0/05	3
$N_2^+ \Rightarrow N_2$	0/01	3
$N_2^- \Rightarrow N_2$	0/05	3
$N_2^+ \Rightarrow N_2$	0/01	2.5
$O^- \Rightarrow O$	0/01	2.5

در چهار واکنش اولیه، گسیل ثانویه اتفاق افتاده است. در واکنش‌های ۵ و ۶ گسیل ثانویه روی کاتد وجود دارد، اما روی آند نداریم. نهایتاً، بر روی الکتروود با شعاع کمتر، ولتاژ منفی اعمال گردیده است.

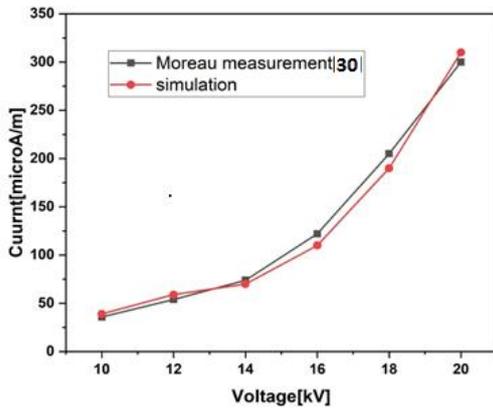
## ۳-۲- اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور بررسی صحت مدل به کار گرفته شده در این قسمت، سه پارامتر نیروی پیشران، جریان الکتریکی و ضریب تأثیر با نتایج اندازه‌گیری شده در مرجع [۱۱]، خطای بیشینه هرکدام از آن‌ها محاسبه شده است.

## ۳-۲-۱- اعتبارسنجی نیروی پیشران

نمودار تغییرات نیروی پیشران برحسب مقادیر ولتاژ اعمالی در شکل ۶ نشان داده شده است. با مقایسه‌ی نتایج دو نمودار مشاهده می‌شود که نیروی پیشران تولیدشده بر اثر تخلیه‌ی کرونا با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد. بیشترین میزان خطا در حدود ۸/۹ درصد است، که احتمالاً به دلیل ساده‌سازی مسئله و شرایط حاکم بر آن در شبیه‌سازی با نرم‌افزار می‌باشد، همچنین، روند



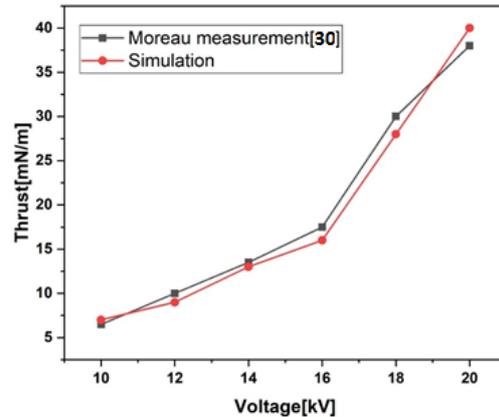


شکل ۷. مقایسه‌ی تغییرات جریان الکتریکی نسبت به ولتاژ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

### ۳-۲-۳- اعتبارسنجی ضریب تأثیر

برای بررسی پارامتر ضریب تأثیر (اثربخشی) از معادله (۹) استفاده می‌شود. تغییرات ضریب تأثیر برحسب مقادیر ولتاژ اعمالی در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برخلاف نیروی پیشران و جریان الکتریکی، با افزایش ولتاژ اعمالی، مقدار راندمان کم می‌شود. اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی، نیروی پیشران افزایش یافته، اما بازده یا ضریب اثربخشی، کاهش می‌یابد. بنابراین عملکرد بهینه‌ی تخلیه‌ی کرونا مستلزم پیدا کردن یک نقطه بهینه برای ولتاژ اعمالی است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی به خوبی ارتباط معکوس بین ولتاژ اعمالی و بازده را نشان می‌دهد. در حقیقت این رابطه معکوس به این معناست که رانشگر برای تولید نیروی پیشران بیشتر، نیازمند توان ورودی مصرفی بالاتر است. بیشترین مقدار خطا مابین نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده در این بررسی زیر ۱۰ درصد می‌باشد.

افزایشی نمودار نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در نمودار نشان‌دهنده درستی نتایج می‌باشد.

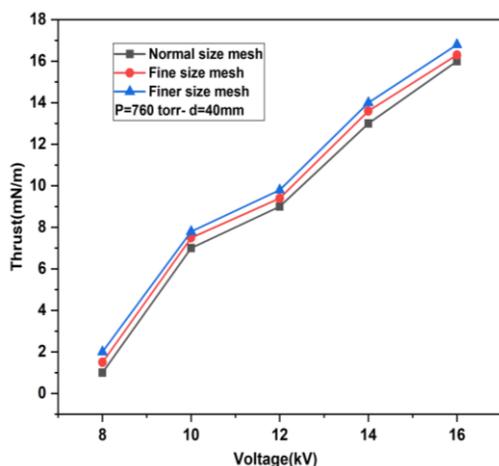


شکل ۶. مقایسه‌ی تغییرات نیروی پیشران نسبت به ولتاژ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

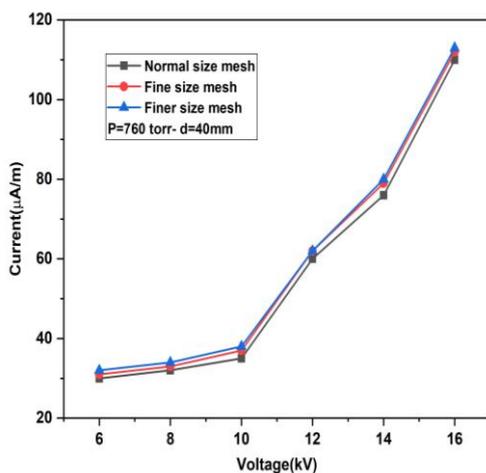
### ۳-۲-۲- اعتبارسنجی جریان الکتریکی

نمودار تغییرات جریان الکتریکی برحسب مقادیر ولتاژ اعمالی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی از نظر شیب نمودار به طور کامل برهم منطبق می‌باشند و با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد و هر دو نمودار، میزان اختلاف مابین نتایج بسیار کوچک می‌باشد. بیشترین میزان خطا و اختلاف مابین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی ۵/۴ درصد است. همچنین ملاحظه می‌شود که جریان الکتریکی نیز همچون نیروی پیشران به صورت سهمی برحسب ولتاژ تغییر می‌کند.

نمودارها، نتایج تغییر چندانی نمی‌کنند، که این امر نشان‌دهنده همگرا بودن شبیه‌سازی می‌باشد.



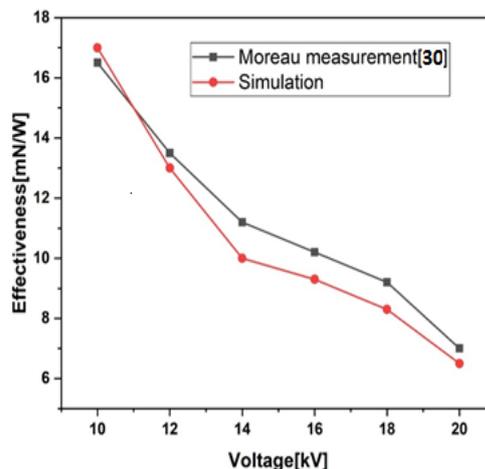
الف) نمودار همگرایی نیروی پیشران نسبت به ولتاژ برای شبکه بندی های متفاوت



ب) نمودار همگرایی جریان الکتریکی نسبت به ولتاژ برای شبکه بندی های مختلف  
شکل ۹. بررسی همگرایی شبیه سازی

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش، تأثیر پارامترهای فشار جریان هوا، رطوبت و سرعت جریان هوا بر تخلیه کرونا در پیکربندی سیم-استوانه که در بخش پیشین مورد اعتبارسنجی قرار گرفت، بررسی شده و نتایج حاصل از آن بیان شده است.



شکل ۸. مقایسه تغییرات ضریب تأثیر نیروی پیشران نسبت به ولتاژ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

#### ۳-۲-۴- بررسی استقلال از شبکه و همگرایی نتایج

در این بخش، به بررسی نتایج در تعداد شبکه‌بندی‌های مختلف پرداخته شده است. برای نمونه، نتیجه‌ی نیروی پیشران را در دو شبکه متفاوت از شبکه مسئله به دست آورده و در جدول زیر ارائه شده است. با توجه به تغییرات زیر ۶ درصد مقدار نیروی پیشران در تعداد المان متفاوت، مستقل بودن جواب‌ها از شبکه‌بندی صحیح می‌باشد.

جدول ۵. استقلال از شبکه پیکربندی سیم - استوانه

نیروی پیشران برحسب (mN/m)	تعداد المان
۱۳/۹	۴۳۰۰
۱۴/۲	۵۴۹۴
۱۴/۸	۶۷۰۶
۱۵/۱	۸۳۰۶

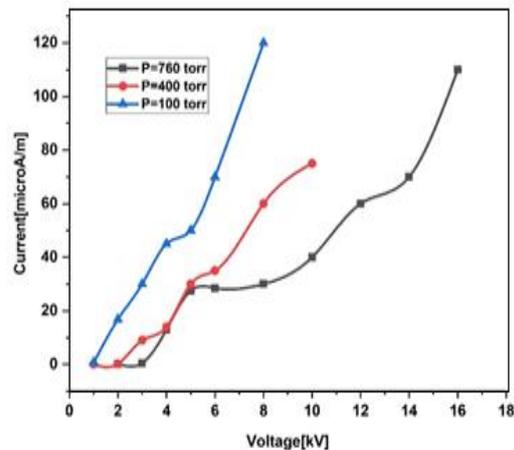
برای بررسی همگرایی سه شبکه‌بندی مختلف را برای دو نمودار نیروی پیشران نسبت به ولتاژ و نمودار جریان الکتریکی نسبت به ولتاژ مورد بررسی قرار داده شد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با تغییر در شبکه‌بندی این

#### ۴-۱- بررسی تأثیر فشار بر پارامترهای مختلف

عملکردی در پیکربندی سیم- استوانه

اثرات تغییر فشار جریان هوا بر پارامترهای مختلف عملکردی جریان الکتریکی، نیروی پیشران، سرعت، توان الکتریکی مصرفی مورد بررسی قرار گرفته شد. به این منظور فشارهای ۱۳/۳، ۵۳/۳ و ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال؛ معادل با ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۶۰ تور در نظر گرفته شده است. جریان هوا در این حالت به صورت ساکن در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱۰ تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ در فشارهای محیطی مختلف بر حسب واحد  $\text{toir}^{14}$  نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با کاهش فشار، ولتاژ شکست گاز کاهش می یابد و در ولتاژهای پایین، تخلیه کرونا تشکیل خواهد شد و به مرور، جریان الکتریکی نیز افزایش می یابد. همانگونه که می دانیم، میزان جریان الکتریکی با مربع ولتاژ متناسب است. از طرفی رابطه با ضریب تحریک یون ها دارد. بنابراین، با کاهش فشار، میزان تحریک یون ها افزایش یافته و در نتیجه، میزان جریان الکتریکی نیز افزایش می یابد.

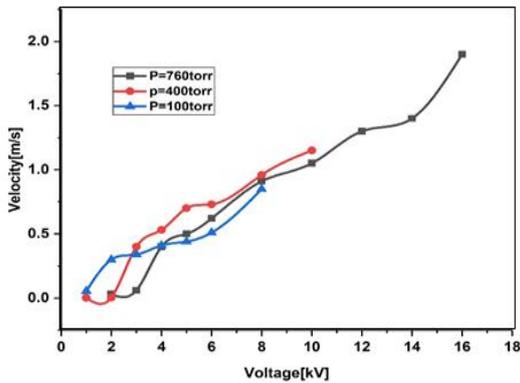


شکل ۱۰. نمودار تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ در فشار های مختلف

نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در فشارهای محیطی مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با کاهش فشار و به دلیل کم شدن تعداد ذرات موجود در محیط، برخوردها کاهش یافته و نمی توان به نیروی پیشران بالاتری دست یافت. بنابراین در ولتاژهای پایین تر از ۱۸ کیلوولت، به ازای اعمال ولتاژ یکسان با افزایش فشار، میزان جریان الکتریکی و نیروی پیشران بیشتری تولید می شود. اما هرچه قدر فشار کم شود، دیگر امکان رسیدن به ولتاژهای بالا با توجه به شکست الکتریکی سریع تر گاز وجود ندارد و نمی توان به نیروی پیشران بالاتری دست یافت. همان گونه که ذکر گردید، فشار گاز بر میزان تحریک یون ها تاثیر دارد. هرچه میزان فشار بیشتر شود، تحریک پذیری یون ها کاهش می یابد. همچنین، تحریک یون ها نسبت معکوس با مجذور سرعت باد یونی دارد. بنابراین، با افزایش میزان تحریک پذیری یون ها، میزان سرعت باد یونی کاهش یافته و در نتیجه میزان نیروی پیشران نیز کاهش می یابد. همچنین تا ولتاژ ۸ کیلوولت، میزان تولید نیروی پیشران در هر سه میزان فشار صفر است، اما با کاهش فشار در ولتاژهای بالاتر، نمی توان به نیروی پیشران بالاتری در فشارهای کمتر دست یافت. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که با وجود مصرف جریان الکتریکی در ولتاژهای زیر ۸ ولت، میزان تراست برابر صفر است. زیرا جریان الکتریکی هنوز صرف شکست گاز شده و تخلیه کرونا صورت نگرفته است.

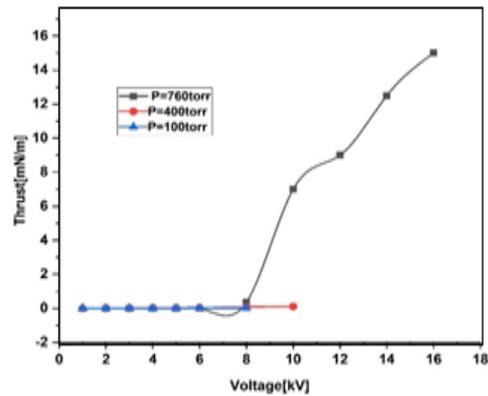


نمودار تغییرات سرعت بر حسب ولتاژ در فشارهای مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش میزان فشار، دریک ولتاژ یکسان، میزان سرعت جریان افزایش می‌یابد و دلیل آن ایجاد یونیزاسیون بیشتر و افزایش میزان چگالی ذرات می‌باشد. البته باید توجه داشت که سرعت متناسب با مجذور ضریب تحرک یونی می‌باشد. لذا با کاهش ضریب تحرک یون‌ها، سرعت افزایش می‌یابد. اما در ولتاژهای کمتر از ۵ کیلوولت، این روند، کمتر قابل مشاهده است و به نظر می‌رسد که هنوز پلاسما به مقدار زیاد تشکیل نشده است.



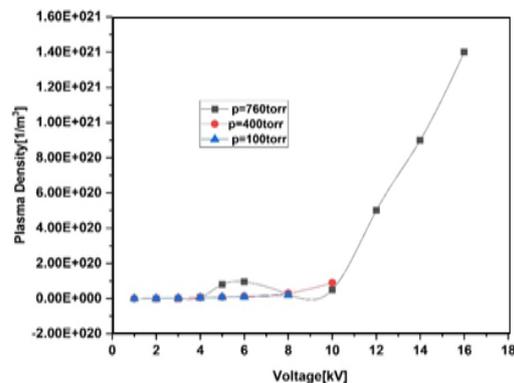
شکل ۱۳. نمودار تغییرات سرعت بر حسب ولتاژ در فشارهای مختلف

در شکل ۱۴، نمودار تغییرات ضریب تأثیر نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در فشارهای مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، میزان ضریب تأثیر در فشارهای مختلف در ولتاژ زیر ۸ کیلوولت، چندان تغییر خاصی نمی‌کند و تقریباً با هم برابرند و از ولتاژ بالای ۸ کیلوولت با افزایش فشار، ضریب اثر بخشی افزایش می‌یابد.



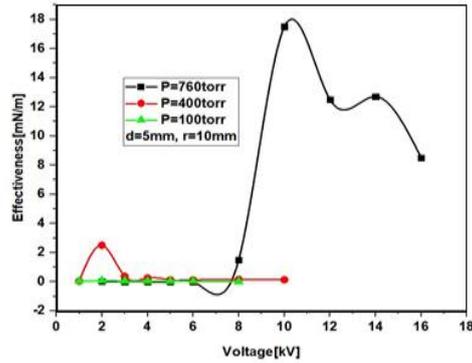
شکل ۱۱. نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در فشارهای مختلف

در شکل ۱۲، نمودار تغییرات چگالی ذرات باردار بر حسب ولتاژ در فشارهای محیطی مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در ولتاژهای کم، میزان چگالی ذرات باردار خیلی کم بوده و دلیل اصلی کاهش چگالی در ولتاژهای پایین، تعداد ذرات موجود در محیط است، هرچه قدر تعداد ذرات کمتر باشد برخورد های کمتری رخ می‌دهد و فرآیندهایی نظیر یونیزاسیون کمتر رخ می‌دهد و ما شاهد چگالی کمتری از ذرات باردار خواهیم بود و با افزایش ولتاژ، میزان چگالی ذرات باردار نیز افزایش می‌یابد. در ولتاژهای کم، میزان چگالی ذرات به حدی کم است، که گویی پلاسما صورت نگرفته و در نتیجه در ولتاژ زیر ۸ کیلوولت، نیروی پیشران نیز مشاهده نمی‌شود.



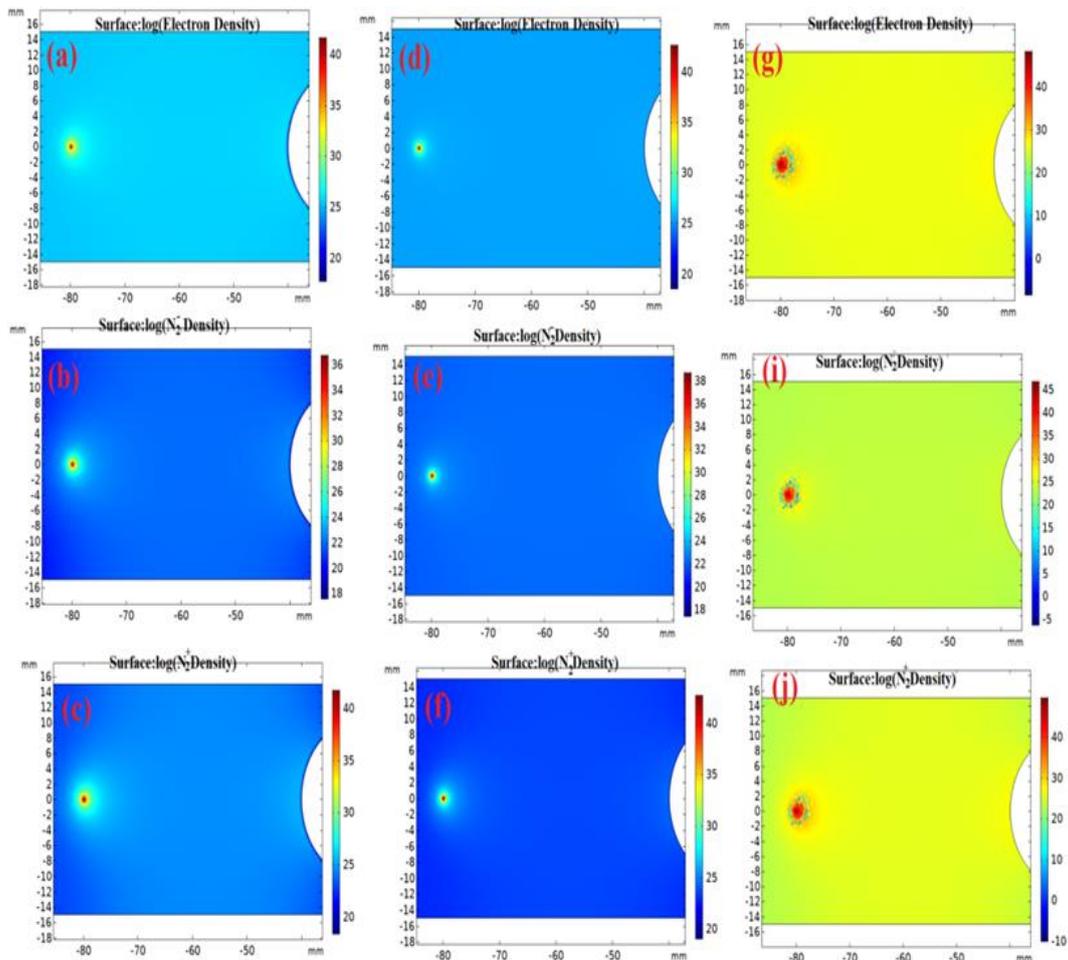
شکل ۱۲. نمودار تغییرات میانگین چگالی ذرات باردار بر حسب ولتاژ در فشارهای مختلف

چگالی همه ذرات در اطراف الکتروود سیم افزایش می‌یابد و این امر دلیلی بر کلیه نتایج قبلی مربوط به افزایش میزان تراست، جریان الکتریکی با افزایش فشار می‌باشد. لازم بذکر است که مقدار میدان الکتریکی در سطح آند به دلیل شعاع کمتر سیم و به وجود آمدن گرادیان میدان الکتریکی، بیشینه است و با حرکت به سمت کاتد، رفته رفته کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. بنابراین وجود میدان الکتریکی منجر به یونیزاسیون ذرات در اطراف سیم گشته و در نتیجه میزان چگالی ذرات یونیزه شده در اطراف سیم را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۴. نمودار تغییرات ضریب اثربخشی نیروی پیشران برحسب ولتاژ در فشارهای مختلف

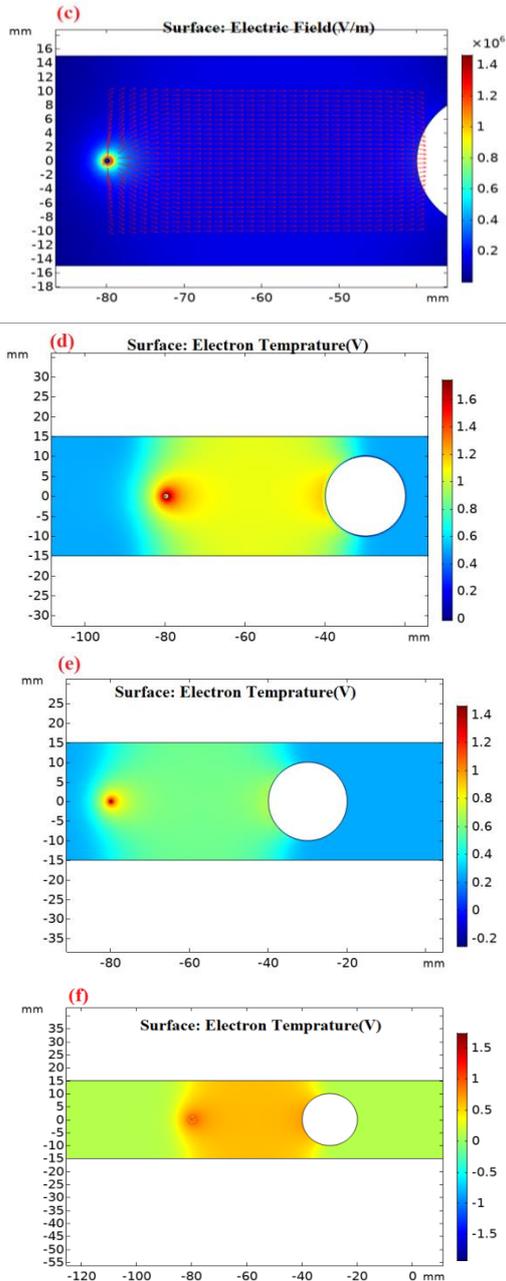
در شکل ۱۵، توزیع لگاریتمی چگالی ذرات الکترون و گونه‌های مختلف نیتروژن در فشارهای ۱۳/۳، ۵۳/۳ و ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال در ولتاژ ۸ کیلوولت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش میزان فشار، میزان



شکل ۱۵. توزیع لگاریتمی چگالی گونه‌های (a) الکترون (b)  $N_2^+$  (c)  $N_2^+$  در فشار ۱۳/۳ کیلو پاسکال (d) الکترون (e)  $N_2^-$  (f)  $N_2^-$  در فشار ۵۳/۳ کیلو پاسکال و (g) الکترون (h)  $N_2^+$  (i)  $N_2^-$  (j)  $N_2^-$  در فشار ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال در ولتاژ ۸ کیلوولت

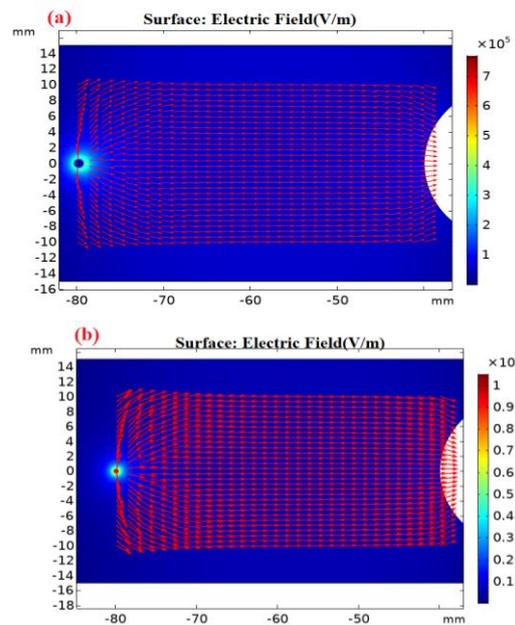


در شکل ۱۶، کانتور توزیع میدان الکتریکی و توزیع دمای الکترون در فشارهای مختلف ۱۳/۳، ۵۳/۳ کیلوپاسکال و در ولتاژ ۸ کیلووات نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، میزان میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، توزیع دمای الکترون در محدوده بین کاتد و آند افزایش یافته و میزان دمای الکترون در دماهای پایین بخصوص در اطراف الکترودها، از حدود نیم الکترون ولت به ۱/۴ الکترون ولت افزایش یافته است. همچنین شدت میدان الکتریکی نیز در محدوده سیم و استوانه نشان داده شده است. در این شکل، منظور دمای الکترونی است و دمای گاز زمینه در پلاسما سرد تقریباً ثابت است. اما دمای الکترونی در شرایط کاملاً یکسان با افزایش فشار کاهش می‌یابد، چون با افزایش فشار در اثر برخوردهای زیاد اتلاف بیشتر انرژی الکترون را شاهد هستیم. در واقع نسبت E/P در تعیین دمای الکترونی موثر است، به همین دلیل میزان دما در ۱۰۰ تور نسبت به ۷۶۰ تور افزایش یافته است.



شکل ۱۶. توزیع میدان الکتریکی: (a) در فشار ۱۳/۳ کیلو پاسکال (b) در فشار ۵۳/۳ کیلوپاسکال (c) در فشار ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال و توزیع دمای الکترون: (d) در فشار ۱۳/۳ کیلوپاسکال (e) در فشار ۵۳/۳ کیلوپاسکال (f) در فشار ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال در ولتاژ ۸ کیلوولت

۴-۲- بررسی تأثیر رطوبت و دما بر پارامترهای مختلف عملکردی در پیکربندی سیم-استوانه  
در این بخش، به بررسی تأثیر رطوبت و دما بر پارامترهای مختلف عملکردی جریان، نیروی



پیشران، توان مصرفی در تخلیه الکتریکی کرونا در پیکربندی سیم-استوانه پرداخته شده است. به این منظور دمای ۳۲۳ و ۲۹۳ درجه کلوین و میزان رطوبت ۹۵٪ و HR=۰.۲۰ در نظر گرفته شده است. در جدول ۶، درصد میزان اکسیژن، نیتروژن و درصد آب برای هر مقدار درصد رطوبت و دما بیان شده است.

جدول ۶. میزان درصد هر یک از عناصر و درصد آب

موجود در هوا

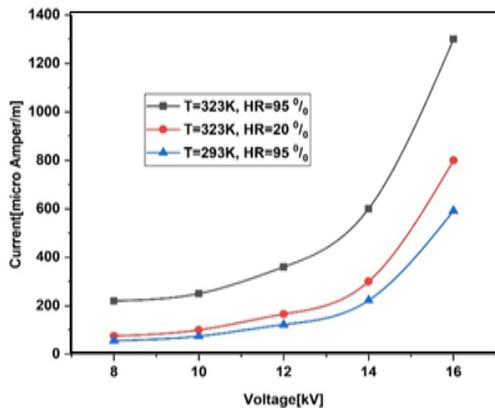
دما و رطوبت	درصد N <sub>2</sub> (%)	درصد O <sub>2</sub> (%)	درصد H <sub>2</sub> O(%)
T=300K,HR=20%	۷۷/۷	۲۱/۷	۰/۶
T=300K,HR=95%	۷۶/۳	۲۰/۷	۲/۶
T=320K,HR=20%	۷۷/۰۵	۲۱/۰۵	۱/۹
T=320K,HR=95%	۷۴/۵	۱۷/۵	۹

طبق رابطه ی (۱۳)، جریان الکتریکی با مربع ولتاژ متناسب است.

$$I = C \times V(V - V_0) \quad (11)$$

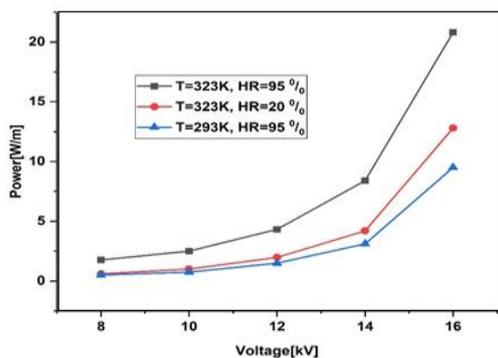
که I جریان کل تخلیه است و V<sub>0</sub> ولتاژ شروع و C یک مقدار ثابت است که به تحرک پذیری یونها μ، ابعاد و فاصله ی دو الکترود بستگی دارد. در شکل ۱۷، نمودار تغییرات جریان الکتریکی مصرفی بر حسب ولتاژ در درصد رطوبت ها و دماهای مختلف نشان داده شده است. همان طور که در نمودار قابل مشاهده است، با افزایش درصد رطوبت، میزان جریان الکتریکی مصرفی در یک ولتاژ ثابت نیز افزایش می یابد. همچنین با افزایش دما، نیز میزان جریان الکتریکی در یک ولتاژ ثابت افزایش می یابد. هرچقدر دما و رطوبت بیشتر شود، میزان جریان الکتریکی افزایش می یابد. دلیل این امر بنظر می رسد که مربوط به رابطه ۱۱ می باشد.

زیرا افزایش دما و رطوبت منجر به افزایش میزان ضریب تحرک یونی شده و در نتیجه منجر به افزایش جریان الکتریکی می شود. اما همان گونه که انتظار داریم، در همه موارد، با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی نیز افزایش می یابد.



شکل ۱۷. نمودار تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ در دما و رطوبت متفاوت

در شکل ۱۸، میزان تغییرات توان الکتریکی مصرفی بر حسب ولتاژ، نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می گردد، در یک ولتاژ ثابت، با افزایش میزان درصد رطوبت و دما، میزان توان الکتریکی نیز افزایش می یابد و همانطور که با توجه به نمودار جریان الکتریکی، انتظار می رود، با افزایش میزان ولتاژ در هر یک از نمودارها، میزان توان الکتریکی مصرفی به علت مصرف جریان الکتریکی بالاتر نیز افزایش می یابد.



شکل ۱۸. نمودار تغییرات توان الکتریکی مصرفی بر حسب ولتاژ در حالت های دما و رطوبت متفاوت

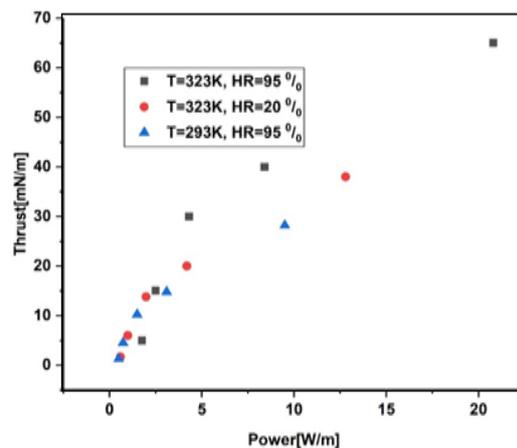


در شکل ۱۹، نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب توان مصرفی نشان داده شده است. بیشترین میزان نیروی پیشران بر توان مصرفی، مربوط به رطوبت ۹۵ درصد و دمای ۳۲۳ کلوین می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در یک توان مصرفی معین، با افزایش میزان دما و یا رطوبت، میزان نیروی پیشران نیز افزایش می‌یابد. طبق رابطه ۱۲، میزان تراست، رابطه معکوس با میزان ضریب تحرک یونی دارد.

$$F_{EHD} = \int_V f_{EHD} dV = \frac{j \times A_G \times d}{\mu} \quad (12)$$

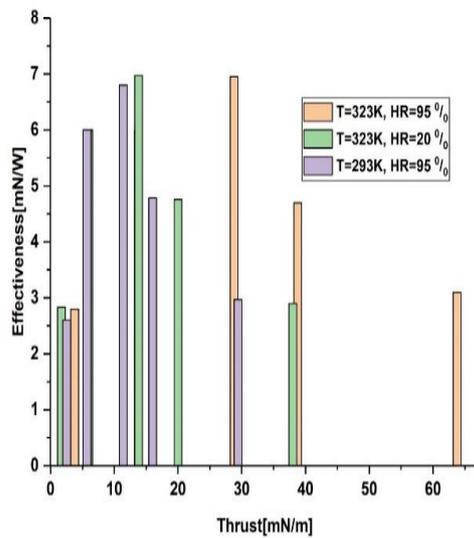
$$= \frac{I d}{\mu}$$

که در این رابطه  $A_G$  سطح مقطع تخلیه کرونا،  $d$  فاصله بین الکترودها،  $I$  میزان جریان الکتریکی  $\mu$  میزان تحریک پذیری می‌باشد. بنابراین با افزایش میزان تحرک یونی، میزان تراست کاهش می‌یابد و تحرک یونی نیز با افزایش دما و رطوبت افزایش می‌یابد. در نتیجه، با افزایش تحرک یونی، میزان تراست، کاهش می‌یابد اما از طرفی، میزان جریان الکتریکی نیز با تحرک یونی افزایش می‌یابد. اما در کل بنظر می‌رسد که افزایش ضریب تحرک یونی منجر به افزایش میزان تراست می‌شود.



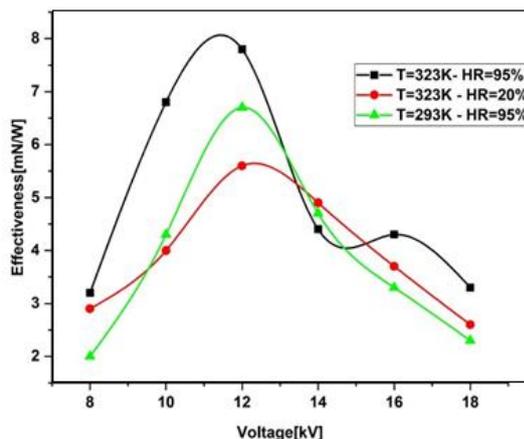
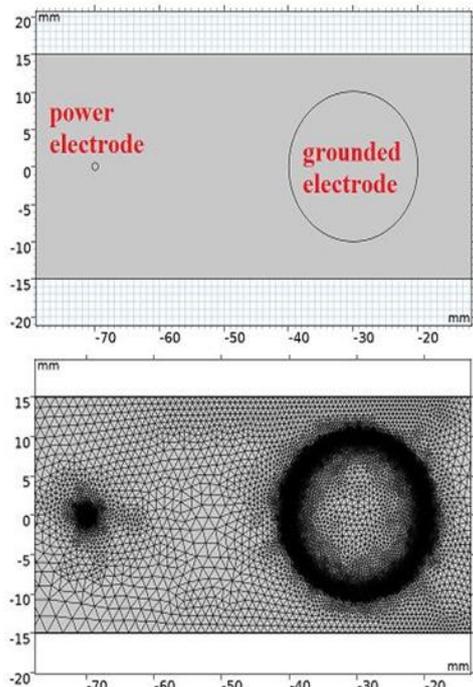
شکل ۱۹. نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب توان در حالت های دما و رطوبت متفاوت

در شکل ۲۰، نمودار ضریب تأثیر پذیری نیروی پیشران بر حسب نیروی پیشران، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در یک نیروی پیشران ثابت، با افزایش میزان دما و یا رطوبت، میزان ضریب تأثیر نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت اثر دما و رطوبت، با افزایش آنان، نیروی پیشران و جریان الکتریکی افزایش می‌یابد و این به دلیل کم شدن طول پویش آزاد<sup>۱۵</sup> میانگین بین ذرات و افزایش چگالی بخار آب است.



شکل ۲۰. نمودار میله‌ای تغییرات ضریب تأثیر بر حسب نیروی پیشران در دما و رطوبت متفاوت

نمودار ضریب تأثیر نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در شکل ۲۱ نشان داده شده است، همان گونه که مشاهده می‌شود، در همه موارد با افزایش ولتاژ، تا ۱۲ کیلو ولت، میزان ضریب تأثیر افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان درصد رطوبت و دما، میزان ضریب تأثیر نیز افزایش می‌یابد.

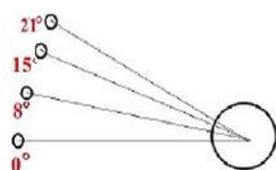


شکل ۲۱. نمودار تغییرات ضریب تأثیر نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در حالت های دما و رطوبت متفاوت

### ۳-۴- بررسی تأثیر قرار گرفتن الکترودها در زاویه های مختلف نسبت به یکدیگر در پیکربندی

#### سیم-استوانه و ایجاد باد جانبی

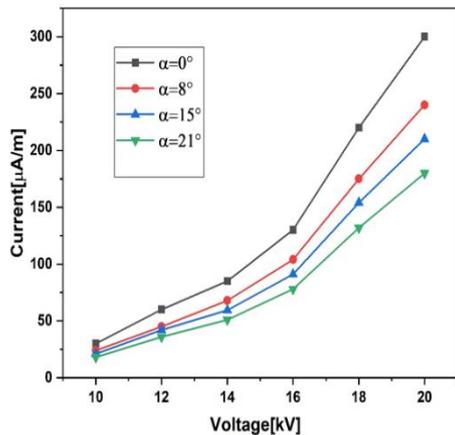
در این بخش به بررسی تأثیر قرار گرفتن الکترودها در زاویه های مختلف نسبت به یکدیگر بر تخلیه کرونا در پیکربندی سیم-استوانه پرداخته شده است. در شکل ۲۲، شماتیکی از موقعیت الکترودها در زاویه های مختلف نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، مرکز الکتروود سیم زمانی که در یک راستا با مرکز الکتروود استوانه قرار گیرد، زاویه صفر درجه ایجاد می کند. در حقیقت، تغییر زاویه بین دو الکتروود و وجود میدان الکتریکی و اختلاف پتانسیل بین الکترودها، منجر به ایجاد باد جانبی می شود. با جابه جایی الکتروود سیم در راستای عمودی زاویه های ۸، ۱۵ و ۲۱ درجه ایجاد شده است. سپس مقادیر مختلفی نظیر جریان الکتریکی، نیروی پیشران، ضریب تأثیر نیروی پیشران، سرعت باد یونی، دمای الکترونی و... برای تمامی حالات مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲۲. شماتیکی از موقعیت الکترودها در زاویه های مختلف نسبت به یکدیگر

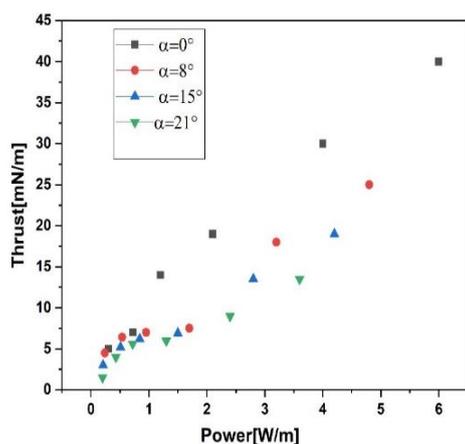
برای مقایسه تأثیر زاویه قرارگیری الکترودها نسبت به یکدیگر، تمامی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده و تنها موقعیت الکترودها نسبت به یکدیگر را تغییر داده شده است. در این حالت، دمای ۲۹۳/۱۵ درجه کلوین برای محیط اطراف در نظر گرفته شده است و ولتاژ مستقیم از ۱۰ تا ۲۰ کیلوولت را اعمال شده است.

در شکل ۲۳، نمودار تغییرات نیروی پیشران نسبت به ولتاژ اعمالی در زاویه های مختلف بین دو الکتروود نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در ولتاژهای پایین تر (۱۰ و ۱۲ کیلوولت) مقادیر نیروی پیشران به هم نزدیک هستند اما رفته رفته با افزایش ولتاژ، مقدار این نیرو در زاویه صفر درجه



شکل ۲۴. نمودار تغییرات جریان الکتریکی نسبت به ولتاژ در زاویه های مختلف بین دو الکتروود

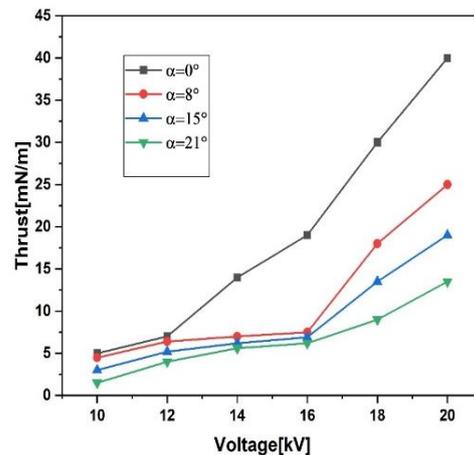
شکل ۲۵. نمودار تغییرات نیروی پیشران را به ترتیب نسبت توان الکتریکی مصرفی در زوایای مختلف بین دو الکتروود نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش میزان توان الکتریکی مصرفی، میزان نیروی پیشران نیز افزایش می یابد. همچنین، با افزایش میزان زاویه حمله، در میزان توان مصرفی ثابت، میزان نیروی پیشران تولیدی کاهش می یابد. همچنین می توان نتیجه گرفت، که با افزایش میزان باد جانبی، در توان مصرفی ثابت، میزان نیروی پیشران کاهش می یابد.



شکل ۲۵. نمودار تغییرات نیروی پیشران نسبت به توان الکتریکی مصرفی در زوایای مختلف بین دو الکتروودها

شکل ۲۶. تغییرات توان الکتریکی

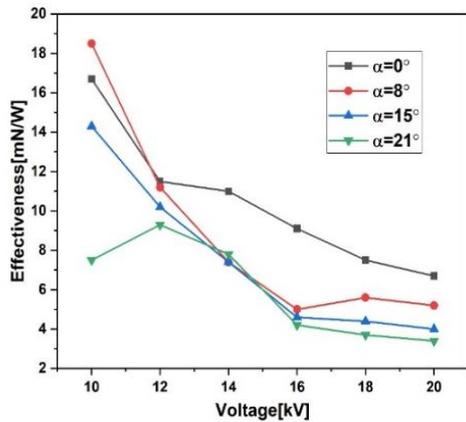
افزایش یافت و اختلاف زیادی با زوایای دیگر پیدا کرده است. این موضوع، به دلیل نحوه توزیع تجمع بار سطحی و چگالی پلاسما در اطراف الکتروود سیم خواهد بود. در ادامه بیشتر در این مورد توضیح داده می شود.



شکل ۲۳. نمودار تغییرات نیروی پیشران نسبت به ولتاژ اعمالی در زوایای مختلف بین دو الکتروود

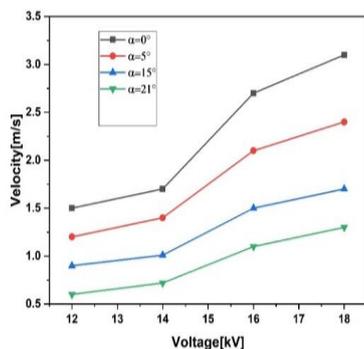
در شکل ۲۴، نمودار تغییرات جریان الکتریکی نسبت به ولتاژ در زاویه های مختلف بین دو الکتروود نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در ولتاژ ۱۰ کیلوولت، مقادیر جریان الکتریکی خیلی به هم نزدیک هستند و رفته رفته با افزایش ولتاژ، اختلاف بین زوایای مختلف افزایش می یابد. جریان الکتریکی در اینجا ناشی از ۱. جریان DC منبع خارجی. ۲. جریان AC ناشی از برخورد وابسته به زمان گونه های باردار از الکتروود سیم به استوانه است. به نظر می رسد در زاویه صفر درجه، بیشترین گونه های باردار از الکتروود سیم به استوانه برخورد می کنند، لذا جریان الکتریکی پالسی بیشتری ایجاد می شود.

نداشتن زاویه بین الکترودها، به طور معمول، راندمان بیشتری نسبت به حالت زاویه حمله تولید می‌شود.



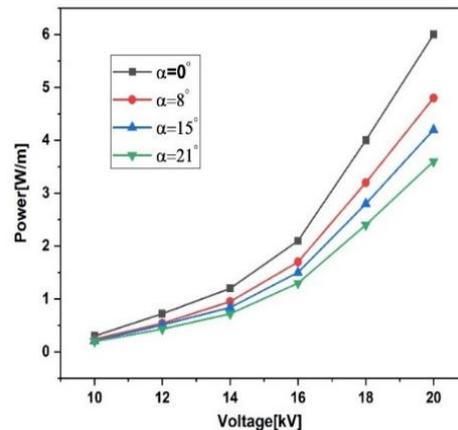
شکل ۲۷. نمودار تغییرات ضریب تأثیر نیروی پیشران نسبت به ولتاژ در زوایای مختلف بین دو الکترودها

شکل ۲۸، نمودار تغییرات سرعت باد الکتريکی ایجاد شده، نسبت به ولتاژ در زاویه‌های مختلف بین دو الکترودها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش زاویه بین دو الکترودها، سرعت باد ایجاد شده کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ولتاژ، مقدار سرعت باد الکتريکی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار سرعت در ولتاژ ۱۸ کیلوولت و زاویه حمله صفر درجه، حدود ۳ متر بر ثانیه نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد، که با افزایش زاویه حمله، میزان سرعت افقی بین الکترودها کاهش یافته و در حقیقت باد جانبی تولید می‌شود.



شکل ۲۸. نمودار تغییرات سرعت باد الکتريکی نسبت به ولتاژ در زوایای مختلف بین دو الکترودها

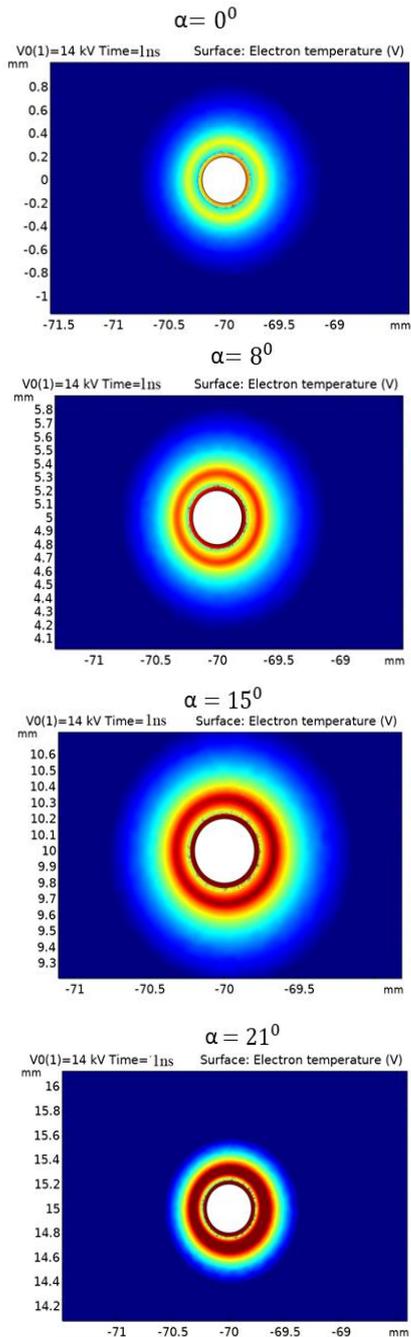
مصرفی را نسبت به ولتاژ در زوایای مختلف بین دو الکترودها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ولتاژ ۱۰ کیلوولت، مقادیر توان الکتريکی مصرفی، خیلی به هم نزدیک هستند و رفته‌رفته با افزایش ولتاژ اختلاف بین زوایای مختلف افزایش می‌یابد، همچنین مشاهده می‌گردد، با افزایش میزان زاویه حمله و در حقیقت افزایش باد جانبی، در یک ولتاژ ثابت، میزان توان الکتريکی مصرفی کاهش می‌یابد.



شکل ۲۶. نمودار تغییرات توان الکتريکی مصرفی نسبت به ولتاژ در زوایای مختلف بین دو الکترودها

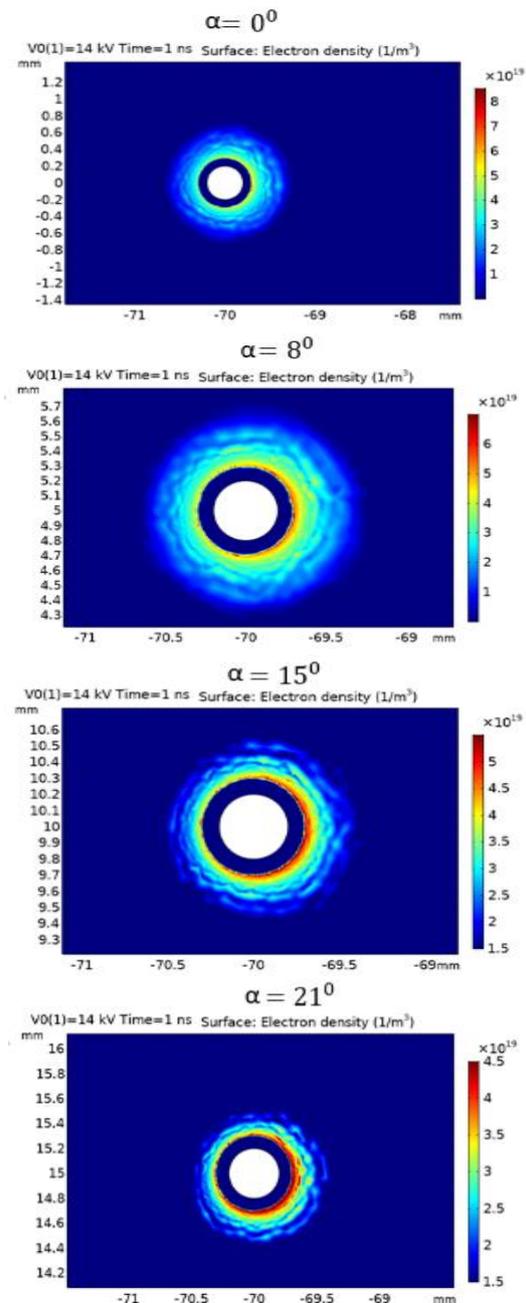
شکل ۲۷، نمودار تغییرات ضریب تأثیر نیروی پیشران نسبت به ولتاژ در زوایای مختلف بین دو الکترودها نشان می‌دهد. مطابق با این منحنی، بیشترین ضریب تأثیر در ولتاژ ۱۰ کیلوولت و در زاویه قرارگیری ۸ درجه بدست آمده است. اما به‌طور کلی، ضریب تأثیر در زاویه صفر درجه بین الکترودها بیشترین مقادیر ضریب تأثیر را در بین ولتاژهای مختلف دارد. کمترین ضریب تأثیر را هم در زاویه ۲۱ درجه و در ولتاژ ۲۰ کیلوولت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در صورت عدم تولید باد جانبی و در حقیقت،

در شکل ۳۰، منحنی توزیع دوبعدی دمای الکترونی در زوایای مختلف در اطراف الکتروود سیم نشان داده شده است. میزان ولتاژ، ۱۴ کیلوولت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین دمای الکترونی مربوط به زاویه صفر درجه می‌باشد و با افزایش زاویه، میزان دمای الکترون کاهش می‌یابد.



شکل ۳۰. منحنی توزیع دو بعدی دمای الکترونی در زوایای مختلف در اطراف الکتروود سیم

شکل ۲۹، نمودار تغییرات دو بعدی چگالی الکترون در اطراف الکتروود سیم نشان داده شده است. مطابق با این شکل هم توزیع چگالی و هم مقادیر آن در زاویه‌های مختلف بین الکتروود سیم و استوانه متفاوت خواهد بود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه، میزان توزیع چگالی الکترون در اطراف الکتروود سیم کاهش می‌یابد.



شکل ۲۹. نمودار تغییرات دو بعدی چگالی پلاسما در اطراف الکتروود سیم

## ۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، سعی شد که با انجام شبیه سازی دوبعدی برای پیکربندی سیم-استوانه با استفاده از نرم افزار کامسول، به بررسی تأثیر فشار، رطوبت، دما و تأثیر قرارگیری الکترودها در زاویه های مختلف نسبت به یکدیگر در تخلیه الکتریکی کرونا و در حقیقت بررسی باد جانبی بر میزان نیروی پیشران، توان مصرفی، ضریب اثربخشی پرداخته شده است. میزان ولتاژ از ۸ تا ۱۸ کیلوولت متغیر بوده و جریان هوا، ساکن فرض شده است که به طور خلاصه، نتایج زیر به دست آمد:

### - بررسی تأثیر فشار

به منظور بررسی تأثیر فشار محیط، فشارهای ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۶۰ تور در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این بررسی به شرح زیر است:

- با کاهش فشار، ولتاژ شکست گاز کاهش می یابد و در ولتاژهای پایین، کرونا تشکیل خواهد شد و جریان الکتریکی افزایش می یابد.
- کاهش فشار و کم شدن تعداد ذرات باردار موجود در محیط، برخوردها کاهش یافته و نمی توان به نیروی پیشران بالاتری دست یافت. بنابراین در ولتاژ یکسان با کاهش فشار، جریان الکتریکی و نیروی پیشران بیشتری وجود دارد.
- در ولتاژهای کم، میزان چگالی ذرات باردار خیلی کم بوده و فرآیندهایی نظیر یونیزاسیون کمتر رخ می دهد و ما شاهد چگالی کمتری از ذرات باردار خواهیم بود.
- با افزایش میزان فشار، دریک ولتاژ یکسان، میزان سرعت جریان افزایش می یابد و دلیل

آن ایجاد یونیزاسیون بیشتر و افزایش میزان چگالی ذرات می باشد.

- با افزایش فشار، میزان توان مصرفی با توجه به تولید نیروی پیشران بیشتر، افزایش می یابد. به همین دلیل، تقریباً ضریب تأثیر نیروی پیشران در همه فشارها، تقریباً در یک محدوده است.

### بررسی تأثیر دما و رطوبت

به منظور بررسی تأثیر دما و رطوبت، دمای ۳۲۳ و ۲۹۳ درجه کلوین و میزان رطوبت ۲۰ و ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این بررسی به شرح زیر است:

- با افزایش دما و رطوبت، میزان جریان الکتریکی مصرفی در یک ولتاژ ثابت افزایش می یابد.
- با افزایش ولتاژ، میزان تأثیرپذیری نیروی پیشران از دما و رطوبت بیشتر می شود. اما در یک ولتاژ ثابت، با افزایش میزان رطوبت و دما، میزان توان الکتریکی، جریان الکتریکی و نیروی پیشران افزایش می یابد.

### - بررسی تأثیر قرار گرفتن الکترودها در زاویه های مختلف نسبت به یکدیگر

به منظور بررسی تأثیر باد جانبی، جابه جایی الکترودها در راستای عمودی زاویه های ۸، ۱۵ و ۲۱ درجه ایجاد شده است. نتایج حاصل از این بررسی به شرح زیر است:

- مقادیر نیروی پیشران، جریان الکتریکی و توان الکتریکی در ولتاژهای پایین تر (۱۰ کیلوولت) به هم نزدیک هستند؛ اما رفته رفته با افزایش ولتاژ، مقدار این نیرو در زاویه صفر درجه افزایش یافت و اختلاف زیادی با زوایای دیگر پیدا کرده است.



- [10] N. E. Jewell-Larsen, S. V. Karpov, I. A. Krichtafovitch, V. Jayanty, C. Hsu, A. V. Mamishev, Modeling of Corona-Induced electrohydrodynamic Flow with COMSOL Multiphysics, Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics, Paper E1, 2008.
- [11] E. Moreau, N. Benard, J. D. Lan-Sun-Luk, J. P. Chabriat, Electrohydro dynamic force Produced by a Wire-to-Cylinder DC Corona Discharge in Air at Atmospheric Pressure, Journal of Physics D Applied Physics, Vol. 46, No. 47, pp. 1-14, 2013.
- [12] E. Moreau, N. Benard, F. Alicalapa, A. Douyère, Electrohydrodynamic Force Produced by a Corona Discharge between a Wire Active Electrode and Several Cylinder Electrodes. Application to Electric Propulsion, Journal of Electrostatics, Vol.76, pp.194-200, 2015.
- [13] W. Wang, L. Yang, K. Wu, C. Lin, P. Huo, S. Liu, D. Huang, M. Lin., Regulation-controlling of boundary layer by multi-wire-to-cylinder negative corona discharge, Applied Thermal Engineering, Vol. 119, pp.438-448, 2017.
- [14] B. Lu, Q. Feng, and H. Sun, The Effect of Environmental Temperature on Negative Corona Discharge Under the Action of Photoionization, IEEE transactions on plasma science, Vol. 47, NO. 1, 2019.
- [15] A. Fathi, M. Ahangar, Numerical simulation of electrohydrodynamic flow produced by wire-to-cylinder in atmospheric condition, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 02, pp. 323-330, 2018 (in Persian).
- [16] X. Yan, D. Sun, Corona Discharge behavior in Foggy Enviroments with Flat Plate and Fin Plate Electrodes, Journal of Chemical Engineering Science, Vol. 259, No. 117790, pp.1-12, 2022.
- [17] S. Zahmatkesh Pasand, S. K. Ghaemi Osgouie, S. Karimian Aliabadi, M. Moshfeghi, Numerical Study on the Effect of Weather Parameters on Corona Discharge Performance in a Horizontal Axis Wind Turbine, International Journal of Nonlinear Analysis Applied, Vol 14, No.12, pp. 187-196, 2023.
- [18] F. W. Peek, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, pp. 8-38, New York: McGraw-Hill Book Company, 1920
- [19] C. G. Petra, O. Schenk, M. Anitescu, Real-Time Stochastic Optimization of Complex Energy Systems on High-Performance

- به طور کلی، در زاویه صفر درجه بین الکترودها، ضریب تأثیر بیشترین مقادیر را در ولتاژهای مختلف دارد.
- با افزایش زاویه بین دو الکترودها، سرعت باد ایجاد شده کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار سرعت در ولتاژ ۱۸ کیلوولت و زاویه صفر درجه حدود ۳ متر بر ثانیه به دست آمده است.

## ۶- مآخذ

- [1] A.P. Chattock, W.E. Walker & E.H.IV, Dixon. On the specific velocities of ions in the discharge from points. Phil. Magazine, vol 1, pp.79-98, 1901.
- [2] F. Hauksbee, Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, First Edition, London: Brugis, pp. 46-47, 1709.
- [3] Paria Sattari, Dr. K. Adamiak, Dr. G.S.P. Castle, FEM-FCT Based Dynamic Simulation of Trichel Pulse Corona Discharge in Point-Plane Configuration, Graduate Program in Electrical and Computer Engineering, The University of Western Ontario, August 2011.
- [4] G.W. Trichel, The mechanism of the positive point-to-plane corona in air at atmospheric pressure, Physics Review, Vol. 55, Issue 4, pp.382-390, 1938.
- [5] D. J. Harney, An Aerodynamic Study of the Electric Wind, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 1957.
- [6] E.A. Christenson, P.S. Moller, Ion-Neutral Propulsion in Atmospheric Media, AIAA Journal, Vol. 5, No. 10, 2012.
- [7] J. L. Davis, J. F. Hoburg, Wire-Duct Precipitator Field and Charge Computation Using Finite Element and Characteristics Methods, Journal of Electrostatics, Vol. 14, No. 2, pp. 187-199, 1983.
- [8] L. Zhao, K. Adamiak, EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin-plate configuration, Journal of Electrostatics, vol.63, Issue.3-4, pp. 337-350, 2005.
- [9] M. Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg, and F. Carleton, Characterization of ionic wind velocity, Journal of Electrostatics, Vol.63, Issue 6-10, pp.711-716, 2005.



#### ۴. پی نوشت

- 1 . Electro Hydro Dynamics
- 2 . Trichel pulses
- 3 . Distribution
- 4 . Peek's Formula
- 5 . Kaptsov's Assumption
- 6 . Comsol Multiphysics
- 7 . Direct Solver
- 8 . PARDISO
- 9 . Highly Non-linear

۱۰ . مولکول ها و اتم هایی که پسوند S به حالت برانگیختگی اشاره دارند.

۱۱ . برای واکنش هایی که دو گونه واکنش دهنده داریم واحد سرعت  $m^3/s.mol$  و برای واکنش هایی که سه واکنش دهنده داریم واحد سرعت  $m^6/s.mol^2$  تعریف می شود.

- 12 . Surface Reaction
13. Secondary Emission
- ۱۴ . از یکاهای غیراس آی برای اندازه گیری فشار است. ۱ اتمسفر استاندارد برابر است  $760\text{torr}$ .
- 15 Free Sweep Length

۱۷۳

سال ۱۴ - شماره ۱

پهار و تابستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

دفتر و فناوری هوا فضا

