

بررسی عددی جریان سیال حول استوانه تحت تاثیر یک محرک الکتروهیدرودینامیکی میله – صفحه‌ای چسبیده به سطوح استوانه

اسماعیل اسماعیلزاده دانشیار دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
مهرداد آقازینالی کارشناس ارشد دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی عددی تاثیر یک محرک الکتروهیدرودینامیکی بر جریان حول استوانه با استفاده از روش اجزا محدود توسط نرم افزار انسیس پرداخته شده است. در این راستا، پس از انتخاب دامنه و شرایط مرزی مناسب، ابتدا میدان الکتریکی مربوط به مساله مورد تحلیل عددی قرار گرفته و سپس نتیجه حاصل از آن در قالب جمله نیروی جسمی الکتریکی در معادلات حاکم بر میدان سیال مورد استفاده قرار گرفته است. بدین ترتیب به بررسی تاثیر باد یونی حاصل از محرک الکتروهیدرودینامیکی بر روی میدان‌های سرعت، فشار و دنباله ایجاد شده در پشت استوانه و همچنین ضریب پسا روی استوانه پرداخته شده است. بر اساس تحقیق انجام گرفته، شاهد شتاب گرفتن جریان سیال در مجاورت دیواره در نیمه جلویی استوانه و افزایش اختلاف فشار در دو نیمه جلویی و عقبی استوانه که در نهایت منجر به افزایش نیروی پسا می‌شود، هستیم. طبق نتایج بدست آمده، باد یونی در هندسه حاضر الکترودها، موجب کاهش حجم ناحیه دنباله استوانه می‌شود.

کلمات کلیدی: جریان حول استوانه، الکتروهیدرودینامیک، باد یونی، منطقه پشت استوانه.

Numerical investigation of fluid flow around circular cylinder affected by an electro hydrodynamic (EHD) flush mounted wire- plate actuator

E. Esmailzadeh and M. Aghazainali

Department of Mechanical Engineering University of Tabriz

Abstract

In the present research, the effects of an electrohydrodynamic actuator on the flow around circular cylinder has been investigated numerically using the finite element method by Ansys software. For this purpose, after selecting proper domain and suitable boundary conditions, at first electric field has been analyzed numerically and then their results have been introduced to the governing equations of fluid field as electrical body forces. In this way, the influence of ionic wind resulted from the electrohydrodynamic actuator on the fluid velocity, fluid pressure, extended wake behind circular cylinder and also drag coefficient of the cylinder has been resolved. According to the results, the fluid flow near of wall of frontal surface was accelerated. For the actual arrangement of the electrodes, the pressure difference between the frontal and back of the cylinder was increased and caused the enhancement of drag force. But on the other hand, according to the results, this phenomenon causes the diminution of the wake region on the cylinder.

Key words: Flow around circular cylinder, Electrohydrodynamic, Ionic wind, Wake.

۱- مقدمه

باد یونی می‌تواند برای اصلاح جریان در اطراف یک جسم به کار رود که از آن به عنوان الکتروآیرودینامیک^(۳) نیز یاد می‌شود. کارهای انجام گرفته در این زمینه بسیار محدود می‌باشد. باد یونی به طور گسترده در حالت تخلیه کرونا بین یک سوزن و یک الکتروود صفحه‌ای در گاز آزاد بدون جریان، مورد مطالعه قرار گرفته است. یابی و همکاریانش [۳] مشاهده کردند که سرعت باد یونی در الکتروودهای از نوع صفحه‌ای و سوزن، متناسب با شدت جریان الکتریکی، افزایش می‌یابد. ولکف و همکاریانش [۴] به این نتیجه رسیدند که نقطه تبدیل جریان بر روی یک صفحه تخت، از رژیم لایه‌ای به آشفته می‌تواند با کاربرد یک میدان الکتریکی به جریان، متاثر شود. آنها در کار تحقیقی خودشان، جابجایی موقعیت انتقال به پایین دست جریان را مشاهده نمودند.

بوشنل و مالک به همراه همکاریانشان [۵] از باد یونی با سرعت چندین متر بر ثانیه که منجر به کاهش نیروی پسا روی سطح تخت شده بود، گزارش داده‌اند. فان رزندانل و مالک [۷] جریان ورقه‌ای در داخل مجرا و لایه مرزی ورقه‌ای را در سرعت‌های پایین (در حد سرعت باد الکتریکی) مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که توزیع اصطکاک پوستی، به طور قوی توسط حضور باد یونی متاثر می‌شود. آنها از طریق روش عددی، به کاهش مقدار نیروی پسا در حدود ۲۰٪ به ازای ولتاژ [KV] ۱۵ رسیدند. سوتومو [۶] به صورت آزمایشگاهی، کاهش نیروی پسا در اثر تخلیه کرونا^(۴) را در بخش کوچکی از یک صفحه تخت کوچک در حالت جریان‌های با سرعت بیش از ۲ (m/s) مشاهده نمود. تحت همان شرایط آزمایشگاهی کلور و الخبیری [۸] به صورت عددی کاهش مشابهی را در نیروی پسا بدست آوردند.

لژر و همکاریانش [۹]، کاهش قابل ملاحظه حجم ناحیه دنباله یک صفحه تخت را که به صورت مایل در برابر جریان هوا قرار گرفته بود را برای سرعت‌های پایین، ملاحظه نمودند. آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت از طریق تصویرنگاری سرعت ذرات^(۵) یا به اختصار پی.آی.وی، شتاب بالای جریان هوا را در پایین دست منطقه تخلیه الکتریکی نشان دادند. تحلیل خطوط

جریان در اطراف استوانه از موضوع‌های مهم در تحقیقات مکانیک سیالات است که از گذشته مورد توجه پژوهشگران قرار داشته است. جنبه‌هایی از این جریان همچون محاسبه نیروهای آیرودینامیکی و توزیع فشار، بررسی پدیده جدا شدن گردابه و مکانیزم‌های حاکم بر تشکیل دنباله و رشد آن در پایین دست جریان و غیره، امروزه نیز به عنوان مسائلی چالش برانگیز در این ارتباط مطرح هستند. با توجه به کاربردهای متعدد این نوع جریان در زمینه‌های مختلف مهندسی از قبیل جریان در اطراف کویل‌های مبدل‌های حرارتی، برج‌ها، پایه پل‌ها، کابل‌های خطوط انتقال برق فشار قوی، انتقال مواد نفتی از کف اقیانوس‌ها لزوم کنترل جریان در اطراف این نوع اجسام به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش توان مصرفی یا جلوگیری از نوسانات و در نتیجه کاهش بار وارد بر پایه‌های نگه دارنده آنها آشکار می‌شود. روش‌های کنترل مختلفی همچون استفاده از صفحه جداکننده^(۱)، ایجاد مکش و وزش در سطح استوانه، قرار دادن یک میله در بالا دست جریان و خشن کردن سطوح آن، در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱].

یکی از روشهای نوین کنترل جریان حول اجسام استفاده از محرک‌های الکتروهیدرودینامیکی^(۲) است. مزایای اصلی این محرکها عبارتند از:

- ۱- بدون هرگونه قطعه متحرکی در آن
- ۲- زمان پاسخ کوتاه آن می‌باشد (تاخیر در پاسخ از مرتبه نانو ثانیه می‌باشد)

در یک محرک الکتروهیدرودینامیکی واقع در داخل یک گاز همانند هوا، با برقراری یک اختلاف ولتاژ بالای الکتریکی بین دو الکتروود آن (معمولاً یک الکتروود سیمی یا سوزنی شکل و یک الکتروود صفحه‌ای) در اثر یونیزاسیون در مجاورت الکتروود با شعاع انحنای کمتر، یون‌های مثبت ایجاد می‌شوند که این یون‌ها در طی رانده شدن از الکتروود تزریق کننده یون (آند) به سمت الکتروود جمع کننده (کاتد) در اثر نیروهای الکتریکی (به ویژه نیروهای کولمبی) با ذرات خنثی سیال تبادل اندازه حرکت انجام می‌دهند و باعث به حرکت در آوردن سیال می‌شوند. این حرکت القا شده در سیال را به نام باد یونی می‌شناسیم [۲].

3- Electroaerodynamic

4- Corona Discharge

5- Particle Image Velocimetry (PIV)

1- Splitter Plate

2- Electrohydrodynamics Actuators

الکتریکی (از نوع کولمبی) می‌باشد و در نتیجه، معادله‌های پیوستگی و بقا اندازه حرکت سیال مطابق روابط زیر در می‌آیند:

$$0 = \vec{w} \cdot \nabla \quad (4)$$

$$\rho \frac{D(\vec{u})}{Dt} = \rho_e \vec{E} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (5)$$

به طوری که:

$$\rho \frac{D(\vec{u})}{Dt} = \rho \frac{\partial(\vec{u})}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla(\vec{u}) \quad (6)$$

با توجه به رابطه (۵) ملاحظه می‌شود که برای محاسبه جمله نیروی جسمی الکتریکی، نیاز به دانستن توزیع میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی در داخل محیط سیال وجود دارد. برای محاسبه این دو مورد، می‌توان از حل قانون پایستاری بار الکتریکی و همچنین قانون گوس در میدان های الکتریکی (از مجموعه معادلات ماکسول) سود جست.

قانون پایستاری بار الکتریکی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

که در این رابطه \vec{J} چگالی کل جریان الکتریکی می‌باشد و در یک جریان سیال می‌توان آن را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \rho_e \vec{u} + \rho_e \mu_e \vec{E} \quad (8)$$

جملات سمت راست رابطه (۸) به ترتیب نمایانگر مؤلفه‌های رسانشی، جابجایی و تحرک یونی می‌باشند که در آن، جمله مربوط به رسانش الکتریکی (جمله اول) عموماً در گازها بسیار کوچک می‌باشد و قابل صرف‌نظر کردن است. علاوه بر این، از جمله مربوط به جابجایی بار الکتریکی (جمله دوم) هنگامی که سرعت مشخصه جریان اصلی سیال u خیلی کمتر از سرعت تحرک بار الکتریکی ($\mu_e E$) باشد، می‌توان چشم‌پوشی کرد. در حالت کلی، این فرض خوبی در مایعات (که دارای تحرک یونی پایینی می‌باشند) نیست. هرچند در هوا و سایر گازها، تحرک بار الکتریکی بالا می‌باشد و نسبت $(\mu_e E) / u$ تقریباً همواره از

جریان سیال بیانگر آن بودند که تخلیه الکتریکی موجب الحاق مجدد جریان هوا به دیواره می‌شود.

در این پژوهش به بررسی تاثیر باد یونی ایجاد شده از یک محرک الکتروهیدرودینامیکی بر روی جریان حول استوانه از طریق مدل‌سازی عددی آن با استفاده از روش اجزا محدود می‌پردازیم. موضوع مورد بررسی در این کار در نوع خود، موضوع جدیدی است که تا به حال به دلیل پیچیدگی‌ها و ناشناخته بودن برخی از تاثیرات محرک‌های الکتروهیدرودینامیکی بر میدان‌های سیال و همچنین خود مساله جریان حول استوانه به صورت عددی مورد بررسی قرار نگرفته است. در کار حاضر، سعی ما بر این بوده است تا گام اول را در این رابطه برداریم. برای این منظور هندسه ثابتی از آرایش الکترودها را در نظر گرفته‌ایم.

۲- مبانی نظری مساله [۱۱ و ۱۲]

شکل تانسوری روابط حاکم بر جریان یک سیال همدم و بدون وجود انتقال حرارت، شامل معادلات پیوستگی و بقا اندازه حرکت سیال به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i + (f_e)_i \quad (2)$$

در رابطه مربوط به بقا اندازه حرکت سیال می‌توان تاثیر میدان الکتریکی بر روی جریان را در قالب جمله نیروی جسمی ملاحظه نمود که برای وضوح بیشتر آن را با جمله چهارم در سمت راست رابطه (۲) $(f_e)_i$ از سایر نیروهای جسمی (گرانشی، کریولیس، گریز از مرکز،...) متمایز کرده‌ایم. مقدار نیروی جسمی الکتریکی (بر واحد حجم) از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱ و ۱۲]:

$$\vec{f}_e = \rho_e \vec{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad (3)$$

این رابطه از طریق یک تحلیل ترمودینامیکی، با فرض آن که قطبی شدن سیال، تابعی خطی از میدان الکتریکی به کار رفته باشد و تنها به چگالی سیال بستگی داشته باشد، بدست آمده است [۹]. برای پدیده باد یونی در یک گاز تراکم ناپذیر، تنها مولفه نیروی جسمی وارد بر سیال نیروی کولمبی خواهد بود. در این صورت برای یک گاز تراکم ناپذیر لزج نیوتنی که در راستای افقی جریان دارد تنها نیروهای جسمی وارد بر آن، نیروی

$$E = -\nabla \phi \quad (14)$$

همچنین بر طبق روابط ماکسول رابطه بین چگالی شار الکتریکی و چگالی حجمی بار الکتریکی به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (15)$$

به طوری که:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (16)$$

با ترکیب روابط (15) و (16) در میدان‌های الکتریکی داریم:

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_e \quad (17)$$

با جایگزینی بردار شدت میدان الکتریکی در رابطه بالا برحسب گرادیان پتانسیل الکتریکی، خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) + \rho_e = 0 \quad (18)$$

با فرض ثابت بودن قابلیت گذردهی الکتریکی سیال (ε)، معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_e}{\epsilon} \quad (19)$$

که یک معادله پواسون می‌باشد.

۲-۱- تانسور تنش ماکسول

در مواجهه با مسائل الکتروهیدرودینامیک بعضاً توزیع بارهای الکتریکی می‌توانند کاملاً پیچیده باشند. از این رو تعیین نیروهای وارد بر ذرات باردار از طریق حل مجموعه معادلات بخش قبل، می‌تواند بسیار مشکل باشد. راه دیگری که برای محاسبه نیروهای وارد بر محیط سیال دی الکتریک وجود دارد، استفاده از تانسور تنش ماکسول می‌باشد. مزیت استفاده از این روش، آن است که تنها با دانستن توزیع میدان الکتریکی و بدون نیاز به تعیین توزیع بار الکتریکی می‌توان نیروی جسمی الکتریکی وارد بر جسم را محاسبه نمود. تانسور تنش ماکسول به صورت زیر معرفی می‌شود:

مرتبه ۰/۱ یا پایین تر است. بنابراین صرف‌نظر کردن از این جمله باعث مستقل شدن معادلات میدان الکتریکی از میدان سیال می‌شود و بدین ترتیب ساده‌سازی قابل توجهی در معادلات حاصل می‌شود. در نتیجه رابطه (۷) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \mu_e \vec{E}) = 0 \quad (9)$$

از طرفی هنگامی که ولتاژ اعمالی به الکترودها از نوع مستقیم باشد، در حالت پایا چگالی یون‌های تولیدی مستقل از زمان خواهند بود، یعنی:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

پس رابطه (۹) به شکل ساده‌تر زیر در می‌آید:

$$\nabla \cdot (\rho_e \mu_e \vec{E}) = 0 \quad (11)$$

رابطه بین شدت میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی بر اساس معادلات ماکسول به صورت زیر می‌باشد:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (12)$$

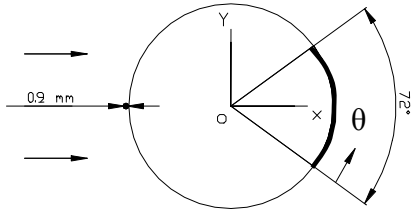
جریان الکتریکی که باعث القا میدان مغناطیسی (طبق قانون اورستد) می‌شود، در حالت کلی برای جریان‌های خیلی کوچک در تخلیه کرونا (از مرتبه میکروآمپر) بی‌اهمیت می‌باشد. بنابراین در غیاب میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی را می‌توان توسط قوانین الکتروستاتیک، بیان کرد. یعنی با توجه به رابطه (۱۲) خواهیم داشت:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (13)$$

و یا می‌توان میدان الکتریکی را به صورت گرادیان یک پتانسیل الکتریکی در نظر گرفت:

Cylinder Radius : 0.016 m

Cathode Thickness : 50 μm



شکل ۲- آرایش و ابعاد الکترودهای قرار گرفته بر روی سطح استوانه

ولتاژ اعمالی به هر یک از این الکترودها از نوع مستقیم می‌باشد که از نظر مقدار مساوی ولی از نظر علامت متفاوت می‌باشند به عبارت دیگر تحریک الکترودها به صورت دوقطبی است. هر دو الکترودها فعال می‌باشند یعنی به هر دو الکترودها از خارج، پتانسیل الکتریکی اعمال می‌شود. در کاربردهای عملی، استفاده از تخلیه کرونا دوقطبی به منظور محدود کردن برهمکنش تخلیه الکتریکی با اجسام محیط اطراف و جمع آوری بهتر بارها می‌باشد.

نکته مهمی که در اینجا باید به آن اشاره کرد، در زمینه محدودیت بالا بردن اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکترودها در الکترودهیرویدینامیک می‌باشد. این افزایش اختلاف پتانسیل تنها تا زمانی که محیط دی الکتریک دچار شکست الکتریکی نشود و جرقه ایجاد نگردد، مجاز می‌باشد [۱۱ و ۲۰].

پس از مشخص کردن دامنه جریان و نحوه قرارگیری الکترودها بر روی سطح استوانه، لازم است که دامنه مساله مورد بررسی شبکه‌بندی شود. برای این منظور از المان‌های مربعی شکل با درجه ریزی ۱ در نرم افزار ANSYS استفاده می‌کنیم. به دلیل قرار گرفتن الکترودها بر روی سطح استوانه، انجام شبکه‌بندی سازمان یافته و منظم بر روی سطح استوانه تقریباً غیر ممکن می‌باشد از این رو از شبکه‌بندی غیر سازمان یافته استفاده می‌شود. شبکه‌بندی به صورت خودکار توسط خود نرم افزار به گونه‌ای که تمرکز المانها و گره‌ها در نواحی حساس جریان شامل اطراف استوانه و الکترودها بیشتر باشد صورت می‌گیرد. در شکلهای ۳ و ۴ نحوه شبکه‌بندی بر روی دامنه و اطراف استوانه نشان داده شده است.

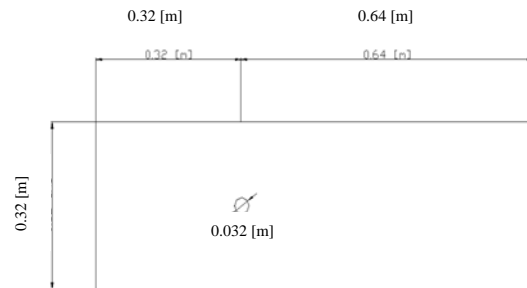
به علت استقرار افقی استوانه در میدان جریان و نیز برای کاربردهای احتمالی غیرمتقارن استقرار الکترودها شبکه‌بندی دای تمامی منطقه تاثیر در نظر گرفته است.

$$\tau_{ij} = \varepsilon E_i E_j - \frac{\varepsilon}{2} \delta_{ij} E_k E_k \left[1 - \frac{\rho}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad (20)$$

رابطه بالا می‌تواند برای یافتن نیروها بر حسب میدانهای الکتریکی در سطح یک حجم محصور کننده سیستم به کار رود.

۳- مدل محاسباتی مساله

به منظور مدل کردن تاثیر محرک الکترودهیرویدینامیکی مورد نظر بر روی جریان حول استوانه در حالت دوبعدی و پایا در نرم افزار ANSYS ویرایش ۶،۱ (که بر پایه روش اجزا محدود می‌باشد)، دامنه جریان به صورت بدون بعد مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج مطالعات تجربی انتخاب ابعاد محاسباتی بخصوص در منطقه پائین دست استوانه در اعداد رینولدز مورد نظر در کار حاضر برای مطمئن شدن از اتمام منطقه wake کافی است [۱۴].



شکل ۱- دامنه ابعادی انتخاب شده برای مساله

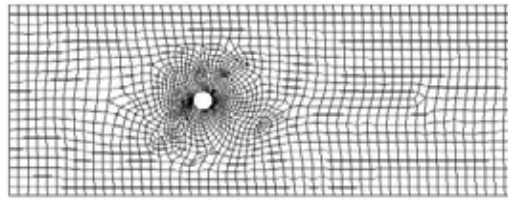
۱۷ آرایش و ابعاد الکترودها بر روی سطح استوانه مطابق شکل ۲ می‌باشند. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در این آرایش، الکترودهای سیمی که آند (قطب مثبت) می‌باشد در موقعیت نقطه سکون جلوی استوانه قرار می‌گیرد و الکترودهای کاتد (قطب منفی) است در نیمه عقبی استوانه در موقعیت زاویه‌ای نشان داده شده (زاویه ۷۲°) قرار می‌گیرد. سطح استوانه نیز عایق الکتریکی می‌باشد.

فرآیند الکترودهیرویدینامیک هنگامی بیشترین بازدهی را خواهد داشت که تخلیه الکتریکی و بنابراین باد یونی بسیار نزدیک به دیواره جسم روی دهد. در این وضعیت میدان سرعت در نزدیکی دیواره، تا حد زیادی قابل تصحیح می‌باشد. علاوه بر این ضروری است که الکترودها به گونه ای قرار داده شوند که جریان سیال تا حد امکان نسبت به حالتی که تخلیه الکتریکی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، کمتر آشفته گردد.

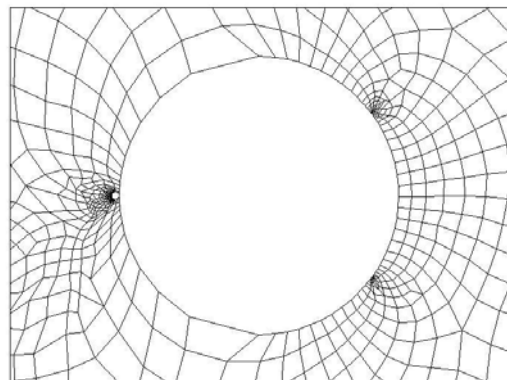
اعمال شرایط مرزی مناسب برای میدان سیال، به بررسی نحوه تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیکی بر روی میدان سیال خواهیم پرداخت.

۴-۱- شرایط مرزی میدان الکتریکی

با توجه به آن که دیواره های تونل باد (مرزهای بالایی و پایینی دامنه) و سطح استوانه عایق می باشند، مؤلفه عمودی میدان الکتریکی و شار بار الکتریکی ورودی به آنها صفر می باشند. همچنین مقادیر ولتاژهای اعمالی به الکترودها در اختیار کاربر می باشند و بنابراین مقداری معلوم در نظر گرفته می شوند. با فرض موضعی بودن تخلیه الکتریکی، چگالی بار الکتریکی در ورودی و خروجی دامنه صفر اختیار می شود. برای تعیین شرط مرز چگالی بار الکتریکی، ابتدا باید با حدس یک مقدار اولیه برای چگالی بار الکتریکی بر روی الکترودهای (کاتد) محاسبه کنیم و سپس با یک فرآیند سعی و خطا، چگالی بار الکتریکی بر روی الکترودهای سیمی به گونه ای تعیین می شود که شدت جریان الکتریکی ورودی به کاتد موافق نتایج تجربی موجود یا در حد میکروآمپر باشد [۲]. بدین ترتیب چگالی بار الکتریکی بر روی آند به عنوان یک شرط مرزی به این صورت تعیین می شود. شرایط مرزی میدان الکتریکی در دامنه و بر روی استوانه و الکترودهای مستقر بر روی آن در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده اند.



شکل ۳- شبکه بندی دامنه مساله



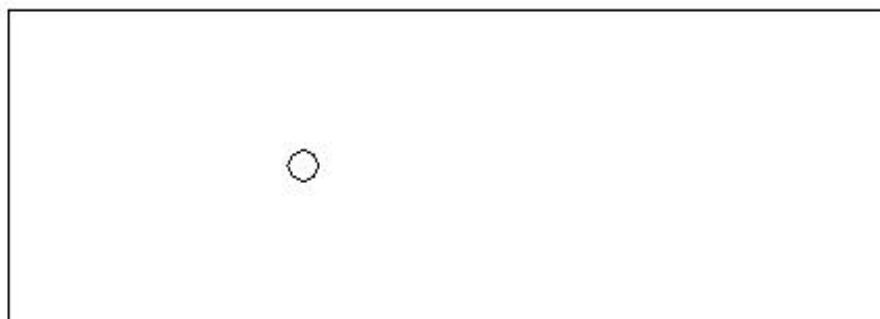
شکل ۴- نمای نزدیک از شبکه بندی در اطراف استوانه

۴-۲ شرایط مرزی مربوط به مساله

برای بررسی مساله، ابتدا بخش تحلیل الکتریکی را با اعمال شرایط مرزی مناسب انجام می دهیم و سپس با انتقال نیروهای کولمبی محاسبه شده از این تحلیل در گره ها، به تحلیل سیالاتی (به عنوان نیروی جسمی در معادلات حاکم بر سیال) و

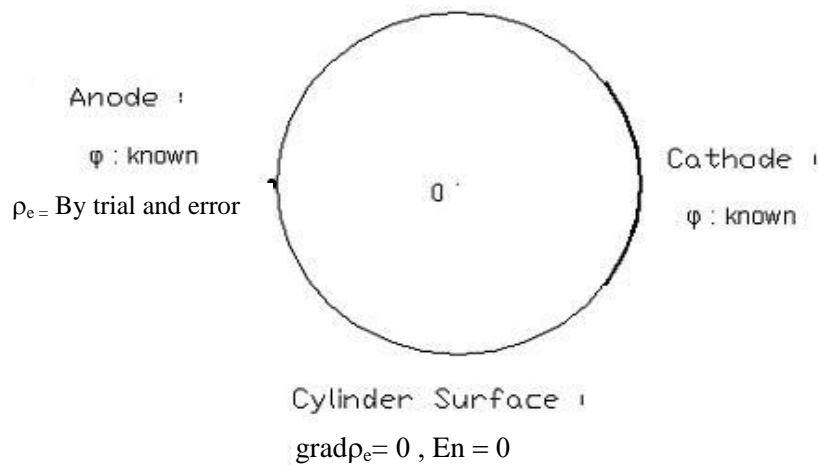
Upper Limit : $\text{grad } \rho_e = 0, E_n = 0$

Inlet :
 $\rho_e = 0$



Lower Limit : $\text{grad } \rho_e = 0, E_n = 0$

شکل ۵ - شرایط مرزی میدان الکتریکی بر روی دامنه مساله



شکل ۶- شرایط مرزی میدان الکتریکی بر روی سطح استوانه و الکترودها

۵- ارائه نتایج

پس از انجام مدل‌سازی کامپیوتری جریان حول یک استوانه تحت تاثیر محرک الکتروهیدرودینامیکی (که روش کار در بخشهای گذشته بیان شد)، در بخش حاضر نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی، ارائه می‌شوند. در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی مساله، سرعت ورودی سیال به دامنه جریان، مقادیر $U = 0.5$ (m/s), 0.6 (m/s), 0.7 (m/s) را اختیار می‌کنیم. خواص جریان هوا نیز در شرایط استاندارد: فشار 1 atm و دمای 20°C تعیین می‌شوند. اعداد رینولدز متناظر با سرعت‌های ورودی به دامنه عبارتند از: 1506 , 1291 , 1076 . $Re =$ طول مشخصه در تعیین عدد رینولدز، قطر استوانه می‌باشد. تغییر اختلاف ولتاژ بین الکترودهای نصب شده بر روی استوانه از 0 تا 20 [kV] با گام 1 [kV] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در دو بخش کلی نتایج تحلیل الکتریکی و تحلیل سیالاتی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۵-۱- نتایج تحلیل الکتریکی

با اعمال اختلاف ولتاژ بین الکترودهای مثبت (آند) و منفی (کاتد)، میدان الکتریکی از الکترود سیمی (آند) به سمت الکترود صفحه‌ای (کاتد) برقرار می‌شود. شدت میدان الکتریکی بر روی نواحی برجسته و نوک تیز یعنی الکترود سیمی و گوشه‌های الکترود صفحه‌ای، همان طور که در شکل‌های ۸ تا ۱۲ ملاحظه

در تحلیل الکتریکی، مقدار اختلاف ولتاژ بین الکترودها از 0 تا 20 [kV] با گام 1 [kV] تغییر داده می‌شود. سیال دی‌الکتریک عامل در این مساله، هوا می‌باشد که دارای ضریب گذردهی الکتریکی نسبی تقریباً یک می‌باشد. می‌توان اختلاف ولتاژ را تا زمانی که شکست الکتریکی در سیال ایجاد شود ادامه داد.

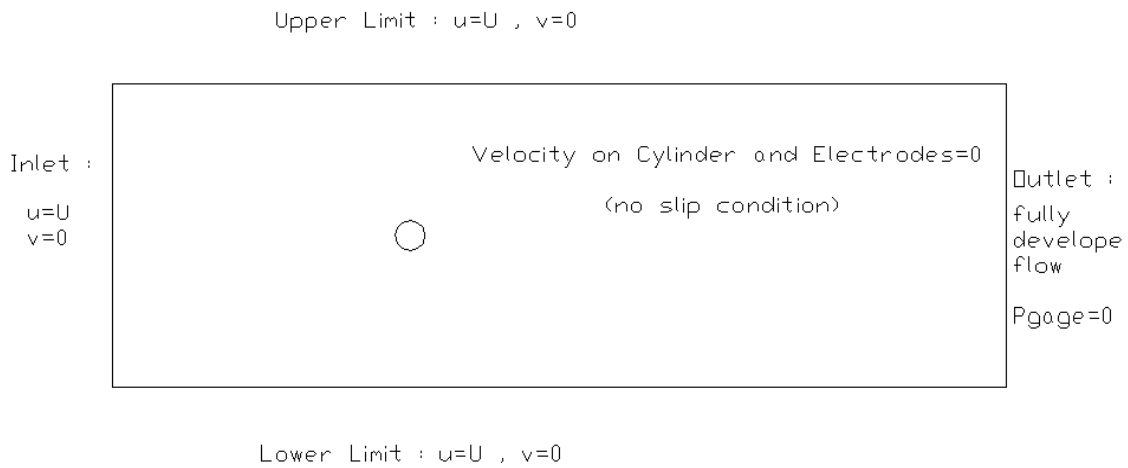
۴-۲- شرایط مرزی میدان سیال

به دلیل شرط عدم لغزش، سرعت جریان سیال بر روی دیواره استوانه و الکترودها صفر می‌باشد. همچنین با توجه به آن که دامنه جریان در داخل تونل باد در نظر گرفته شده است و جهت جریان هوای ورودی نیز موازی با دیواره‌های تونل باد است، مؤلفه‌های عمودی سرعت در ورودی و همچنین مرزهای بالایی و پایینی دامنه صفر می‌باشند و مؤلفه افقی سرعت در مرزهای بالایی و پایینی برابر سرعت ورودی تونل باد است. فشار در خروجی دامنه برابر فشار جو می‌باشد که در نتیجه فشار نسبی آن صفر خواهد بود. در مرز خروجی با توجه به طول اختیار شده برای پایین دست دامنه شبیه‌سازی عددی (یعنی 20 برابر قطر استوانه) شرط توسعه‌یافتگی میدان سرعت سیال را به صورت زیر داریم:

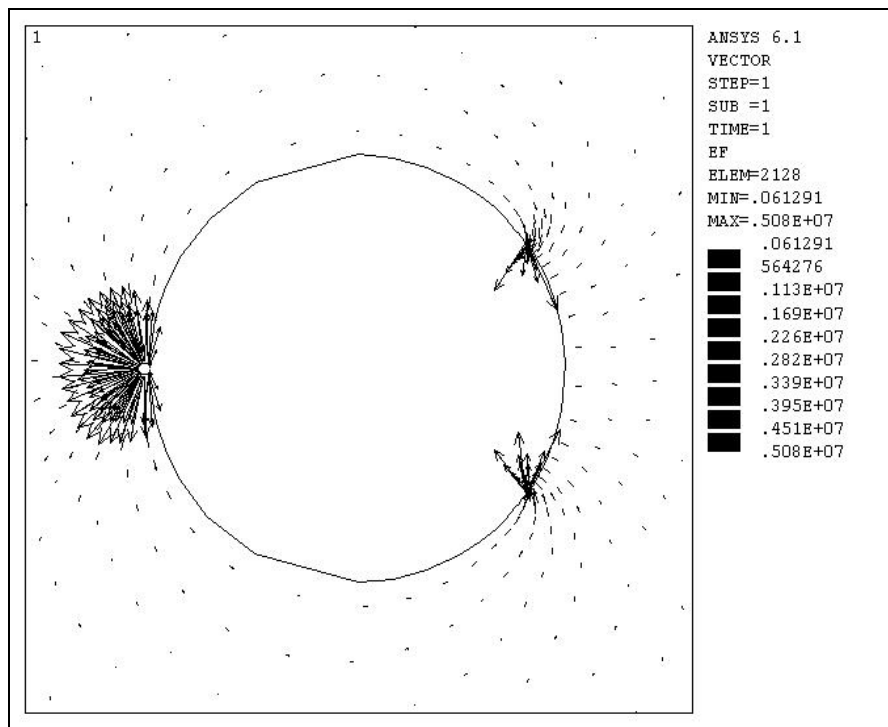
$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

شرایط مرزی میدان سیال در شکل ۷ نشان داده شده است.

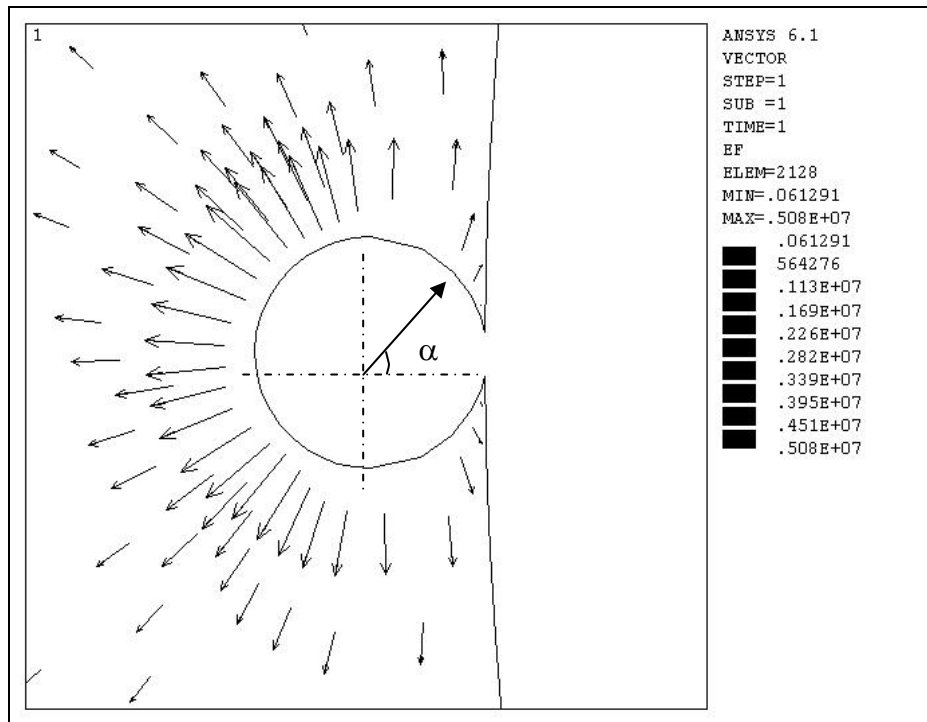
می‌شود، بیشینه است. با افزایش اختلاف ولتاژ بین الکترودها، شدت میدان الکتریکی نیز بر روی الکترودها افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، θ موقعیت زاویه‌ای کاند با توجه به شکل ۲ می‌باشد.



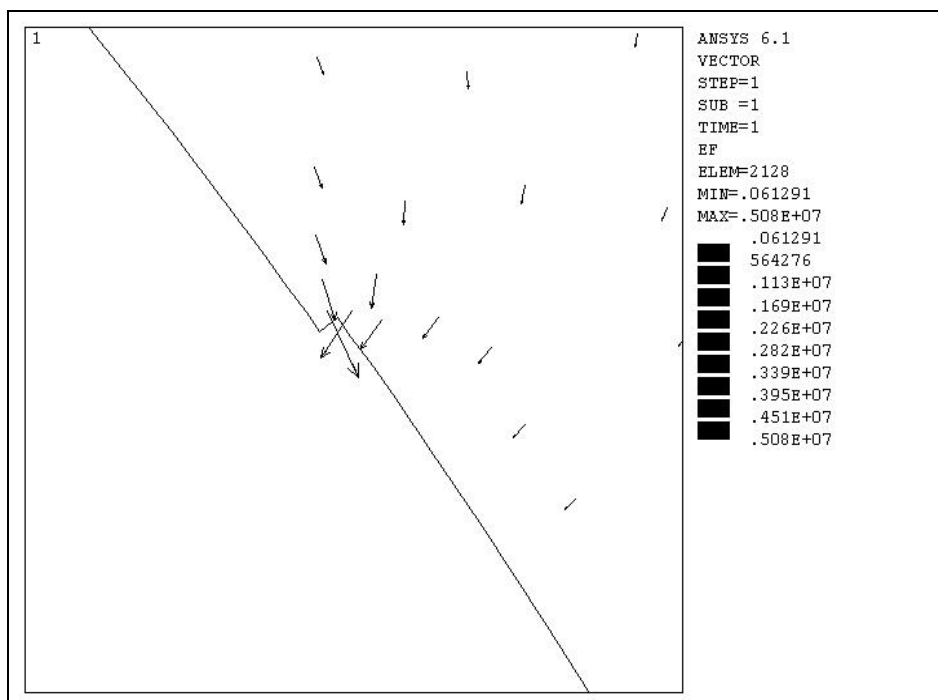
شکل ۷- شرایط مرزی میدان سیال مربوط به مساله



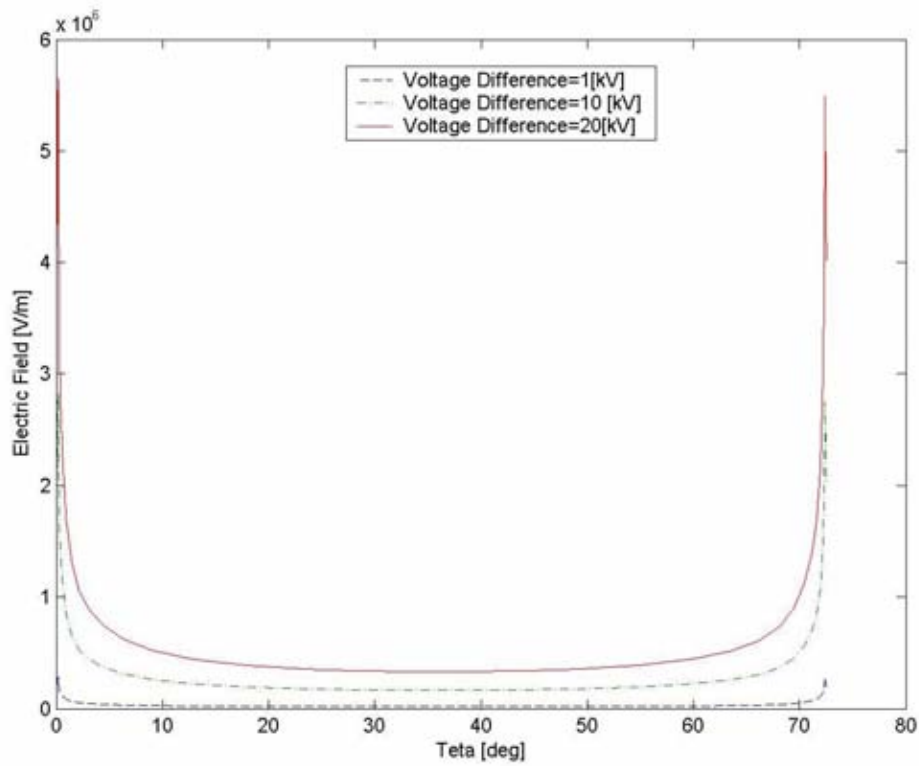
شکل ۸- بردارهای شدت میدان الکتریکی بر روی استوانه به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد



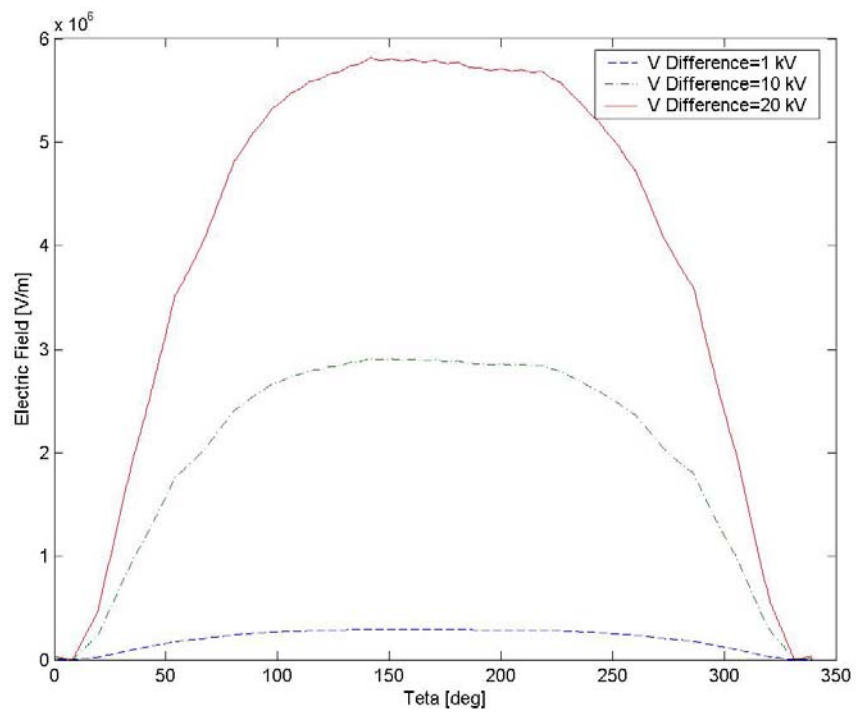
شکل ۹- نمای نزدیک از بردارهای شدت میدان الکتریکی در مجاورت آند به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد



شکل ۱۰- نمای نزدیک از بردارهای شدت میدان الکتریکی در مجاورت کاتد به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد



شکل ۱۱ - نمودار توزیع شدت میدان الکتریکی بر روی کاتد به ازای اختلاف ولتاژهای مختلف بین آند و کاتد



شکل ۱۲ - نمودار توزیع شدت میدان الکتریکی بر روی آند به ازای اختلاف ولتاژهای مختلف بین آند و کاتد

جریان در حدود زاویه 100° از نقطه سکون جلو اتفاق می‌افتد. این به دلیل آن است که با افزایش عدد رینولدز به هزار، لایه مرزی بر روی استوانه آرام باقی می‌ماند در حالی که دنباله پشت استوانه متلاطم می‌شود. از این رو باید مدل‌های توربولانس به صورت موضعی تنها برای بخشی از جریان که محدوده آن دقیقاً مشخص نیست حل شوند و این باعث پیچیدگی مساله برای روش‌های عددی می‌شود که هنوز به عنوان یک مساله معضلی باقی مانده است [۱۳].

با توجه به نتایج بدست آمده برای این حالت و اطمینان از نتایج حاصل از نرم افزارهای مختلف محاسبات را برای حالت‌های استقرار الکترودها در کار حاضر ادامه می‌دهیم.

۵-۲-۲- تاثیر باد یونی بر میدان سرعت در اطراف استوانه

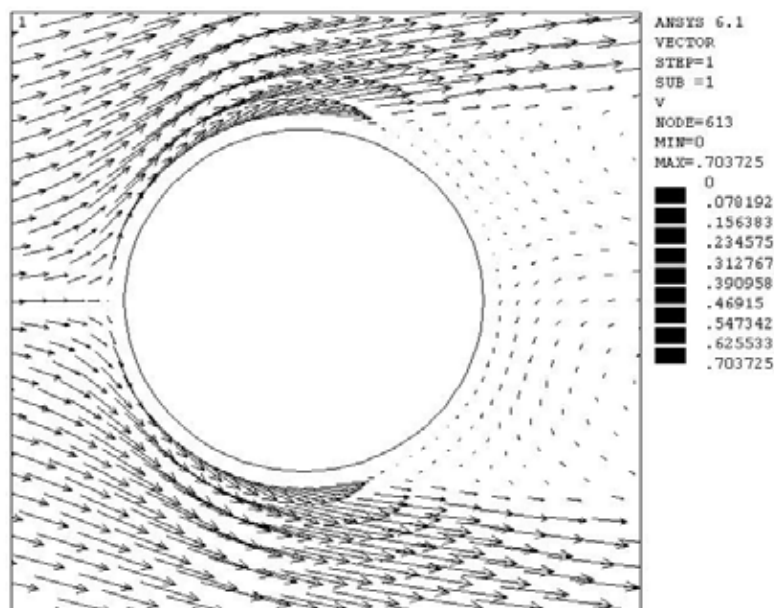
با اعمال اختلاف ولتاژ بین الکترودها و برقراری میدان الکتریکی در فضای اطراف استوانه، باد یونی از الکترودها سیمی به سمت الکترودهای صفحه‌ای (کاتد) برقرار می‌شود. باد یونی حاصل، متناسب با شدت میدان الکتریکی است و از این رو انتظار شتاب یافتن جریان به سمت گوشه‌های نوک تیز کاتد (که مطابق بخش تحلیل الکتریکی دارای شدت میدان الکتریکی بالایی می‌باشند) را داریم.

۵-۲-۱- نتایج تحلیل سیالاتی

پس از بررسی نتایج مربوط به تحلیل الکتریکی مساله، در این بخش به تحلیل نتایج مربوط به میدان سیال می‌پردازیم. در ابتدا جریان خالص سیال (بدون قرار گرفتن الکترودها بر روی آن) در اطراف استوانه مورد بحث قرار می‌گیرد و سپس به بررسی تاثیر باد یونی ناشی از محرک الکتروهدرودینامیکی بر روی میدانهای سرعت، فشار و همچنین دنباله ایجاد شده در پشت استوانه و ضریب پسا می‌پردازیم.

۵-۲-۱- بررسی جریان خالص سیال در اطراف استوانه

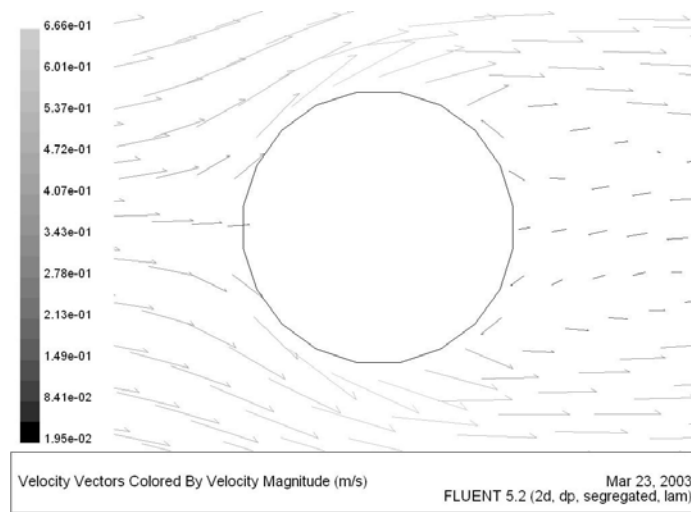
در این پژوهش با توجه به محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی، رژیم جریان از نوع مادون بحرانی می‌باشد. در این رژیم بر اساس نتایج تجربی انتظار جدایش جریان در زاویه 80° از نقطه سکون جلوی استوانه را داریم، اما نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی توسط کدهای تجاری همچون انسیس و فلونت و فونیکس تحت شرایط مرزی یکسان، در محدوده اعداد رینولدز نزدیک به هزار مطابقت خوبی با نتایج تجربی ندارند. شکلهای ۱۳ و ۱۴ میدان سرعت در اطراف استوانه در $Re=1076$ ، به ترتیب، حاصل از نرم افزارهای انسیس و فلونت ملاحظه می‌شوند. در این شکل‌ها می‌توان دید که جدایش



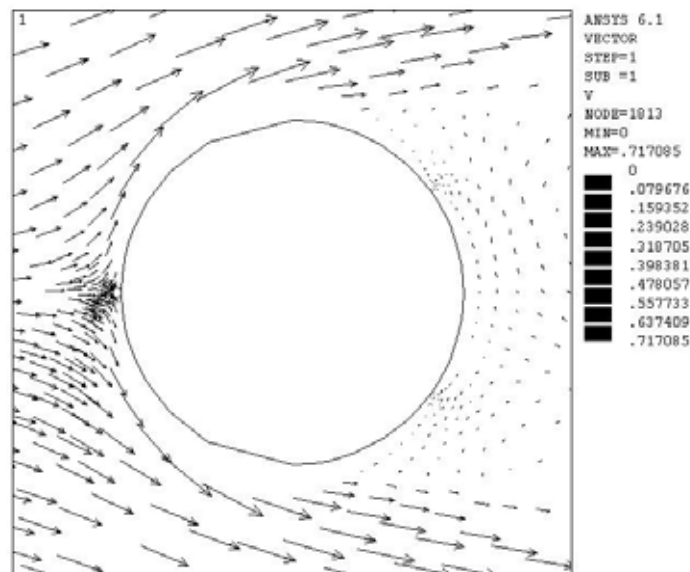
شکل ۱۳- بردارهای سرعت در اطراف استوانه در $Re=1076$ حاصل از نرم افزار انسیس

۱۵ مشاهده می‌شود، با استقرار الکتروود سیمی در لبه حمله و الکتروود صفحه‌ای در منطقه فرار استوانه میدان جریان قدری متفاوتتر از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ بدست می‌آید. بدیهی است وجود سیم با مقطع استوانه‌ای و نیز صفحه الکتروود با لبه‌های تیز بیرون آمده از سطح استوانه در میدان مطالعه با حضور خود تاثیر گذار خواهند بود. بنابراین مبنای مقایسه را همین شکل ۱۹ قرار خواهیم داد

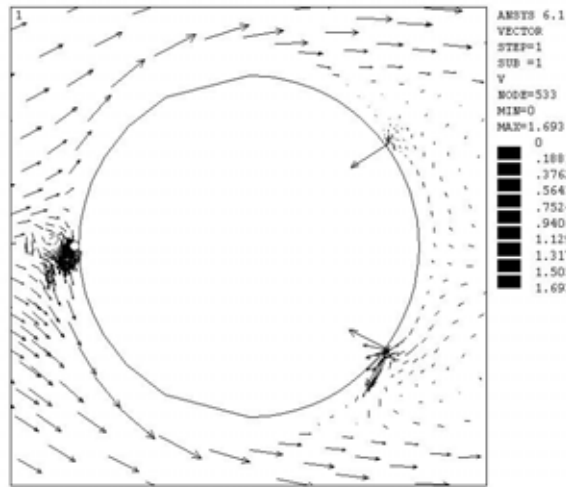
با افزایش اختلاف ولتاژ بین الکتروودها و در نتیجه افزایش شدت میدان الکتریکی، شتاب جریان سیال به سمت این نواحی افزایش می‌یابد که این موضوع را می‌توان با مراجعه به شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ ملاحظه کرد. همچنین با برقراری باد یونی و افزایش اختلاف ولتاژ و برخورد یون‌ها به مولکول‌های خنثی و کم سرعت سیال در مجاورت دیواره، اندازه حرکت آنها افزایش می‌یابد و در جهت جریان شتاب می‌گیرند. تاثیر باد یونی بر جریان سیال در نیمه جلویی استوانه و در موقعیت زاویه ای 60° در داخل لایه مرزی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل



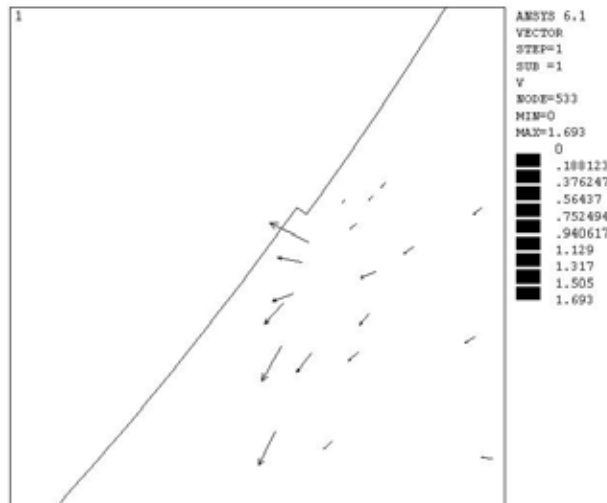
شکل ۱۴- بردارهای سرعت در اطراف استوانه در $Re=1076$ حاصل از نرم افزار فلونت



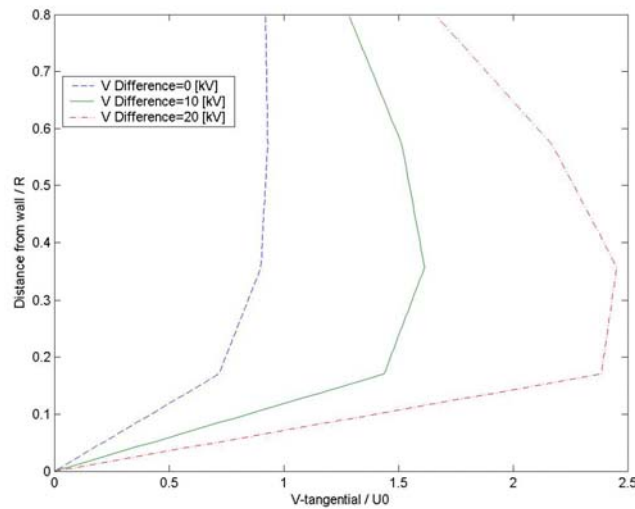
شکل ۱۵- بردارهای سرعت در اطراف استوانه پس از قرار دادن الکتروودها بر روی آن بدون اعمال ولتاژ ($Re=1076$)



شکل ۱۶- نمای نزدیک از بردارهای سرعت در اطراف استوانه به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد ($Re=1076$)



شکل ۱۷- بردارهای سرعت در گوشه کاتد به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد ($Re=1076$)

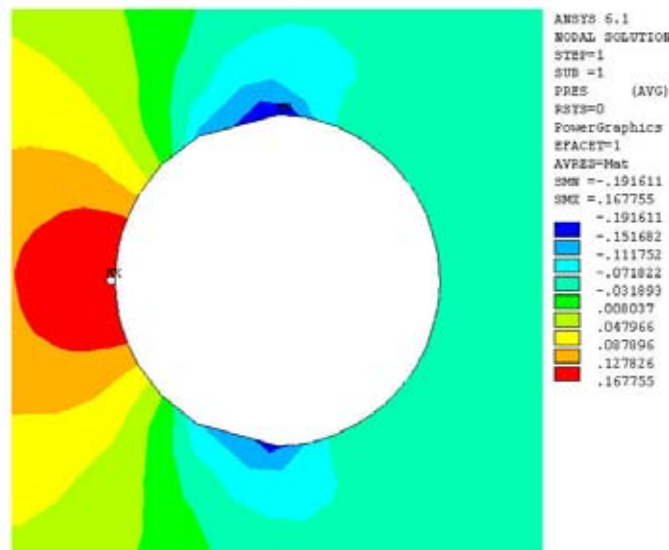


شکل ۱۸- تاثیر باد یونی به ازای اختلاف ولتاژهای مختلف بر پروفیل سرعت مماسی سیال در داخل لایه مرزی در موقعیت زاویه ای ۶۰ درجه از نقطه سکون جلو ($Re=1076$)

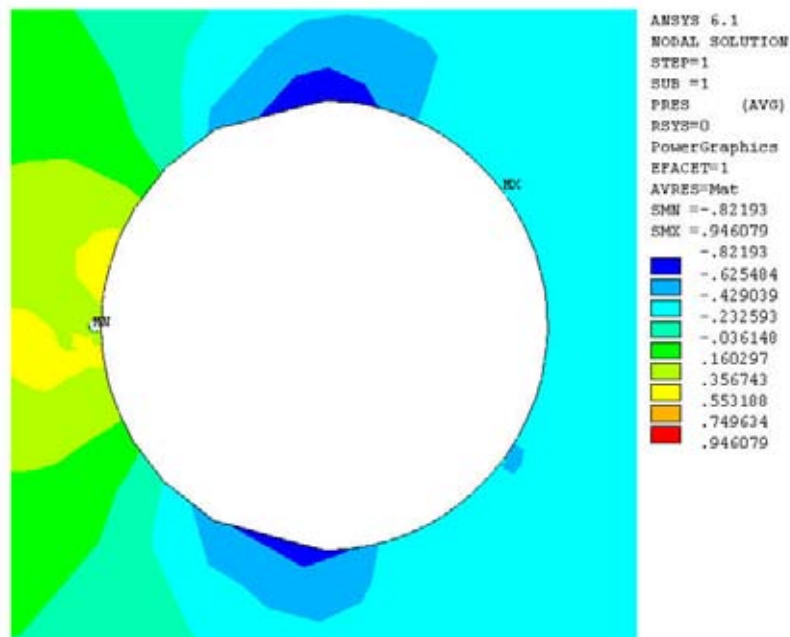
۵-۲-۳- تاثیر باد یونی بر روی میدان فشار در اطراف استوانه

در اثر برقراری باد یونی بین الکترودها و افزایش اختلاف ولتاژ بین آنها، فشار بیشینه دیگر در نقطه سکون جلوی استوانه روی نمی‌دهد بلکه این نقطه به سمت گوشه‌های نوک تیز کاتد منتقل می‌شود. علت این موضوع آن است که در اثر برقراری میدان الکتریکی، همان طور که در بخش مربوط به میدان سرعت

ملاحظه شد، جریان سیال به سمت کاتد و به ویژه گوشه‌های آن شتاب می‌گیرد و به دلیل عدم لغزش سیال بر روی دیواره، بر روی این نواحی به حالت سکون می‌رسد و تمامی انرژی جنبشی آن تقریباً به انرژی فشاری تبدیل می‌شود. این مطلب را می‌توان در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ مشاهده کرد.



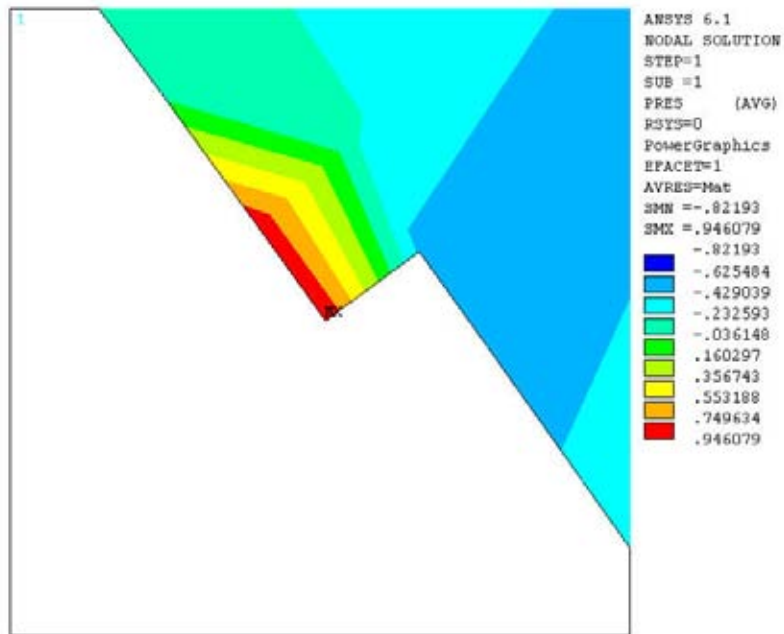
شکل ۱۹- توزیع فشار بر روی سطح استوانه با قرار دادن الکترودها بر روی سطح و بدون اعمال اختلاف ولتاژ به آنها (Re=۱۰۷۶)



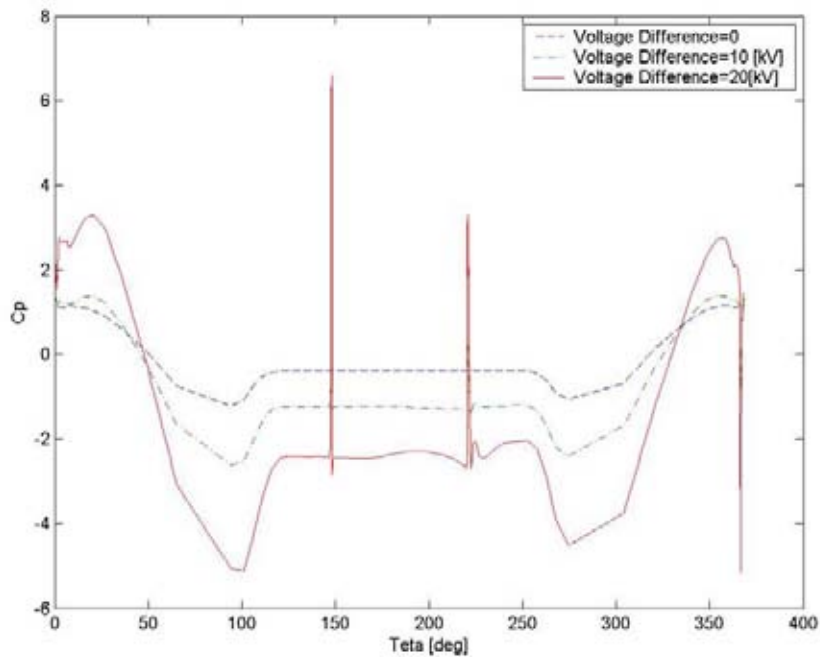
شکل ۲۰- توزیع فشار بر روی استوانه به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد.

این نمودار باعث افزایش اختلاف فشار بین نیمه جلویی و عقبی استوانه می‌شود.

همچنین با توجه به نمودار توزیع فشار بر روی استوانه در شکل ۲۲ مؤلفه‌های گوشه‌های کاتد با افزایش ناگهانی ضریب فشار که در آنها روی داده است، مشخص می‌شوند. باد یونی با توجه به



شکل ۲۱- نمای نزدیک از توزیع فشار در گوشه کاتد به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد

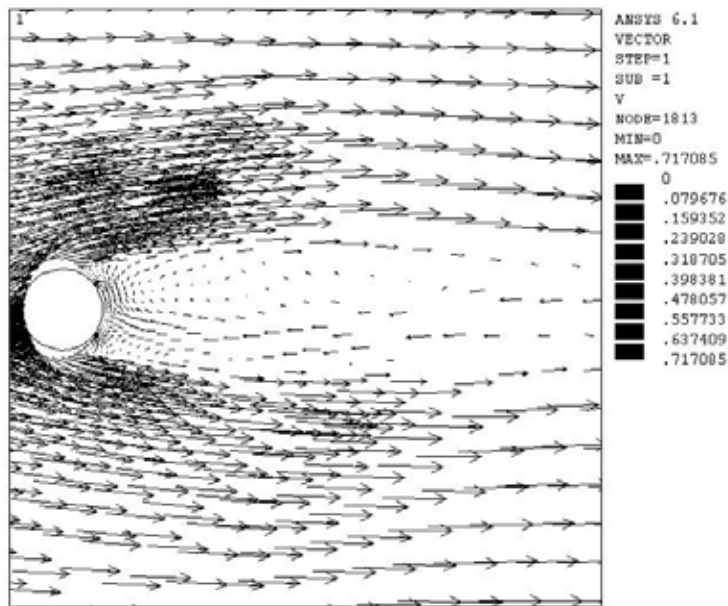


شکل ۲۲- نمودار توزیع ضریب فشار بر روی استوانه به ازای اختلاف ولتاژهای مختلف بین آند و کاتد

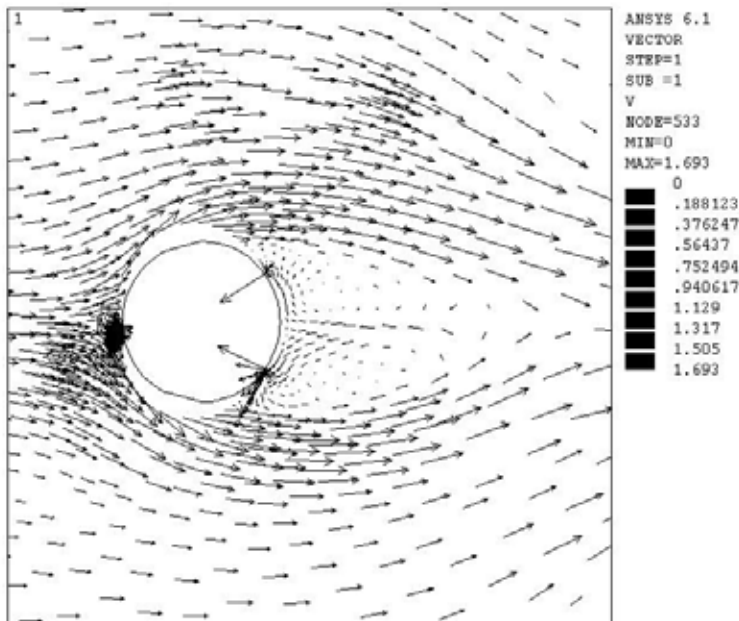
۵-۲-۴- تاثیر باد یونی بر دنباله ایجاد شده در پشت استوانه

جریان سیال در مجاورت دیواره در نیمه جلویی استوانه می‌شود و بدین ترتیب باعث کشیده شدن جریان خارج از لایه مرزی به سمت این ناحیه می‌شود. این مطلب را می‌توان در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ که از طریق تحلیل مساله در نرم افزار انسیس به دست آمده‌اند، ملاحظه کرد.

در اثر اعمال ولتاژ به الکترودها و افزایش آن شاهد کاهش حجم ناحیه دنباله در پشت استوانه هستیم. در بخش مربوط به میدان سرعت سیال مشاهده شد باد یونی باعث افزایش شتاب



شکل ۲۳- دنباله ایجاد شده در پشت استوانه پس از قرار گرفتن الکترودها بر روی آن بدون اعمال اختلاف ولتاژ



شکل ۲۴- دنباله ایجاد شده در پشت استوانه به ازای اختلاف ولتاژ ۲۰ کیلو ولت بین آند و کاتد

۵-۲-۵- تاثیر باد یونی بر ضریب پسا استوانه

نیروی پسا وارد بر اجسام در حالت کلی دارای دو مولفه می‌باشد: پسا اصطکاکی (پوستی) و پسا فشاری (شکلی). پسا اصطکاکی ناشی از نیروهای لزجی عمل کننده بر روی سطح جسم هستند در حالی که نیروی پسا فشاری به دلیل عدم توازن نیروهای ناشی از فشار وارد بر جسم می‌باشند. بدین ترتیب ضریب پسا وارد بر یک جسم به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 \times A_p} = \frac{\int_A [(P - P_\infty) + \tau_w] dA}{\frac{1}{2} \rho U^2 \times A_p} \quad (22)$$

افزایش اختلاف ولتاژ اعمالی در یک سرعت ورودی معین، ضریب پسا افزایش پیدا می‌کند که این به دلیل افزایش اختلاف فشار بین نیمه جلویی و عقبی استوانه در اثر فعالیت محرک الکتروهیدرودینامیکی و نیروی جسمی کولمبی ناشی از آن می‌باشد که این مطلب را در نمودار تغییرات ضریب پسا در بخش‌های قبل ملاحظه کردیم. بدین ترتیب مؤلفه فشاری نیروی پسا (مؤلفه غالب در نیروی پسا کل وارد بر استوانه) افزایش می‌یابد و باعث افزایش ضریب پسا کل خواهد شد. در شکل ۲۵ نمودار ضریب پسا برحسب اختلاف ولتاژ اعمالی در الکترودها در سرعت‌های ورودی مختلف نشان داده شده است.

بنابراین هندسه استقرار الکترودها برای کاهش پسا کل مناسب نخواهد بود.

همچنین با مقایسه نتایج به ازای یک اختلاف ولتاژ اعمالی مشخص در این نمودار، می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش سرعت ورودی، ضریب پسا کاهش می‌یابد.

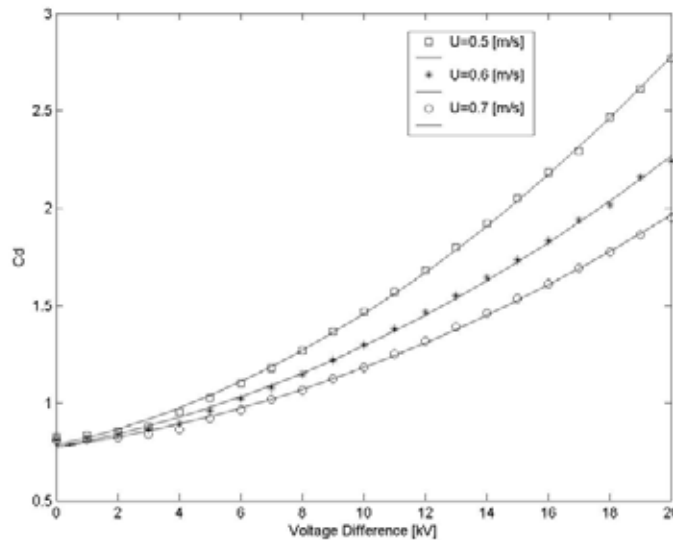
با بررسی نتایج محاسبات ضریب پسا، می‌توان مجموعه روابط زیر را بین ضریب پسا و اختلاف ولتاژ اعمالی در سرعت‌های ورودی اعمال شده (با برازش توابع نمایی بر داده‌ها با ضرایب همبستگی ذکر شده) پیشنهاد کرد:

$$U = 0.5 [m/s] : C_D = 0.7611 e^{0.0651(\Delta\phi)} \quad (r = 0.9979)$$

$$U = 0.6 [m/s] : C_D = 0.8447 e^{0.0464(\Delta\phi)} \quad (23) \quad (r = 0.8796)$$

$$U = 0.7 [m/s] : C_D = 0.7436 e^{0.0478(\Delta\phi)} \quad (r = 0.9962)$$

با توجه به رفتار نمایی منحنی‌های ضریب پسا ملاحظه می‌شود که روند افزایش ضریب پسا با زیاد شدن اختلاف ولتاژ بین الکترودها، با نرخ صعودی بیشتری ادامه می‌یابد.



شکل ۲۵- نمودار ضریب پسا در سرعت‌های ورودی و اختلاف ولتاژهای مختلف

		۶- نتیجه گیری
درجه حرارت	T	نتایج حاصل از شبیه سازی عددی مربوط به مسأله مورد
زمان	t	بررسی، در بخش های قبلی این فصل به تفصیل مورد بررسی قرار
سرعت جریان اصلی سیال	U	گرفتند. این نتایج را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:
مؤلفه افقی سرعت سیال در میدان محاسبه	u	۱- بیشینه بودن شدت میدان الکتریکی بر روی الکترودها (آند و
مؤلفه عمودی سرعت سیال در میدان محاسبه	v	کاتد) به ویژه در گوشه های کاتد
مختصه افقی مکان	x	۲- افزایش شدت میدان الکتریکی بر روی الکترودها در اثر
مختصه عمودی مکان	y	افزایش اختلاف پتانسیل بین الکترودها
مختصه زاویه ای روی سیم آند	α	۳- عدم توافق نتایج شبیه سازی عددی و تجربی در مورد جریان
دلتای کرونگر	δ_{ij}	حول استوانه در محدوده اعداد رینولدز نزدیک هزار
ضریب گذردهی الکتریکی محیط	ε	۴- شتاب گرفتن جریان سیال در مجاورت دیواره در نیمه جلویی
ضریب گذردهی الکتریکی خلا	ε_0	استوانه و همچنین به سمت گوشه های کاتد
زاویه، مختصه زاویه ای روی استوانه	θ	۵- افزایش اختلاف فشار بین نیمه جلویی و عقبی استوانه در اثر
لزجت دینامیکی سیال	μ	افزایش اختلاف ولتاژ اعمالی
تحرک یونی	μ_e	۶- کاهش حجم ناحیه دنباله در پشت استوانه
چگالی سیال	ρ	۷- افزایش ضریب پسا در اثر ازدیاد اختلاف ولتاژ اعمالی به ازای
چگالی حجمی بار الکتریکی	ρ_e	یک سرعت ورودی مشخص
هدایت الکتریکی	σ	۸- کاهش ضریب پسا در اثر ازدیاد سرعت ورودی به ازای یک
تنش برشی، تانسور تنش ماکسول	τ_{ij}	اختلاف ولتاژ اعمالی مشخص
پتانسیل الکتریکی	φ	
اختلاف پتانسیل الکتریکی	$\Delta\varphi$	

نمادها

مراجع		
[1] M.M. Reischman , 1984, "A review of compliant coating drag reduction research of ONR", in B.M. Uram and H.E. Weber (eds.), <i>Laminar Turbulent boundary layer</i> ", Vol. II, pp. 99-105, ASME , Fluid Eng, Div., New York.	سطح مقطع استوانه	A_p
[2] Seyed-Yagoobi,J. and Bryan,J.E. 1999. "Enhancement of heat transfer and mass transport in single-phase and two phase flows with electrohydrodynamics", <i>Advances in heat transfer J.</i> , Vol.33,pp.95-186.	چگالی شار مغناطیسی (بردار القاء مغناطیسی)	B
[3] Yabe,A. Mori,Y. and Hijikata,K. 1978, "EHD study of the corona wind between wire and plate electrode", <i>AIAA J.</i> Vol.16,No.4 pp.340-345.	ضریب پسا	C_D
[4] Velkoff,H.R. and Ketcham,J. 1968, "Effect of electrostatic field on boundary layer transition", <i>AIAA J.</i> Vol.6,No.7 pp.1381-1383.	ضریب فشار	C_p
	چگالی شار الکتریکی (بردار جابجایی الکتریکی)	D
	قطر استوانه	d
	شدت میدان الکتریکی	E
	نیروی جسمی	f
	نیروی جسمی الکتریکی	f_e
	شتاب جاذبه زمین	g
	چگالی جریان الکتریکی	J
	فشار نسبی سیال	p
	مقدار بار الکتریکی	Q
	شعاع استوانه	R
	مختصه شعاعی، ضریب همبستگی نتایج	r
	عدد رینولدز بر حسب قطر استوانه	Re

- [10] Leger, L., Moreau, E. and Touchard, G. 2002. "Effect of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate", *J. Electro-statics*, Vol. 51-52, pp. 300-306.
- [۱۱] دکتر حسین محسنی " مهندسی فشار قوی الکتریکی پیشرفته " انتشارات دانشگاه تهران، شماره ۲۸۶، چاپ دوم ۱۳۷۷.
- [12] P. H. Alleiv and T.G. Karayiannis 1995, " Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and fluid flow", *Heat Recovery System & CHP*. Vol. 15, No. 5, pp. 389-423.
- [13] Schlichting, H. and Gesten K. 1998, "Boundary layer Theory", Springer- verlag, Berlin.
- [14] Tanada S. 1956, "Experimental investigation of the wakes behind cylinders and plates at low Reynolds numbers", *J. Phys. Soc. Japan*, Vol. II, pp. 302-307.
- [5] Bushnel D.M. and January. 1983, "Turbulent drag reduction for external flows", Presented at AIAA Conf., Reno, NV. Paper 83-0227.
- [6] Malik. M.R. , Weinstine, L.M. and Hussaini, M.Y. 1983, "Ion-wind drag reduction" Presented at AIAA Conf., Reno, NV. Paper 83-0231.
- [7] Van Rosendale, J.R. and Malik, M.R. 1988, "Ion-wind effects on Poiseuille and Blasius flow", *AIAA J.*, Vol. 26 No. 8, pp. 961-968.
- [8] Soetomo, F. 1992, "The influence of high voltage discharge on flat plate drag at low Reynolds number air flow", M.Sc. thesis., Dept. Mech. Eng. Iowa State Univ. Ames.
- [9] Colver, G. and El Khabiri, S. 1999, " Modeling of the corona discharge along an electrically conductive flat with gas flow", *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 35, pp. 87- 394