



## بررسی عددی مشخصه‌های جریان حول بالواره نامتقارن NACA 4412 تحت تاثیر میدان الکتریکی

سید سعید حسینی نژاد<sup>۱</sup>، نیما امانی فرد<sup>۲\*</sup>، حامد محدث دیلمی<sup>۳</sup>، فرید دولتی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۳- دکتر، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۴- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

\* رشت، صندوق پستی ۳۷۵۶، namanif@guilan.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۲ دی ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۱ بهمن ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۲ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

نیروی بازدارندگی

کنترل جریان

جریان آشفته

الکتروهیدروینامیک

### چکیده

یکی از روش‌های نوین در زمینه کنترل فعال جریان استفاده از محرک الکتروهیدروینامیک است که به وسیله تزریق مومنتم به لایه مرزی سبب جلوگیری از وقوع پدیده جدایش و کاهش ضریب بازدارندگی می‌شود. در تحقیق حاضر، میدان جریان و مشخصه‌های آیرودینامیکی از قبیل ضریب بازدارندگی و ضریب فشار بر روی بالواره نامتقارن NACA 4412 بدون حضور میدان الکتریکی و همچنین تحت تاثیر محرک الکتروهیدروینامیکی در شرایط دوبره‌ای، آشفته، غیرقابل تراکم و پایدار با روش حجم محدود به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته است. در این بررسی زوایای حمله و ولتاژهای مختلف در نظر گرفته شده است و الکتروود تزریق کننده در مکان‌ها و فواصل متفاوت از سطح بالایی بالواره قرار داده شده و تاثیر آن بر ضریب بازدارندگی مشاهده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد با افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش زوایای حمله ضریب بازدارندگی کاهش می‌یابد. همچنین مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده و فاصله آن از الکتروود جمع کننده تاثیر بسزایی در به تاخیر انداختن نقطه جدایش دارد. از سویی دیگر، طبق نتایج به دست آمده، تاثیر ایجاد شده توسط میدان الکتریکی موجب کاهش حجم ناحیه دنباله گردابه‌های سطح بالای بالواره می‌شود.

## Numerical study of flow characteristics around a NACA 4412 asymmetric airfoil under the influence of electric field

Seyed Saeed Hoseininezhad, Nima Amanifard\*, Hamed Mohaddes Deylami, Farid Dolati

1- Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

\* P.O.B. 3756 Rasht, Iran, namanif@guilan.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 23 December 2013

Accepted 21 January 2014

Available Online 23 June 2014

### Keywords:

Drag Coefficient

Flow Control

Turbulent Flow

Electrohydrodynamic

### ABSTRACT

Electrohydrodynamic actuator is one of the newest devices in flow control techniques which can delay separation point and reduce the drag coefficient by inducing external momentum to the boundary layer of the flow. In this paper, a 2-D numerical approach was implemented to analyze the presence of electrohydrodynamic actuator on the incompressible, turbulent, steady flow over a NACA 4412 asymmetric airfoil. In this regards, the flow field and aerodynamic characteristics such as the drag and pressure coefficient were evaluated through the variety of attack angles, applied voltages, the location of emitting electrode, and the distance from the upper surface of the airfoil. The numerical results indicate that the drag coefficient with the presence of an electric field decreases with the enhancement of the supplied voltage but increases when the attack angle is augmented. In addition, the location of separation point significantly depends on the position of emitting electrode and the distance between the emitting electrode and the collecting electrode. On the other hand, according to the results, the Electrohydrodynamic effects cause the diminution of the wake region over the airfoil.

### ۱- مقدمه

در روش‌های غیرفعال مانند چین‌دار کردن و ایجاد شیار بر روی سطح، از نیروی‌های خارجی به منظور کنترل جریان استفاده نمی‌شود. اما در روش‌های فعال مانند لرزش سطح و اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، از نیروهای خارجی برای کنترل لایه مرزی و به تاخیر انداختن پدیده جدایش

بررسی روش‌های مختلف کنترل جریان به منظور کاهش بازدارندگی آیرودینامیکی مورد توجه بسیاری از محققان در این زمینه می‌باشد. به طور کلی این روش‌ها به سه دسته غیرفعال<sup>۱</sup>، فعال<sup>۲</sup> و ترکیبی<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند.

2- Active

3- Compound

1- Passive

### Please cite this article using:

S.S. Hoseininezhad, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, F. Dolati, Numerical study of flow characteristics around a NACA 4412 asymmetric airfoil under the influence of electric field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 147-154, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده می‌شود. همچنین در روش‌های ترکیبی از هر دو روش برای این منظور استفاده می‌گردد. در استفاده از این روش‌ها، بررسی پدیده جدایش، جدا شدن گردابه‌ها، مکانیزم‌های حاکم بر تشکیل و رشد گردابه‌ها در پایین دست جریان از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند.

یکی از روش‌های فعال جهت کنترل جریان بر روی سطح اجسام، استفاده از میدان الکتریکی ایجاد شده توسط یک منبع ولتاژ بالا می‌باشد. در این روش با اعمال میدان الکتریکی ولتاژ بالا و در نتیجه یونیزاسیون سیال دی‌الکتریک اطراف الکتروود تزریق‌کننده و حرکت این یون‌ها به سمت الکتروود جمع‌کننده، جریان ثانویه‌ای در سیال تولید می‌شود که به این پدیده‌ها لکتروهیدرودینامیک (EHD) می‌گویند. در این پدیده با انتقال مومنتم به جریان اولیه سیال و برهم زدن الگوی آن توسط گردابه‌های ایجاد شده، لایه مرزی هیدرودینامیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در نتیجه با به‌تأخیر انداختن جدایش لایه مرزی و کاهش حجم گردابه‌های پشت جسم، ضریب بازدارندگی کاهش می‌یابد.

ژائو و همکاران [۱] به‌صورت عددی پدیده الکتروهیدرودینامیک در یک کانال مسطح را بررسی نمودند. الگوریتم حل عددی آن‌ها ترکیبی از روش‌های المان محدود<sup>۱</sup>، روش مشخصه‌ها<sup>۲</sup> و حجم محدود<sup>۳</sup> بوده است. نتایج آن‌ها شبیه‌سازی الگوی جریان تحت تأثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک و پارامترهای موثر بر این پدیده را ارائه می‌دهد. آن‌ها دریافتند که با افزایش عدد رینولدز، تأثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر جریان سیال کاهش می‌یابد. علاوه بر این بزرگی گردابه‌ها در عدد رینولدز ثابت به ولتاژ اعمال شده بستگی دارد و در سرعت‌های پایین، سرعت جریان تأثیری بر پارامترهای الکتریکی نمی‌گذارد اما در سرعت‌های بالا به‌طور موثری بر میدان الکتریکی تأثیرگذار می‌باشد. تادا و همکاران [۲] با استفاده از الکتروودهای سیمی به موازات جریان اصلی، به انجام یک سری آزمایش‌ها به‌منظور بررسی تأثیر اعمال میدان الکتریکی بر جریان‌های داخل کانال پرداختند. در بررسی آن‌ها الکتروودهای سیمی به فاصله مساوی از یکدیگر قرار گرفته و به وسیله منبع مولد ولتاژ بالای مثبت تغذیه می‌شدند. نتایج آن‌ها افزایش آهنگ انتقال حرارت جابه‌جایی به ویژه در محدوده جریان‌های آرام، در اثر ترکیب جریان‌های ثانویه ناشی از اعمال میدان الکتریکی و جریان اولیه را نشان داده است. هیونو چوون [۳] به‌صورت تجربی تأثیر جریان کرونا بر گردابه‌های پشت سیلندر در داخل یک کانال را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در کار تجربی خود الکتروود تزریق‌کننده را در زوایای مختلف ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ و فواصل ۱، ۱/۵، ۳ سانتی‌متری از سطح سیلندر قرار دادند. نتایج آن‌ها با آشکارسازی خطوط جریان نشان داد که جریان یونی تأثیر چشم‌گیری بر روی ساختار گردابه‌های پشت سیلندر می‌گذارد و نیروی بازدارندگی فشاری تحت تأثیر باد یونی<sup>۴</sup> به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. لگر و همکاران [۴] نیز به بررسی تجربی تأثیر تخلیه کرونای DC بر روی جریان هوا در امتداد یک صفحه تخت شیبدار پرداختند. آشکارسازی میدان جریان و نیز تعیین توزیع سرعت با استفاده از فن‌آوری PIV<sup>۵</sup> نشان داد که بدون اعمال میدان الکتریکی، جریان در لبه جلویی صفحه از آن جدا شده و دنباله‌های قابل توجهی در بالای صفحه شکل می‌گیرد. اما با اعمال میدان الکتریکی و تخلیه کرونا، خطوط جریان به سمت صفحه منحرف می‌شود که با توجه به عدد رینولدز جریان و شیب صفحه، به برخورد یا عدم برخورد جریان با صفحه منجر شده و همزمان از میزان گردابه‌ها کاسته می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که تأثیر تخلیه کرونا بر

جریان در اعداد رینولدز پایین در قالب کاهش دنباله‌های جریان و کاهش نیروی بازدارندگی، بیشتر بوده و با افزایش سرعت جریان، تأثیر تخلیه کرونا کمتر می‌شود. روبرتو و گویلمو [۵] به‌صورت تجربی جریان روی یک بالواره متقارن در رینولدز پایین را تحت تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیکی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که در رینولدزهای پایین تأثیر محرک وابسته به ولتاژ اعمالی و فاصله نسبی بین محرک و خط جدایش است. اسماعیل‌زاده و آقازینالی [۶] جریان حول استوانه تحت تأثیر یک محرک الکتروهیدرودینامیکی میله-صفحه‌ای چسبیده به سطح استوانه را با استفاده از روش اجزاء محدود به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که با اعمال میدان الکتریکی، جریان سیال در مجاورت نیمه جلویی استوانه شتاب می‌گیرد و در نتیجه با افزایش اختلاف فشار سطوح جلویی و عقبی استوانه ضریب بازدارندگی افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که حجم ناحیه دنباله در پشت استوانه و ضریب بازدارندگی با افزایش سرعت ورودی به‌ازای یک اختلاف ولتاژ اعمالی یکسان کاهش می‌یابد. تظهیری و اسماعیل‌زاده [۷] اثر پدیده EHD بر کنترل لایه مرزی ورقه‌ای روی استوانه به کمک دو الکتروود سیمی و دو الکتروود نواری چسبیده به سطح استوانه را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیان‌کننده این مطلب است که ضریب بازدارندگی افزایش یافته و در تمامی حالت‌ها افزایش سرعت در لایه مرزی مشاهده می‌شود که حاکی از افزایش مومنتم ذرات سیال در اثر اعمال میدان الکتریکی است. همچنین این تأثیرات در اعداد رینولدز پایین به نسبت بیشتر است. علاوه بر این آن‌ها دریافتند که ضریب بازدارندگی تابع هندسه مسأله، ولتاژ اعمالی و رژیم جریان می‌باشد که در هندسه مورد نظر آن‌ها ضریب بازدارندگی افزایش یافته است. سلماسی و همکاران [۸] به بررسی عددی و تجربی اثر یک عملگر پلاسمایی بر کارایی بالواره NACA 0414 پرداختند. آن‌ها نشان دادند که حضور عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل و در نزدیکی شروع جدایش سبب تأخیر در نقطه جدایش و افزایش کارایی بالواره می‌شود.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر اعمال میدان الکتریکی قوی بر جریان حول یک بالواره، در شرایط استفاده از یک الکتروود سیمی و یک الکتروود صفحه‌ای می‌باشد. یافتن مکان افقی و عمودی مناسب برای قرارگیری الکتروود تزریق‌کننده به‌منظور به‌تأخیر انداختن جدایش جریان و کاهش ضریب بازدارندگی از دیگر اهداف تحقیق حاضر می‌باشد.

## ۲- هندسه مسأله و شبکه محاسباتی

شماتیکی از هندسه دوبعدی بالواره NACA 4412 در شکل ۱ نمایش داده شده است. به‌منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان برای ورود به منطقه محاسباتی و برطرف شدن اثرات ورودی و خروجی جریان، از ابتدای منطقه محاسباتی تا لبه حمله و از لبه فرار تا انتهای منطقه محاسباتی به ترتیب ۱۵ و ۲۰ برابر طول وتر در نظر گرفته شده است. همچنین طول وتر این بالواره ۱۲ سانتی‌متر، قطر الکتروود تزریق‌کننده ۰/۰۹ سانتی‌متر و فاصله این الکتروود از الکتروود جمع‌کننده ۱ سانتی‌متر می‌باشد. به‌منظور بررسی مشخصه‌های آبرودینامیکی فاصله افقی الکتروود تزریق‌کننده از لبه حمله ۱، ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

طراحی مدل هندسی و تولید شبکه محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار گمبیت<sup>۷</sup> انجام گرفته و شبکه به‌صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و چهار وجهی می‌باشد.

۱- Finite difference  
 ۲- Method of characteristic  
 ۳- Finite volume  
 ۴- Ionic Wind  
 ۵- Particle Imaging Velocimetry

6- Airfoil  
 7- Gambit

سنتی "مدل ناحیه‌های دولایه‌ای" تبدیل می‌شود یعنی در ناحیه زیرلایه کاملاً مغشوش، جریان با استفاده از حل کامل معادلات شبیه‌سازی می‌شود و در بالای این ناحیه نیز تحلیل و حل عددی ادامه می‌یابد، لذا در این حالت به شبکه‌های ریزی نیاز است که در این تحقیق تلاش شده که مقدار  $Y^+$  همواره کوچکتر و یا در حدود عدد ۱ باشد. در شکل ۲ نمایی از شبکه محاسباتی کل دامنه، اطراف بالواره و اطراف الکتروود تزریق‌کننده نشان داده شده‌است.

### ۳- معادلات حاکم بر میدان الکتریکی و میدان جریان

نیروی حجمی اعمال شده توسط میدان الکتریکی بر میدان جریان به صورت زیر بیان می‌شود [۹]:

$$f_e = \rho_c \vec{E} - \frac{1}{2} \vec{E}^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[ \vec{E}^2 \rho \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $\rho_c$ ،  $\vec{E}$ ،  $\epsilon$  و  $\rho$  به ترتیب بردار میدان الکتریکی، چگالی بار الکتریکی، ضریب گذردهی الکتریکی و چگالی سیال می‌باشند. مولفه‌های این نیرو به ترتیب از چپ به راست، نیروی کولمب، نیروی دی‌الکتروفورتیک و نیروی الکترواستریکشن نامیده می‌شوند. از مولفه‌های دوم و سوم نیروی حجمی پدیده الکتروهایدرودینامیک به دلیل ثابت بودن ضریب گذردهی الکتریکی و عدم تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی با چگالی برای سیال تراکم ناپذیر هوا صرف نظر می‌شوند. بنابراین تنها مولفه موثر در این پدیده، مولفه نیروی کولمب ( $\rho_c \vec{E}$ ) خواهد بود که از حل همزمان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی تعیین می‌شود.

معادلات پواسون و بقای جریان الکتریکی به عنوان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی، به صورت زیر تعریف می‌شوند [۹]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (J) = 0 \quad (3)$$

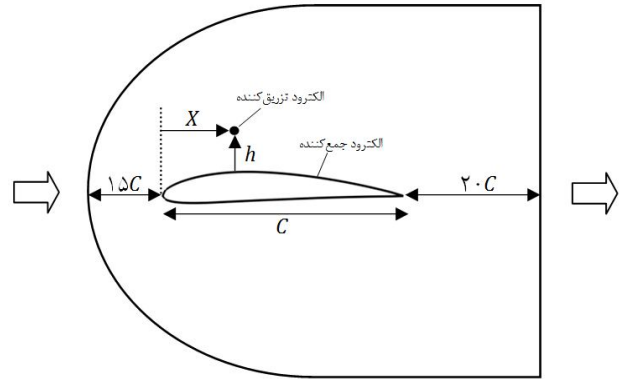
که در این رابطه  $J$  چگالی جریان الکتریکی به صورت زیر می‌باشد:

$$J = \rho_c \beta \vec{E} + \rho_c u + \sigma \vec{E} \quad (4)$$

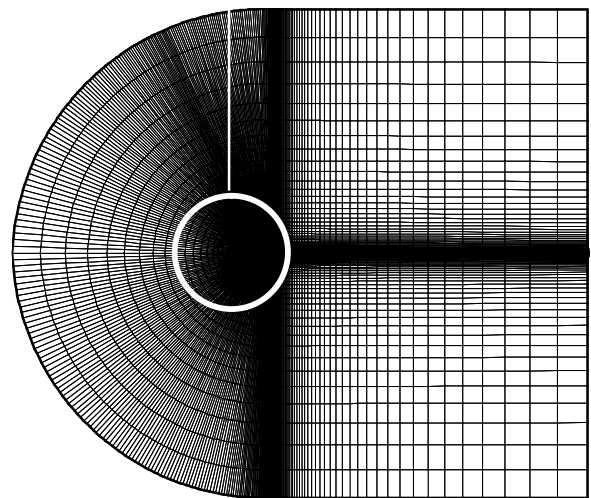
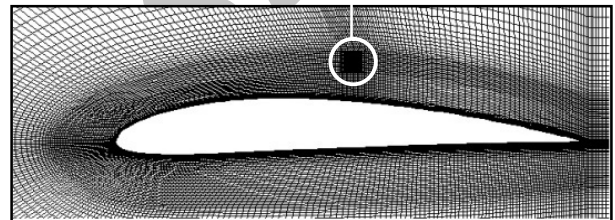
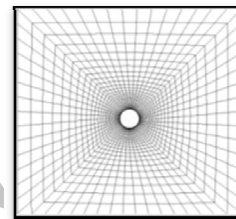
در این رابطه  $\beta$  و  $\sigma$  به ترتیب یون‌پذیری هوا و ضریب قابلیت الکتریکی می‌باشند. سه عبارت سمت راست معادله (۴) به ترتیب تحرک یونی، جابه‌جایی و هدایت الکتریکی نامیده می‌شوند. به دلیل اینکه بزرگی تحرک یونی در پدیده EHD نسبت به جابه‌جایی و هدایت الکتریکی از مرتبه بالاتری برخوردار است، از عبارت‌های جابه‌جایی و هدایت الکتریکی صرف نظر می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه بین پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی ( $E = -\nabla V$ ) و همچنین جاگذاری معادله (۴) در معادله (۳) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\beta \rho_c \nabla V) = 0 \quad (5)$$

به این ترتیب معادلات (۲) و (۵) معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی می‌باشند که به منظور تعیین نیروی کولمب برای هر سلول به طور همزمان حل می‌شوند. به منظور حل همزمان این معادلات مشتقات پاره‌ای جزئی و تعیین پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از UDF فلونت<sup>آ</sup> که بر پایه برنامه به زبان C نوشته شده است، استفاده می‌شود و نیروی الکتریکی به دست می‌آید. بعد از محاسبه نیروی الکتریکی، این نیرو به معادلات مومنتم اضافه می‌شود.



شکل ۱ دامنه محاسباتی



شکل ۲ شبکه محاسباتی

به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک دیواره، الکتروود تزریق‌کننده و لبه حمله که گرادینت‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری در این نواحی استفاده شده است به گونه‌ای که کنترل صحیحی روی  $Y^+$  انجام شود. در این تحقیق از روش رفتار دیواره پیشرفته<sup>۱</sup> استفاده شده است. در روش رفتار دیواره پیشرفته به کمک یک مدل آشفتگی دولایه‌ای و ترکیب آن با توابع دیواره پیشرفته، نواحی نزدیک دیواره مدل می‌شوند. اگر شبکه در نزدیکی دیواره ریز باشد که بتوان ناحیه زیرلایه لزج ( $Y^+ = 1$ ) را حل نمود، در این صورت روش رفتار دیواره پیشرفته به روش

#### ۴- روش حل عددی

جهت مدل‌سازی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای k-ε استاندارد بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده نایبر-استوکس (RANS) به کار رفته و لذا دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم و معادلات انتقال k و ε برای جریان تحت شرایط دو بعدی، تراکم‌ناپذیر، لزج، تک‌فاز و با در نظر گرفتن نیروی حجمی حاصل از اعمال میدان الکتریکی عبارت‌اند از [۱۰]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (6)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + (\mu + \mu_t)\nabla^2 u + f_e \quad (7)$$

$$\mu_t / \rho = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (8)$$

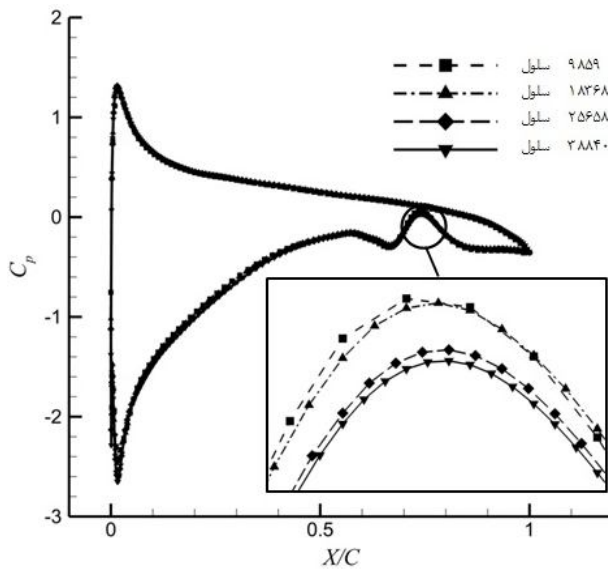
حل عددی معادلات (۶) تا (۸) با استفاده از کد فلونت، براساس حجم محدود و توسط حل‌کننده بر پایه فشار صورت گرفته و جهت گسسته‌سازی ترم فشار و سایر ترم‌های معادلات به ترتیب روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم و همچنین برای حل توأم میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. معادلات میدان الکتریکی به صورت ناپایا و معادلات سیال به صورت پایا حل شده‌اند. به منظور تشخیص همگرایی حل، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده  $10^{-4}$  می‌باشد. علاوه بر آن کاهش خالص شار جرمی به میزان کمتر از ۰/۲٪ شار کل و رصد کردن تغییرات کمیت‌های مهم جریان در نواحی حساس لحاظ شده‌اند. کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر اینتل core i3 3.1 GHz به صورت پردازش موازی انجام شده و زمان محاسباتی حدود ۴-۶ ساعت برای هر حل بوده که متناسب با هندسه حل متغیر است. به منظور یافتن جواب‌های مستقل از شبکه محاسباتی، مطابق شکل ۳ ضریب فشار حول بالواره نشان می‌دهد که شبکه دارای ۲۵۶۵۸ سلول برای حل عددی تحت شرایط زاویه حمله ۱۵ درجه، فاصله الکتروود از لبه حمله ۹ سانتی‌متر و ولتاژ اعمالی ۱۵kV مناسب می‌باشد. همچنین استقلال شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۵- خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی

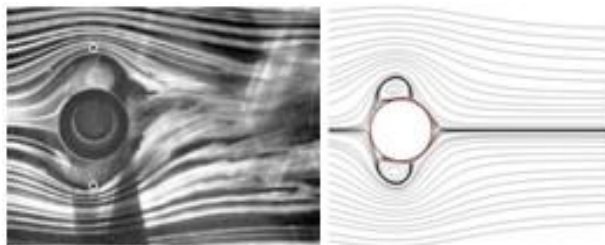
هوا به عنوان سیال عامل و به صورت تراکم‌ناپذیر با خواص ترموفیزیکی ثابت فرض شده است. برای ناحیه C شکل اطراف بالواره و مرزهای بالا و پایین، شرط مرزی ورودی سرعت با مقدار یکنواخت ۵ m/s و شدت آشفتگی ۵٪ به کار رفته است. با توجه به سرعت جریان و طول قطر بالواره برابر ۱۲ cm، عدد رینولدز جریان براساس قطر بالواره برابر  $10^4 \times 4/11$  می‌باشد. مرز خروجی دامنه محاسباتی دارای شرط مرزی فشار خروجی می‌باشد و دیواره بالواره و سطح الکتروود تزریق‌کننده به صورت عایق، ساکن و عدم لغزش فرض شده‌اند. شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی نیز در کل دامنه محاسباتی در جدول ۱ نشان داده شده است.

از آنجایی که شرایط مرزی برای یک مساله، با توجه به شرایط فیزیکی مطرح می‌شوند و تعداد شرایط مرزی نیز وابسته به نوع معادلات است، بنابراین تعیین شرایط مرزی برای بار الکتریکی در روی الکتروود تزریق‌کننده آسان نیست و با سعی و خطا قابل محاسبه است. بر این اساس از فرضیه کاپتروف و قانون پیک به منظور تعیین بار الکتریکی استفاده شده است. فرضیه کاپتروف بیان می‌دارد که بعد از آستانه تخلیه کرونا، میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ ثابت می‌ماند و مقدار میدان الکتریکی از رابطه تجربی زیر قابل محاسبه است [۹]:

$$E_0 = 3.1 \times 10^6 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r}}\right) \quad (9)$$



شکل ۳ استقلال شبکه  $a=15^\circ$ ،  $X=0/0.9m$ ،  $V=15kV$



شکل ۴ خطوط جریان در ولتاژ  $V=26/5kV$

جدول ۱ شرایط مرزی پتانسیل و چگالی بار الکتریکی [۹]

| مرز                  | جریان                         | پتانسیل الکتریکی              | چگالی بار الکتریکی                 |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| ورودی جریان          | $u = U_0 = 5m/s$              | $\partial V / \partial n = 0$ | $\partial \rho_c / \partial n = 0$ |
| خروجی جریان          | $\partial P / \partial x = 0$ | $\partial V / \partial x = 0$ | $\partial \rho_c / \partial x = 0$ |
| الکتروود تزریق‌کننده | $u = 0$                       | $V = V_0$                     | قانون پیک                          |
| سطح بالایی بالواره   | $u = 0$                       | $V = 0$                       | $\partial \rho_c / \partial n = 0$ |
| سطح پایینی بالواره   | $u = 0$                       | $\partial V / \partial n = 0$ | $\partial \rho_c / \partial n = 0$ |

در این رابطه r شعاع الکتروود تزریق‌کننده بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. قانون پیک در تحلیل عددی به طور غیرمستقیم در یافتن مقدار بار الکتریکی قابل استفاده است. در این روش بار الکتریکی در الکتروود تزریق‌کننده حدس زده می‌شود و سپس اندازه میدان الکتریکی در الکتروود تزریق‌کننده محاسبه می‌شود که در صورت تفاوت اندازه میدان الکتریکی محاسبه شده در تحلیل عددی با مقدار پیک (تفاوت بیشتر از  $10^{-6}$ )، حدس دیگری برای بار الکتریکی انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که اندازه میدان الکتریکی در محاسبات عددی با مقدار به دست آمده از رابطه پیک تفاوت ناچیزی داشته باشد.

#### ۶- نتایج

جهت حصول اطمینان از صحت نتایج و اعتبارسنجی آن، نتایج تحلیل عددی حاضر با نتایج تجربی هیون و چوون [۳] برای جریان حول یک سیلندر مقایسه شده است. برای حالتی که الکتروود تزریق‌کننده در زاویه ۹۰ درجه و در فاصله ۳ سانتی‌متری سطح استوانه می‌باشد، خطوط جریان و ضریب فشار حول سیلندر در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه شده و همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج تجربی و عددی از تطابق مطلوبی برخوردار می‌باشد.

در این رابطه  $p_\theta$  و  $p_0$  به ترتیب فشار روی سطح سیلندر و فشار جریان آزاد می‌باشند.

### ۶-۱- نتایج تحلیل میدان الکتریکی

به منظور بررسی میدان الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ بالای الکتریکی به الکترود تزریق کننده، توزیع پتانسیل و چگالی بار الکتریکی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکترود تزریق کننده دارای مقدار بیشینه می‌باشد و با نزدیک شدن به سطح الکترود جمع کننده از مقدار آن کاسته می‌شود. از طرفی دیگر مقدار چگالی بار الکتریکی نیز بر روی الکترود تزریق کننده برابر  $0.077 \text{ C/m}^3$  می‌باشد و با فاصله گرفتن از سطح الکترود تزریق کننده، چگالی بار الکتریکی کاهش می‌یابد. بنابراین طبق تعریف، نیروی کولمب حاصل از اعمال میدان الکتریکی در مجاورت الکترود تزریق کننده بیشتر است و انتظار می‌رود جریان ثانویه تولیدی در اثر یونیزاسیون سیال دی الکتریک در زیر الکترود تزریق کننده دارای قدرت بیشتری باشد. در نتیجه تغییر در مکان قرارگیری و ولتاژ اعمالی می‌تواند در کنترل گردابه‌های ناشی از جدایش بر روی سطح و کاهش ضریب بازدارندگی نقش مهمی را ایفا نماید.

### ۶-۲- تاثیر میدان الکتریکی بر ضریب بازدارندگی

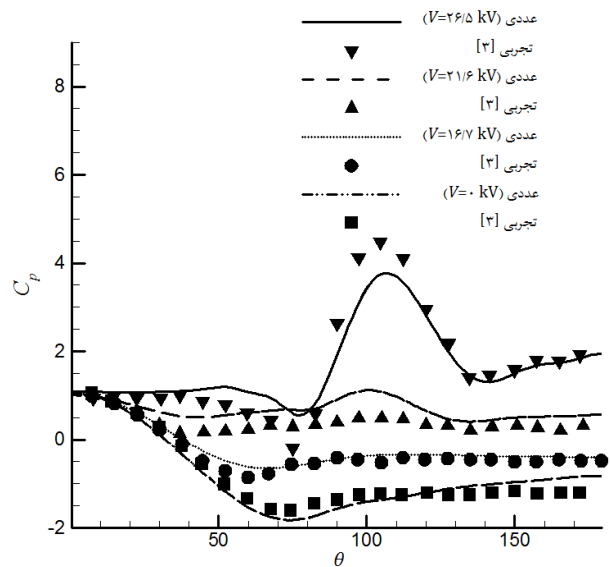
نیروی بازدارندگی وارد بر اجسام در حالت کلی دارای دو مولفه اصطکاکی و فشاری می‌باشد. بدین ترتیب ضریب بازدارندگی وارد بر یک جسم به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد [۶]:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} = C_p + C_f = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \int (p - p_0) \cdot \hat{n} \cdot \hat{i} dA + \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \int \tau_w \cdot \hat{t} \cdot \hat{i} dA \quad (11)$$

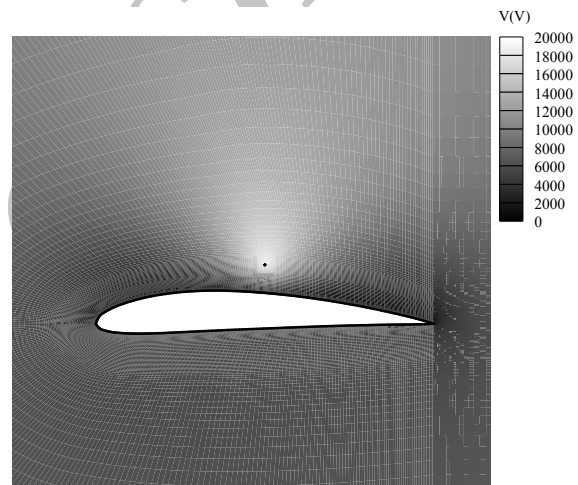
در این رابطه  $\tau_w$  و  $p$  به ترتیب تنش برشی و فشار در سطح  $dA$ ،  $p_0$  فشار استاتیکی جریان آزاد و  $U_0$  سرعت جریان آزاد می‌باشد. همچنین  $n$  و  $t$  بردارهای عمودی و مماسی بر سطح می‌باشند.

به منظور بررسی تاثیر میدان الکتریکی بر ضریب فشار حول بالواره، تغییرات ضریب فشار برای مکان‌های مختلف قرارگیری الکترود تزریق کننده، در ولتاژهای اعمالی و زاویه‌های حمله متفاوت در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

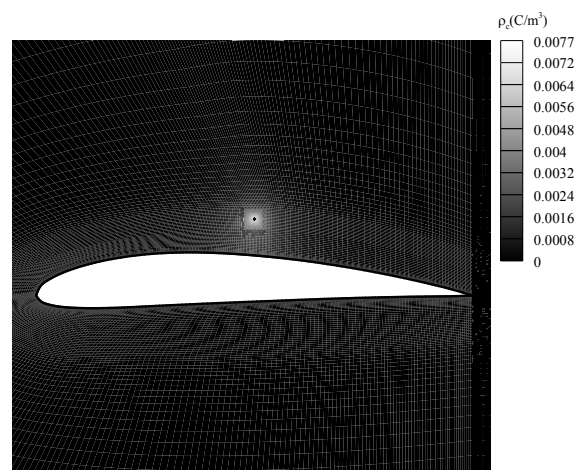
همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، با اعمال میدان الکتریکی ضریب فشار سطح بالایی بالواره در مقایسه با عدم حضور میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. البته ذکر این نکته ضروری است که در زیر الکترود تزریق کننده به علت مومنتم جریان ثانویه ضریب فشار به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، همان‌طور که مشاهده می‌شود، مادامی که الکترود تزریق کننده در مکان  $X=0.1 \text{ m}$  قرار می‌گیرد، میدان الکتریکی تاثیر چندانی بر جریان حول بالواره نمی‌گذارد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان نمود که در مکان‌های نزدیک لبه حمله بالواره به دلیل سرعت بالای جریان سیال، یون‌ها به سمت پایین دست جریان شسته می‌شوند و در نتیجه از کارایی پدیده EHD در این نقاط کاسته می‌شود. البته با نزدیک کردن الکترود تزریق کننده به الکترود جمع کننده و همچنین افزایش ولتاژ اعمالی متناسب با سرعت جریان اصلی سیال می‌توان کارایی پدیده EHD را در مجاورت لبه حمله افزایش داد.



شکل ۵ ضریب فشار حول سیلندر در ولتاژهای متفاوت (زاویه قرارگیری الکترود تزریق کننده  $\theta=90^\circ$ )



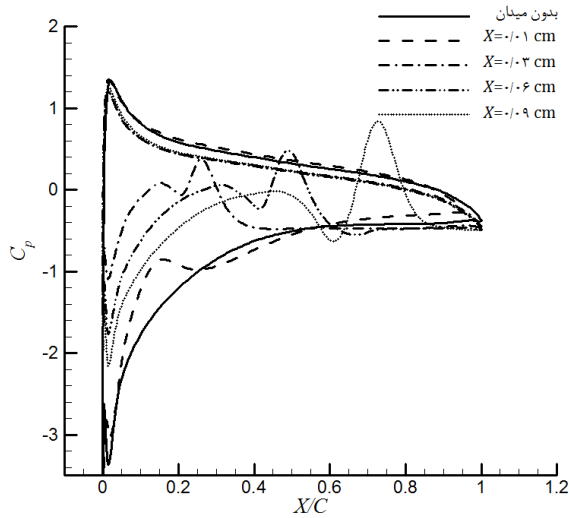
شکل ۶ توزیع پتانسیل الکتریکی  $V=20 \text{ kV}$ ,  $X=0.06 \text{ m}$ ,  $\alpha=15^\circ$



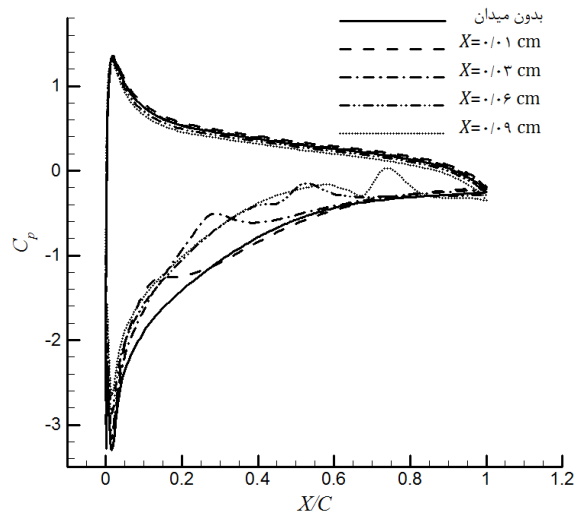
شکل ۷ توزیع چگالی بار الکتریکی  $V=20 \text{ kV}$ ,  $X=0.06 \text{ m}$ ,  $\alpha=15^\circ$

شایان ذکر است که ضریب فشار حول استوانه به صورت زیر تعریف می‌شود:

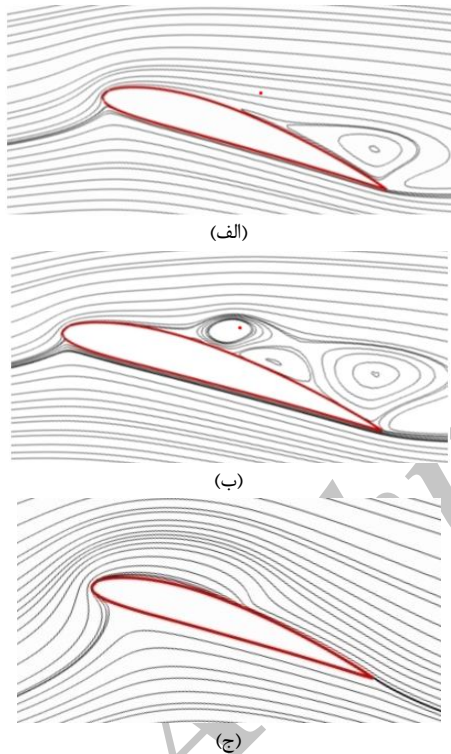
$$C_p = \frac{(p_\theta - p_0)}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (10)$$



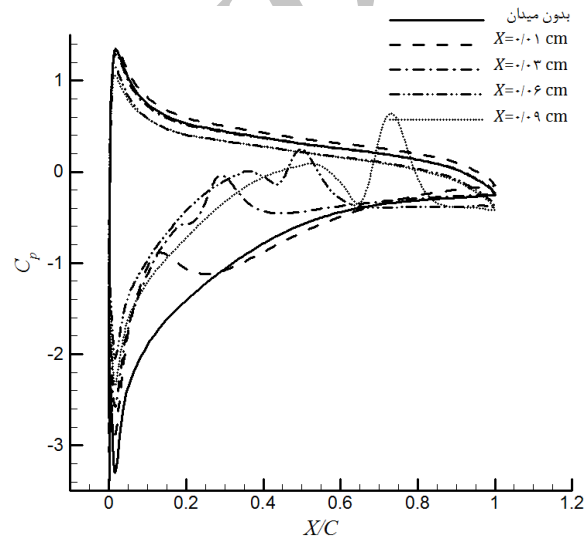
شکل ۱۱ ضریب فشار حول بالواره  $V=20\text{ kV}$ ,  $\alpha=18^\circ$



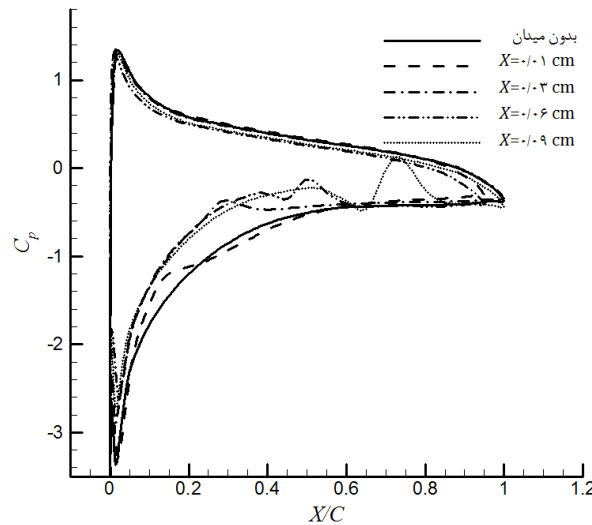
شکل ۸ ضریب فشار حول بالواره  $V=15\text{ kV}$ ,  $\alpha=15^\circ$



شکل ۱۲ خطوط جریان حول بالواره  $\alpha=18^\circ$ ,  $X=0.06\text{ m}$   
 (الف)  $V=0\text{ kV}$ , (ب)  $V=15\text{ kV}$ , (ج)  $V=15\text{ kV}$ ,  $H=0.1\text{ cm}$



شکل ۹ ضریب فشار حول بالواره  $V=20\text{ kV}$ ,  $\alpha=15^\circ$

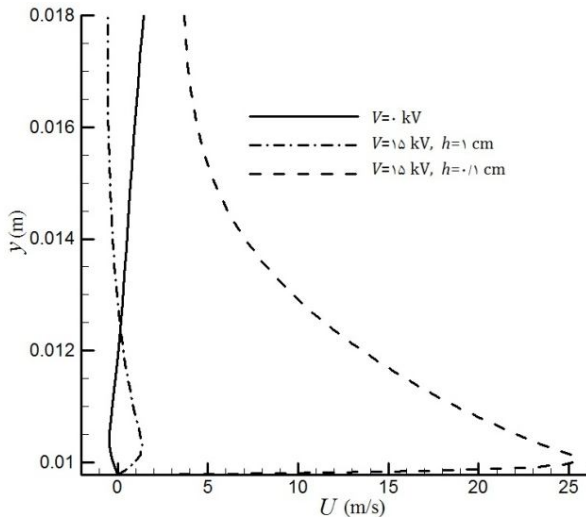


شکل ۱۰ ضریب فشار حول بالواره  $V=15\text{ kV}$ ,  $\alpha=18^\circ$

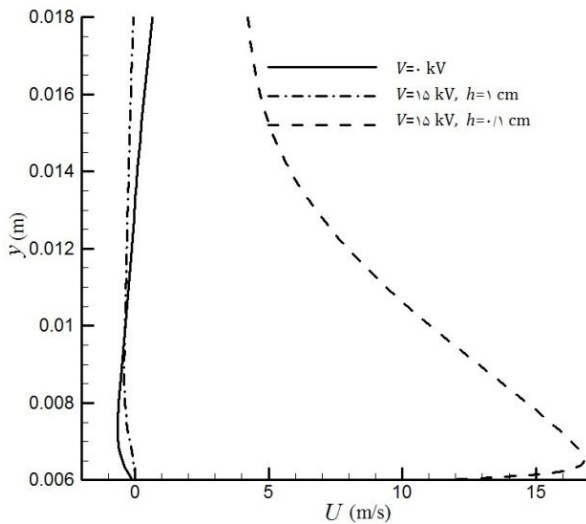
### ۳-۶- تأثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان

به منظور بررسی تأثیر پدیده EHD بر میدان جریان، خطوط جریان در سه حالت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۱۲ (الف) به وضوح مشاهده می‌شود، بدون حضور میدان الکتریکی، با کاهش سرعت و افزایش فشار جریان در طول سطح بالایی بالواره، پدیده جدایش در نزدیکی  $X=0.06\text{ m}$  رخ می‌دهد. در شکل ۱۲ (ب) با اعمال میدان الکتریکی به الکترود تزریق کننده در ارتفاع  $1\text{ cm}$ ، گردابه‌های ایجاد شده حاصل از جریان ثانویه باعث به وجود آمدن اختلاط در لایه مرزی نزدیک سطح بالایی بالواره می‌شود و همان گونه که در قسمت قبل نشان داده شده است، ضریب بازدارندگی به میزان  $15/5\%$  کاهش می‌یابد اما تأثیری در به تاخیر انداختن جدایش جریان ندارد. از سویی دیگر با کاهش فاصله الکترود تزریق کننده و الکترود جمع کننده ( $h=0.1\text{ cm}$ )، جدایش

علاوه بر این با مقایسه شکل‌های ۸ و ۱۰ و همچنین ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه حمله در یک ولتاژ ثابت، تأثیر میدان الکتریکی بر ضریب فشار بیشتر می‌شود.



شکل ۱۵ پروفیل سرعت جریان بر روی سطح بالواره در مقطع  $X=0.072$  m



شکل ۱۶ پروفیل سرعت جریان بر روی سطح بالواره در مقطع  $X=0.096$  m

جدول ۲ ضریب بازدارندگی بالواره تحت زاویه حمله  $\alpha=15^\circ$

| مکان الکتروود (m) | $V=15(kV)$ |           | $V=20(kV)$ |           |
|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|
|                   | $C_D$      | درصد کاهش | $C_D$      | درصد کاهش |
| $X=0.01$          | 0.0283     | -42%      | 0.0215     | -8%       |
| $X=0.03$          | 0.0171     | 14/1%     | 0.0163     | 18%       |
| $X=0.06$          | 0.0158     | 20/6%     | 0.0131     | 34%       |
| $X=0.09$          | 0.0142     | 28/6%     | 0.0063     | 68%       |

جدول ۳ ضریب بازدارندگی بالواره تحت زاویه حمله  $\alpha=18^\circ$

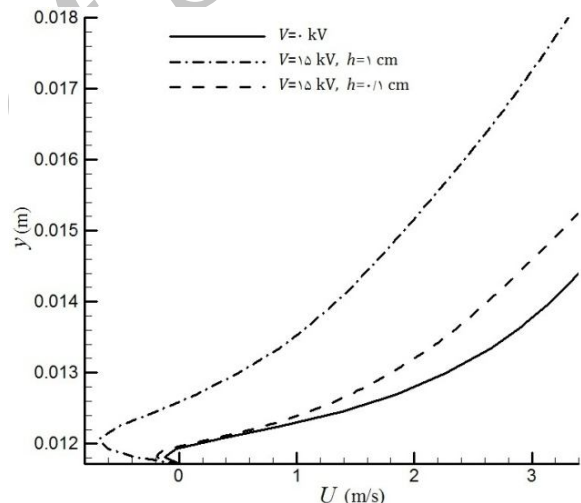
| مکان الکتروود (m) | $V=15(kV)$ |           | $V=20(kV)$ |           |
|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|
|                   | $C_D$      | درصد کاهش | $C_D$      | درصد کاهش |
| $X=0.01$          | 0.0264     | 2/3%      | 0.0266     | 1/5%      |
| $X=0.03$          | 0.0236     | 12/6%     | 0.0231     | 14/44%    |
| $X=0.06$          | 0.0228     | 15/5%     | 0.0193     | 28/5%     |
| $X=0.09$          | 0.0197     | 27%       | 0.0139     | 48%       |

به منظور ارزیابی عملکرد پدیده EHD، معیار عملکرد این پدیده در قالب کاهش نسبی ضریب بازدارندگی در واحد توان مصرفی جهت تخلیه کرونا به- عنوان پارامتری مهم طبق رابطه زیر مورد بررسی قرار گرفته که در جدول‌های ۴ و ۵ نتایج آن نشان داده شده است.

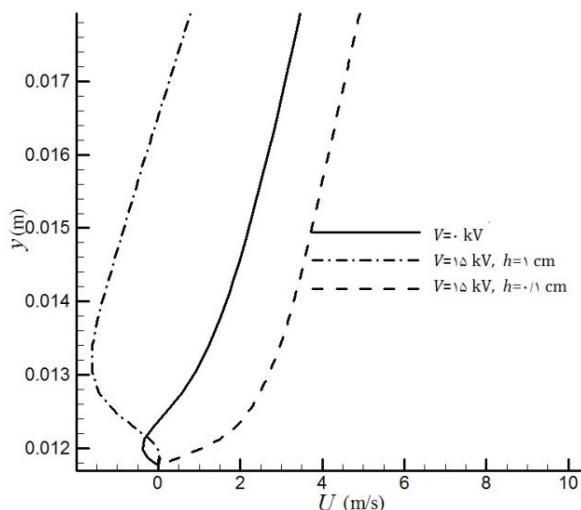
جریان به کلی از بین می‌رود و میدان الکتریکی تاثیر بسزایی بر تاخیر محل جدایش می‌گذارد که این موضوع در شکل ۱۲ (ج) نشان داده شده است.

همچنین در شکل‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ پروفیل سرعت بر روی سطح بالواره به ترتیب در مقاطع  $X=0.036$  m،  $X=0.048$  m،  $X=0.072$  m،  $X=0.096$  m در حالت بدون اعمال میدان الکتریکی و حالتی که الکتروود تزریق‌کننده در ارتفاع  $h=1$  cm و  $h=0.1$  cm قرار دارد، نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص است، در حالت عدم حضور میدان الکتریکی، با حرکت از لبه حمله به سمت لبه فرار بالواره مقدار جریان برگشتی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین در حالتی که الکتروود تزریق‌کننده در  $h=1$  cm قرار دارد، ضخامت بیشتری از جریان جدایش می‌یابد در حالی که ضریب بازدارندگی حاصل از اعمال میدان الکتریکی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، حضور نیروهای حجمی ناشی از میدان الکتریکی در حالت  $h=0.1$  cm سبب تزریق مومنتم به لایه مرزی جریان عبوری از روی بالواره و در نتیجه به تاخیر افتادن جریان برگشتی شده است.

در جداول ۲ و ۳ مقادیر ضریب بازدارندگی تحت شرایط مختلف در حضور میدان الکتریکی نشان داده شده و نتایج آن با مقادیر ضریب بازدارندگی بدون اعمال میدان الکتریکی مقایسه و درصد کاهش آن بررسی شده است. مقدار ضریب بازدارندگی بدون اعمال میدان الکتریکی برای  $\alpha=15^\circ$  و  $\alpha=18^\circ$  به ترتیب برابر  $0.0199$  و  $0.027$  می‌باشد.



شکل ۱۳ پروفیل سرعت جریان بر روی سطح بالواره در مقطع  $X=0.036$  m



شکل ۱۴ پروفیل سرعت جریان بر روی سطح بالواره در مقطع  $X=0.048$  m

الکتروود تزریق‌کننده، تاثیر محرک EHD در کاهش ضریب بازدارندگی کمتر می‌شود.

- با کاهش فاصله الکتروود تزریق‌کننده و الکتروود جمع‌کننده، تزریق مومنتم به لایه مرزی افزایش یافته و جدایش جریان با چسبیدن خطوط جریان به سطح بالواره به تاخیر می‌افتد.

#### ۷- فهرست علائم

|       |  |
|-------|--|
| $C_f$ | ضریب اصطکاک پوسته‌ای                         |
| $C_p$ | ضریب فشار                                    |
| $E$   | میدان الکتریکی ( $Vm^{-1}$ )                 |
| $f_e$ | نیروی الکتروهیدرودینامیکی ( $Vm^{-3}$ )      |
| $k$   | انرژی جنبشی آشفتگی ( $m^2s^{-2}$ )           |
| $n$   | متغیر عمود بر سطح                            |
| $p_i$ | فشار بر روی سطح ایرفویل ( $kgm^{-1}s^{-2}$ ) |
| $U_0$ | سرعت جریان آزاد ( $ms^{-1}$ )                |
| $V$   | ولتاژ (V)                                    |

#### علائم یونانی

|               |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| $\beta$       | یون پذیر ( $m^2v^{-1}s^{-1}$ )     |
| $\varepsilon$ | ضریب گذردهی الکتریکی ( $Fm^{-1}$ ) |
| $\alpha$      | زاویه حمله (deg)                   |
| $\rho_c$      | چگالی بار الکتریکی ( $Cm^{-3}$ )   |
| $\mu$         | لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ ) |

#### زیر نویس‌ها

|     |                      |
|-----|----------------------|
| $i$ | مقدار در سطح ایرفویل |
| $0$ | مقدار در جریان آزاد  |

#### ۸- مراجع

- [1] L. Zhao, K. Adamiak, Numerical simulation of the electrohydrodynamic flow in a single wire-plate electrostatic precipitator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 44, pp. 683-691, 2008.
- [2] Y. Tada, A. Takimoto, D. Ueda, Y. Hayashi, Heat Transfer Enhancement a Convective Field with Corona Discharge, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B*, pp. 217-228, 1991.
- [3] K. T. Hyun, C. H. Chun, The wake flow control behind a circular cylinder using ion wind, *Experiments in Fluids*, Vol. 35, pp. 541-552, 2003.
- [4] L. Leger, E. Moreau, G. Artana, G. Touchard, Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined fat plate, *Journal of Electrostatics*, Vol. 51-52, pp. 300-306, 2001.
- [5] S. Roberto, A. Guillermo, Steady control of laminar separation over airfoils with plasma sheet actuators, *Electrostatics*, Vol. 64, pp. 604-610, 2006.
- [6] E. Esmailzadeh, M. Aghazadeh, Numerical investigation of flow around circular cylinder affected by an electrohydrodynamic flush mounted wire-plate actuator, *Journal of Faculty of Eng.*, Vol. 32, No. 2, 2006. (in persian)
- [7] Gh. Tathiri, E. Esmailzadeh, The effect of EHD phenomenon on the control of sheet boundary layer over a cylinder using two electrode wires and two attached tape electrodes to the surface of the cylinder, *International Journal of Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 51-60, 2008. (in persian)
- [8] A. Salmasi, A. Shadaram, M. Mirzaei, A. Sh. Taleghani, Numerical and experimental investigation on the effect of a plasma actuator on NLF0414 airfoil's efficiency after the stall, *Modares Mechanical Engineerin*, Vol. 12, No. 6, pp. 104-116, 2013. (in persian)
- [9] H. M. Deylami, N. Amanifard, F. Dolati, R. Kouhikamali, K. Mostajiri, Numerical investigation of using various electrode arrangements for amplifying the EHD enhanced heat transfer in a smooth channel, *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, pp. 656-665, 2013.
- [10] FLUENT 6.3 user's guide, Fluent Inc., Lebanon, NH, (2006).

جدول ۴ ارزیابی عملکرد پدیده EHD ( $\alpha=15^\circ$ )

| مکان الکتروود (m) | $V=15(kV)$   | $V=20(kV)$   |
|-------------------|--------------|--------------|
| $X=0/01$          | $\eta=-4/69$ | $\eta=-0/36$ |
| $X=0/03$          | $\eta=1/56$  | $\eta=0/81$  |
| $X=0/06$          | $\eta=2/29$  | $\eta=1/55$  |
| $X=0/09$          | $\eta=3/17$  | $\eta=2/83$  |

جدول ۵ ارزیابی عملکرد پدیده EHD ( $\alpha=18^\circ$ )

| مکان الکتروود (m) | $V=15(kV)$  | $V=20(kV)$  |
|-------------------|-------------|-------------|
| $X=0/01$          | $\eta=0/03$ | $\eta=0/07$ |
| $X=0/03$          | $\eta=0/14$ | $\eta=0/65$ |
| $X=0/06$          | $\eta=0/17$ | $\eta=1/29$ |
| $X=0/09$          | $\eta=0/3$  | $\eta=2$    |

$$\eta = \frac{1 - (C_{D,EHD} / C_{D,NoEHD})}{P_{Lost}} \quad (12)$$

در این رابطه  $P_{Lost}$ ، توان مصرفی جهت ایجاد جریان کرونا می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{Lost} = V_{HV} I_e \quad (13)$$

در این رابطه  $V_{HV}$  و  $I_e$  به ترتیب ولتاژ اعمالی به الکتروود تزریق‌کننده و جریان الکتریکی عبوری از الکتروود جمع‌کننده می‌باشند.

همان‌گونه که از نتایج مشخص است، مادامی که زاویه حمله برابر  $\alpha=15^\circ$  است، با کاهش فاصله الکتروود تزریق‌کننده از لبه حمله و افزایش ولتاژ اعمالی معیار ارزیابی عملکرد پدیده EHD کاهش می‌یابد و نشان دهنده این مطلب است که نسبت کاهش ضریب بازدارندگی به توان مصرفی این روش کنترل جریان فعال به شدت به مکان قرارگیری الکتروود تزریق‌کننده وابسته است. به عبارتی دیگر مقدار توان مصرفی برای کنترل جریان نسبت به کاهش نسبی ضریب بازدارندگی افزایش داشته و در یک مکان مشخص از الکتروود تزریق‌کننده، راندمان این پدیده کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه حمله و مادامی که زاویه حمله برابر  $\alpha=18^\circ$  است، بر خلاف زاویه حمله  $15^\circ$  درجه با افزایش ولتاژ اعمالی ضریب عملکرد افزایش می‌یابد.

#### ۶-۴- جمع بندی

در تحقیق حاضر مشخصه‌های جریان حول بالواره نامتقارن NACA 4412 تحت تاثیر محرک الکتروهیدرودینامیکی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی تاثیر روش EHD بر میدان جریان و یافتن مکان مناسب الکتروود تزریق‌کننده به منظور بازدارندگی می‌باشد. همچنین تاثیر پارامترهای موثر از قبیل ولتاژ اعمالی و زاویه حمله جریان بررسی شده است. نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

- زمانی که الکتروود تزریق‌کننده به لبه حمله بالواره نزدیک می‌شود از تاثیر محرک الکتروهیدرودینامیک کاسته می‌شود و اگر مکان الکتروود در  $X \leq 0/1m$  باشد ضریب بازدارندگی برای زاویه حمله  $15^\circ$  درجه افزایش می‌یابد.
- با افزایش ولتاژ اعمالی، الگوی جریان به صورت چشمگیری متاثر از اعمال میدان الکتریکی می‌شود و در نتیجه تاثیر آن بر ضریب فشار و ضریب بازدارندگی افزایش می‌یابد.
- زمانی که الکتروود تزریق‌کننده در نزدیکی محل جدایش قرار گیرد، ضریب بازدارندگی کاهش و بنابراین کارایی محرک EHD بیشتر می‌شود.
- با افزایش زاویه حمله در ولتاژ اعمالی ثابت و در مکان مشخص قرارگیری