



## بررسی عددی تاثیر محرک الکتروهیدرودینامیک بر میدان جریان و دما بر روی پله پسرو

کامران مستجیری عبید<sup>1</sup>، نیما امانی‌فرد<sup>2\*</sup>، حامد محدث دیلمی<sup>3</sup>

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رودسر

\* رشت، صندوق پستی 3756، namanif@guilan.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 دی 1393

پذیرش: 08 بهمن 1393

ارائه در سایت: 15 بهمن 1393

کلید واژگان:

انتقال حرارت جابجایی اجباری

پله پسرو

الکتروهیدرودینامیک

بررسی عددی

در مقاله حاضر، میدان جریان و دما بر روی یک پله پسرو تحت تاثیر محرک الکتروهیدرودینامیکی در شرایط دو بعدی، آشفته، غیرقابل تراکم و پایدار به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته است. هوا به عنوان سیال عامل در فرآیند خنک‌کاری پله پسرو استفاده شده است. میدان الکتریکی به وسیله یک الکترود سیمی و با اعمال ولتاژ بالا جریان مستقیم ایجاد می‌شود. مدل‌سازی عددی با روش حجم محدود و بر اساس حل معادلات میدان الکتریکی، جریان و انرژی می‌باشد. در ابتدا نتایج عددی با نتایج تجربی برای یک کانال مسطح مقایسه شده که از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشد. سپس تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل شعاع الکترود تزریق‌کننده، ولتاژ اعمالی، عدد رینولتز جریان و مکان قرارگیری الکترود تزریق‌کننده بر ضریب انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در شعاع الکترود تزریق‌کننده کوچک‌تر، رینولت‌های پایین‌تر و ولتاژهای بالاتر اعمال میدان الکتریکی تاثیر به‌سزایی در افزایش انتقال حرارت دارد. علاوه بر این کاهش زاویه قرارگیری الکترود تزریق‌کننده به طور چشمگیری باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. در عین حال می‌توان دریافت که بین زوایای مختلف قرارگیری محل الکترود تزریق‌کننده یک روند یافتن مکان بهینه قابل مشاهده است.

## Numerical investigation of flow and temperature field on the backward-facing step affected by Electrohydrodynamic actuator

Kamran Mostajiri Abid<sup>1</sup>, Nima Amanifard<sup>2\*</sup>, Hamed Mohaddes Deylami<sup>3</sup>

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

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

3- Faculty of Technology and Engineering, East of Guilan, University of Guilan, Rudsar, Iran

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

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 24 December 2014  
Accepted 28 January 2015  
Available Online 04 February 2015

## Keywords:

Forced Convection Heat Transfer  
Backward-Facing Step  
Electrohydrodynamic  
Numerical Investigation

## ABSTRACT

In this paper, the flow and temperature fields affected by electrohydrodynamic actuator are numerically investigated for the incompressible, turbulent, and steady flow over a backward-facing step. Air is used as working fluid in heated backward-facing step cooling process. The electric field is generated by the wire electrode charged with DC high voltage. The numerical modeling is based for solving electric, flow, and energy equations with finite volume approach. The computed results are firstly compared with the experimental data in case of rectangular flat channel and the results agree very well. Then the effect of different parameters such as the radius of the wire, applied voltage, Reynolds number, and the wire position on the heat transfer coefficient is evaluated. The results show that the heat transfer coefficient with the presence of electric field increases with the applied voltage but decreases when the Reynolds number and the radius of the wire are augmented. Moreover, reduction of emitting electrode angle can significantly effect on the heat transfer enhancement. In consequence, one may able to find an optimum place for the emitting electrode position.

## 1- مقدمه

بیشینه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین به دلیل وجود ناحیه کمینه تنش برشی و بیشینه نرخ انتقال حرارت در نزدیکی جریان برگشتی و وجود نقطه‌ای در گوشه پله پسرو که در آن کمینه نرخ انتقال حرارت رخ می‌دهد، این هندسه همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است.

در سال 2002، نای و آرملی [1] اثرات ارتفاع پله را روی ضریب انتقال حرارت و توزیع سرعت در کانالهای سه بعدی با پله قائم، به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که با افزایش ارتفاع پله، مقدار ناسلت

جدایی جریان و ایجاد جریان برگشتی به دلیل تغییرات ناگهانی در هندسه کانال در بسیاری از کاربردهای مهندسی رخ می‌دهد. یکی از معروف‌ترین مدل‌ها به منظور بررسی جریان و انتقال حرارت تحت شرایط مختلف، مدل پله پسرو<sup>1</sup> می‌باشد. مطالعه جریان جابجایی اجباری و انتقال حرارت بر روی پله پسرو به دلیل ایجاد مناطق بازگردشی و تشکیل مناطق با انرژی کمینه و

1- Backward-facing step

Please cite this article using:

K. Mostajiri Abid, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, Numerical investigation of flow and temperature field on the backward-facing step affected by Electrohydrodynamic actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 231-238, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

K. Mostajiri Abid, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, Numerical investigation of flow and temperature field on the backward-facing step affected by Electrohydrodynamic actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 231-238, 2015 (In Persian)

افزایش می‌یابد و کمینه مقدار ناسلت در گوشه پایینی پله رخ می‌دهد. در سال 2003، آرملی و همکاران [2] به صورت تجربی مشخصه‌های جریان سه بعدی در داخل یک کانال با پله قائم را به ازای رینولدزهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از آن است که در عدد رینولدز کوچکتر از  $98/5$  هیچ ناحیه چرخشی در مجاورت دیواره وجود ندارد. همچنین آنها نشان دادند که در حوالی عدد رینولدز 190، در ناحیه کوچکی در گوشه بالایی دیواره جانبی، گردابه آشکار می‌شود که این ناحیه به لحاظ اندازه، با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. ارتورک [3] در سال 2008، توزیع سرعت در داخل کانال‌های دوبعدی را به ازای رینولدزهای بسیار بالا و به صورت عددی بررسی نمود و نشان داد که اندازه منطقه بازگردشی تقریباً به صورت خطی با عدد رینولدز تغییر می‌کند. در سال 2008 ابو نادا [4] به صورت عددی تولید آنتروپی در کانال‌های دو بعدی با پله پسرود را مورد بررسی قرار داد. وی در این کار تاثیر دمش و مکش را بر روی ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و تولید آنتروپی بررسی نمود و نشان داد که دمش باعث افزایش تولید آنتروپی و مکش باعث کاهش تولید آنتروپی می‌شود.

همان‌گونه که اشاره شد در انبساط ناگهانی به دلیل تشکیل نقطه‌ای که کمینه انتقال حرارت در آن رخ می‌دهد [2]، ضریب عملکرد حرارتی کاهش می‌یابد. برای از بین بردن این نقاط کمینه و افزایش انتقال حرارت روش‌های مختلفی وجود دارد. شانزده روش مختلف برای افزایش انتقال حرارت جابجایی توسط برگرز و همکاران [5-7] در سال‌های 1983، 1991 و 1995 معرفی شده‌اند که می‌توانند در دو گروه عمده روش‌های غیرفعال و فعال طبقه‌بندی شوند. وجه تمایز اولیه روش‌های مختلف افزایش انتقال حرارت جابجایی این است که بر خلاف روش‌های فعال، روش‌های غیرفعال به اعمال توان خارجی نیازی ندارند. همچنین اساس روش‌های غیرفعال بر ایجاد تغییر یا جاسازی ابزارهای اضافی در هندسه سطوح و یا افزودن موادی به سیال می‌باشد. به جز سطوح گسترش یافته که سطح انتقال حرارت موثر را افزایش می‌دهند، بقیه روش‌های غیرفعال در اثر آشفته کردن یا تغییر رفتار جریان، ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهند که این امر با افزایش افت فشار نیز همراه می‌باشد. در روش‌های فعال، اعمال نیروهای خارجی بر سیال موجب تغییر میدان جریان سیال و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود.

یکی از روش‌های فعال جهت افزایش انتقال حرارت، 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 دی الکتریک اطراف الکتروود ولتاژ بالا و حرکت این یون‌ها به سمت الکتروود ولتاژ پایین، جریان ثانویه‌ای در سیال تولید می‌شود که به این پدیده الکترو هیدرودینامیک (EHD) می‌گویند. در این پدیده با انتقال مومنتم به جریان اولیه درون کانال و برهم زدن الگوی آن توسط گردابه‌های ایجاد شده، لایه مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی تحت تاثیر قرار می‌گیرند و این امر باعث افزایش انتقال حرارت در کانال‌ها می‌شود. اخیراً انتقال حرارت اجباری در کانال‌ها تحت تاثیر باد کرونا به دلیل کاربرد این پدیده در زمینه افزایش انتقال حرارت به یکی از بحث‌های مورد علاقه تبدیل شده است. روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت در کانال‌ها وجود دارد، اما پدیده الکترو هیدرودینامیک به دلیل نداشتن ارتعاش و سر و صدا، مصرف کم و کنترل سریع جهت جریان از روش‌های پرکاربرد به‌شمار می‌رود. بررسی مشخصه‌های EHD و تاثیر آن بر میدان جریان و آهنگ انتقال حرارت جابجایی در جریان‌های اجباری هوا مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. اوحدی و همکاران [8] به بررسی

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

نیروی حجمی اعمال شده توسط میدان الکتریکی بر میدان جریان به صورت رابطه (1) بیان می‌شود [12]:

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

در رابطه‌ی (1)  $\bar{E}$ ،  $\rho_c$ ،  $\varepsilon$  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 صرف‌نظر می‌شود. بنابراین تنها مولفه موثر در این پدیده، مولفه نیروی کولمب ( $\rho_c \bar{E}$ ) خواهد بود که از حل همزمان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی تعیین می‌شود [12].

معادلات پواسون و بقای جریان الکتریکی به عنوان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی، به صورت روابط (2) و (3) تعریف می‌شوند [12]:

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

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

که در این رابطه،  $J$  چگالی جریان الکتریکی به صورت رابطه (4) می‌باشد:

$$J = \rho_c \beta \bar{E} + \rho_c \bar{u} + \sigma \bar{E} - D_e \nabla \rho_c \quad (4)$$

در این رابطه  $\beta$ ،  $\sigma$  و  $D_e$  به ترتیب یون‌پذیری هوا، ضریب قابلیت الکتریکی و ضریب پخش بار الکتریکی می‌باشند. چهار عبارت سمت راست معادله (4) به ترتیب تحرک یونی، جابجایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی نامیده می‌شوند. به دلیل اینکه بزرگی تحرک یونی در پدیده EHD نسبت به جابجایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی از مرتبه بالاتری برخوردار است، از عبارات‌های جابجایی، هدایت الکتریکی و پخش بار الکتریکی صرف‌نظر می‌شود.

با در نظر گرفتن رابطه بین پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی ( $E = -\nabla V$ ) و همچنین جاگذاری معادله (4) در معادله (3) معادله (5) حاصل می‌شود:

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

به این ترتیب معادلات (2) و (5) 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 فلوئنت<sup>2</sup> که بر پایه برنامه به زبان C می‌باشد، استفاده شده است. شایان ذکر است، پس از محاسبه نیروی الکتریکی، این نیرو به معادلات مومنتم اضافه می‌شود.

### 4- روش حل عددی

جهت مدلسازی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای k-ε استاندارد بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده ناوبر-استوکس به کار رفته و لذا دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم و معادلات انتقال k و ε برای جریان تحت شرایط دوبعدی،

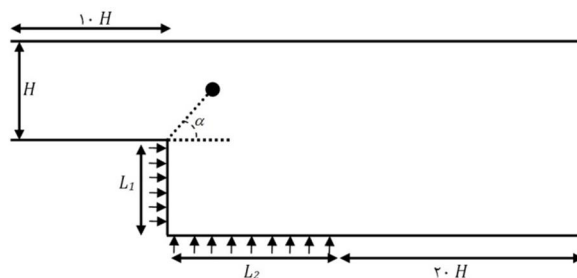
تعداد الکتروود تزریق‌کننده و نحوه آرایش الکتروود تزریق‌کننده را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که قدرت گردابه‌های ایجاد شده و در نتیجه افزایش انتقال حرارت وابسته به تعداد و آرایش الکتروودها می‌باشد.

در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی تاثیر شعاع الکتروود تزریق‌کننده، عدد رینولدز و ولتاژهای اعمالی مختلف بر میدان جریان و ضریب انتقال حرارت روی یک پله پسر که در یک کانال تعبیه شده، پرداخته شده و سپس تاثیر مکان قرارگیری الکتروود تزریق‌کننده بر ضریب انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است.

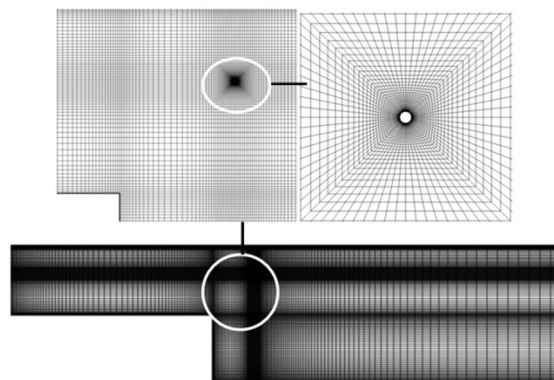
### 2- هندسه مسأله و شبکه محاسباتی

نمای شماتیک از هندسه دو بعدی و دامنه محاسباتی مدل مورد نظر در شکل 1 نمایش داده شده است. به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان در خروجی کانال و برای اینکه جریان در ورودی کانال تحت تاثیر انبساط ناگهانی قرار نگیرد، طول خروجی و طول ورودی به ترتیب 20 و 10 برابر ارتفاع ورودی کانال در نظر گرفته شده است. همچنین ارتفاع کانال 5 سانتی‌متر، شعاع الکتروود تزریق‌کننده 0/2 میلی‌متر می‌باشد. ناحیه  $L_1$  به طول 0/05 m و  $L_2$  به طول 0/1 m تحت شار حرارتی یکنواخت در نظر گرفته شده است. زاویه  $\alpha$  نیز به عنوان پارامتری جهت تعیین مکان قرارگیری الکتروود تزریق‌کننده می‌باشد.

طراحی مدل هندسی و تولید شبکه محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار گمبیت<sup>1</sup> انجام گرفته و شبکه به صورت سازمان یافته، غیریکنواخت و چهار وجهی می‌باشد. همچنین به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک دیواره، الکتروود تزریق‌کننده و لبه پله که گرادیان‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری استفاده شده است. در شکل 2 نمایی از شبکه محاسباتی نشان داده شده است.



شکل 1 هندسه و دامنه محاسباتی مدل



شکل 2 شبکه محاسباتی

جدول 1 شرایط مرزی پتانسیل و چگالی بار الکتریکی

مرز	چگالی بار الکتریکی	پتانسیل الکتریکی	جریان
ورودی جریان	$\partial \rho_c / \partial x = 0$	$\partial V / \partial x = 0$	$u = U_0 = cte$
خروجی جریان	$\partial \rho_c / \partial x = 0$	$\partial V / \partial x = 0$	$\partial p / \partial x = 0$
الکتروود تزریق کننده	قانون پیک	$V = V_0$	$u = v = 0$
دیواره متصل به زمین	$\partial \rho_c / \partial n = 0$	$V = 0$	$u = v = 0$
دیواره بالا	$\partial \rho_c / \partial y = 0$	$\partial V / \partial y = 0$	$u = v = 0$

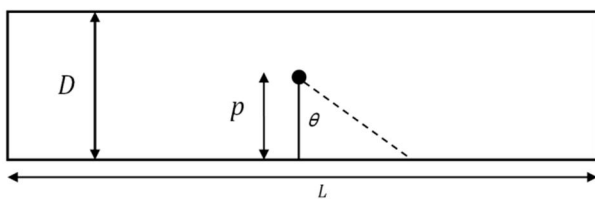
از آنجایی که شرایط مرزی برای یک مساله، با توجه به شرایط فیزیکی مطرح می‌شوند و تعداد شرایط مرزی نیز وابسته به نوع معادلات است، بنابراین تعیین شرایط مرزی برای بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده آسان نیست و با سعی و خطا قابل محاسبه است. بر این اساس از فرضیه کاپتزوف و قانون پیک به منظور تعیین بار الکتریکی استفاده شده است. فرضیه کاپتزوف بیان می‌دارد که بعد از آستانه تخلیه کرونا، میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ ثابت می‌ماند و مقدار میدان الکتریکی از رابطه تجربی مطابق رابطه (9) قابل محاسبه است [14]:

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

در این رابطه  $r$  شعاع الکتروود تزریق کننده بر حسب سانتی متر می‌باشد. قانون پیک در تحلیل عددی به طور غیرمستقیم در یافتن مقدار بار الکتریکی قابل استفاده است. در این روش بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده حدس زده می‌شود و سپس اندازه میدان الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده 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 محاسبه شده با مقدار به دست آمده از رابطه پیک تفاوت ناچیزی داشته باشد.

### 6- نتایج

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی صحت نتایج ارائه شده و اعتبارسنجی آنها، نتایج تحلیل عددی با نتایج تجربی اوسالا و زبوج [15] مقایسه شده است. آنها به صورت تجربی توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی بر روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. هندسه مورد مطالعه آنها به صورت شماتیک در شکل 4 نشان داده شده است. در تحقیق آنها طول کانال  $L = 0.16$  m، شعاع الکتروود تزریق کننده  $r = 0.2$  mm، ارتفاع کانال  $D = 0.1$  m و فاصله الکتروود تزریق کننده تا الکتروود جمع کننده (صفحه پایین متصل به زمین است)  $p = 0.05$  m در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه بین خط عمود بر صفحه پایینی از الکتروود تزریق کننده و خط وصل بین الکتروود تزریق کننده به مکانی از الکتروود جمع کننده می‌باشد.



شکل 4 نمایی از کانال دوبعدی با دو صفحه تخت و موازی [15]

تراکم ناپذیر، لزج، تک فاز و با در نظر گرفتن نیروی حجمی حاصل از اعمال میدان الکتریکی مطابق معادلات (6)، (7) و (8) می‌باشد [13]:

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

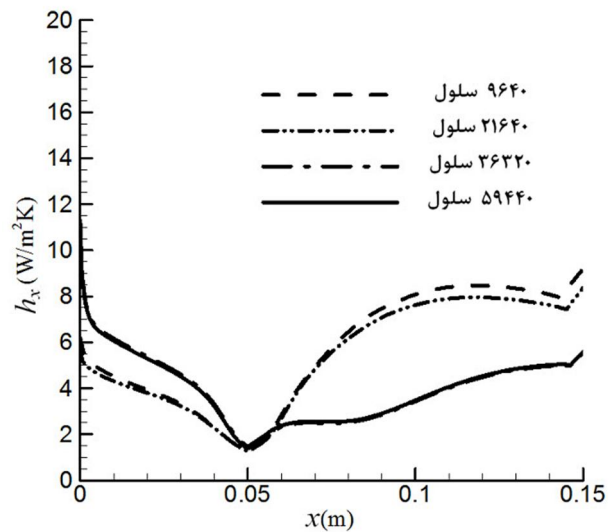
$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 u + f_e \quad (7)$$

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

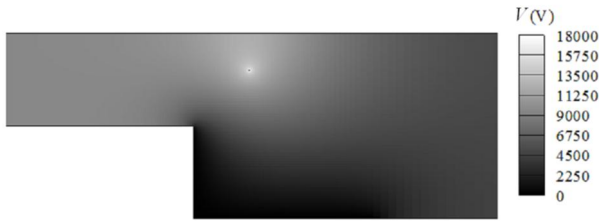
حل عددی معادلات (6) تا (8) با استفاده از کد فلونت، بر اساس حجم محدود و توسط حل کننده بر پایه فشار صورت گرفته و جهت گسسته سازی ترم فشار و سایر ترم‌های معادلات به ترتیب روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم و همچنین برای حل توأم میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. معادلات میدان الکتریکی به صورت ناپایا و معادلات سیال به صورت پایا حل شده‌اند. به منظور تشخیص همگرایی حل، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده  $10^{-8}$  می‌باشد. علاوه بر آن کاهش خالص شار جرمی به میزان کمتر از 0.2% شار کل و رصد کردن تغییرات کمیت‌های مهم جریان در نواحی حساس لحاظ شده‌اند. کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر Intel core i7 4 GHz به صورت پردازش موازی انجام شده و زمان محاسباتی حدود 4-6 ساعت برای هر حل بوده که متناسب با شرایط حل متغیر است. به منظور یافتن جواب‌های مستقل از شبکه محاسباتی، ضریب انتقال حرارت موضعی روی پله پسرو در تعداد شبکه‌های مختلف در شکل 3 نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، شبکه دارای 36320 سلول از دقت خوبی برای حل عددی برخوردار می‌باشد و با افزایش تعداد سلول‌ها تغییری در نتایج بوجود نمی‌آید. همچنین استقلال شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

### 5- خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی

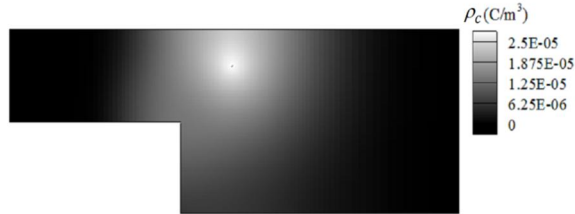
هوا به عنوان سیال عامل و به صورت تراکم ناپذیر با خواص ترموفیزیکی ثابت فرض شده است. جریان در ورودی کانال، با سرعت یکنواخت در نظر گرفته شده است. مرز خروجی دامنه محاسباتی دارای شرط مرزی فشار خروجی می‌باشد. همچنین شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها و سطح الکتروود تزریق کننده در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی نیز در کل دامنه محاسباتی در جدول 1 نشان داده شده است.



شکل 3 بررسی استقلال شبکه در  $\alpha = 45^\circ$ ،  $V = 18$  kV،  $Re = 770$



شکل 7 توزیع پتانسیل الکتریکی  $V=18\text{ kV}$  ,  $\alpha = 45^\circ$



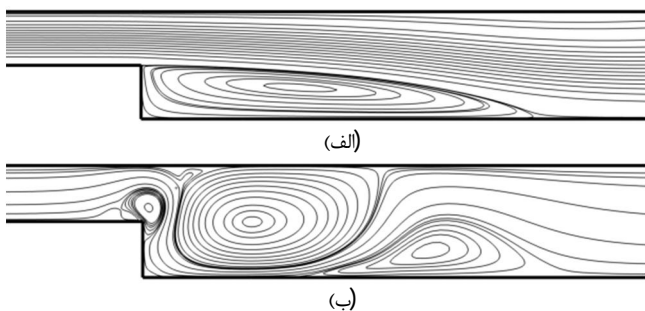
شکل 8 توزیع چگالی بار الکتریکی  $V=18\text{ kV}$  ,  $\alpha = 45^\circ$

**2-6- تاثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان**

به منظور بررسی تاثیر پدیده EHD بر میدان جریان، خطوط جریان در دو حالت در شکل 9 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 9(الف) به وضوح مشاهده می شود، بدون حضور میدان الکتریکی به دلیل جدایش جریان، گردابه ای نسبتاً حجیم در منطقه انبساط یافته تشکیل می شود. در شکل 9(ب) با اعمال میدان الکتریکی به الکتروود تزریق کننده، گردابه های ایجاد شده حاصل از جریان ثانویه باعث برهم زدن جریان در منطقه انبساط ناگهانی می شوند. البته به منظور تعیین تاثیر این پدیده بر انتقال حرارت نیاز به بررسی ضریب انتقال حرارت در دو حالت می باشد.

**3-6- تاثیر میدان الکتریکی بر میدان دما**

ایجاد یک میدان الکتریکی قوی در محیط سیال و در نتیجه برهم زدن الگوی جریان سیال، باعث تغییر در الگوی حرارتی نیز می شود. در شکل 10 خطوط هم دما بدون حضور میدان الکتریکی و در حضور میدان الکتریکی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، بدون حضور میدان الکتریکی، خطوط دما تقریباً به صورت منظم در اطراف پله ایجاد شده اند ولی در حضور میدان الکتریکی این خطوط دما به دلیل بهم ریختگی جریان اطراف پله تحت تاثیر قرار گرفته است و سیال با دمای پایین به سمت صفحه تحت شار حرارتی منحرف شده است.



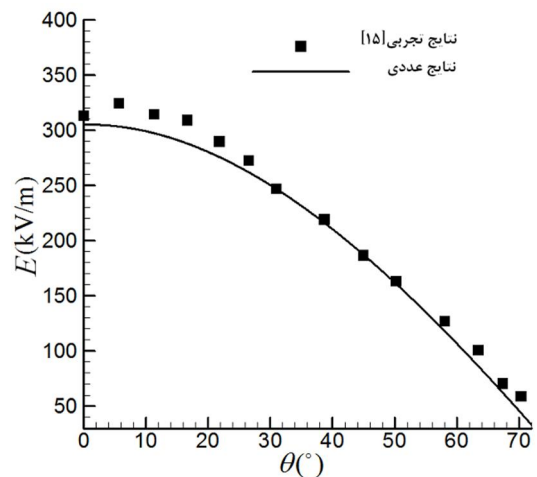
شکل 9 خطوط جریان روی یک پله پسرو ( $\alpha = 45^\circ$  ,  $Re=530$ )

(الف)  $V=0\text{ kV}$  (ب)  $V=18\text{ kV}$

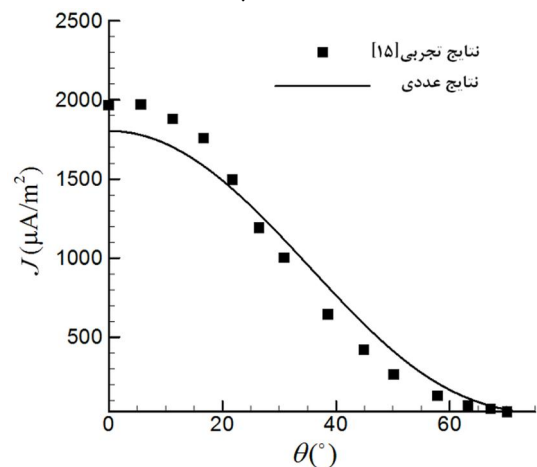
برای اعتبارسنجی داده های پارامترهای الکتریکی، نتایج عددی چگالی جریان الکتریکی و میدان الکتریکی در صفحه متصل به زمین، با داده های تجربی در شکل های 5 و 6 مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر تطابق مطلوبی با نتایج تجربی دارد.

**1-6- نتایج تحلیل میدان الکتریکی**

به منظور بررسی میدان الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ بالای الکتریکی به الکتروود تزریق کننده، توزیع پتانسیل و چگالی بار الکتریکی در شکل های 7 و 8 نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکتروود تزریق کننده دارای مقدار بیشینه می باشد و با نزدیک شدن به سطح الکتروود جمع کننده از مقدار آن کاسته می شود. از طرفی دیگر مقدار چگالی بار الکتریکی نیز بر روی الکتروود تزریق کننده برابر  $0/000025\text{ C/m}^3$  می باشد و با فاصله گرفتن از سطح الکتروود تزریق کننده، چگالی بار الکتریکی کاهش می یابد. بنابراین، نیروی کولمب حاصل از اعمال میدان الکتریکی در مجاورت الکتروود تزریق کننده بیشتر است و انتظار می رود جریان ثانویه تولیدی در اثر یونیزاسیون سیال دی الکتریک در زیر الکتروود تزریق کننده دارای قدرت بیشتری باشد. در نتیجه مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده و ولتاژ اعمالی آن می تواند در ایجاد گردابه و افزایش ضریب انتقال حرارت نقش مهمی را ایفا نماید.



شکل 5 مقایسه توزیع میدان الکتریکی حاصل از تحلیل عددی و نتایج تجربی (kV)  $(V = 18)$



شکل 6 مقایسه توزیع چگالی جریان الکتریکی حاصل از تحلیل عددی و نتایج تجربی  $(V = 18\text{ kV})$

جدول 2 ضریب انتقال حرارت متوسط در شعاع‌های مختلف

$$(\alpha = 45^\circ, V=18 \text{ kV}, Re = 770)$$

$r=0/35 \text{ mm}$	$r=0/275 \text{ mm}$	$r=0/2 \text{ mm}$	$\bar{h}$
1/53	3/06	3/48	

ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش می‌یابد. این نتیجه به دلیل آن است که با کاهش شعاع الکتروود تزریق‌کننده در ولتاژ ثابت، بار الکتریکی الکتروود تزریق‌کننده و در نتیجه نیروی کولمب ایجاد شده نسبت به شعاع‌های بزرگتر افزایش می‌یابد. بنابراین در شعاع‌های کوچکتر پدیده الکترو هیدرودینامیک به طور موثرتری بر انتقال حرارت تاثیر می‌گذارد.

برای ارزیابی تاثیر پدیده الکترو هیدرودینامیک بر انتقال حرارت از سطح، ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط به ترتیب مطابق روابط (10) و (11) محاسبه می‌شوند:

$$h_x = \frac{q''}{T_s - T_0} \quad (10)$$

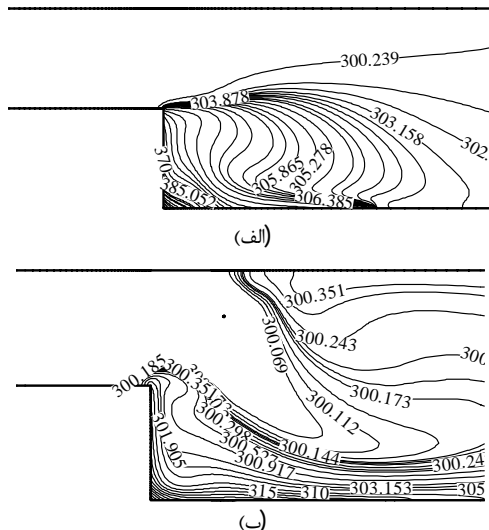
$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (11)$$

#### 5-6- تاثیر عدد رینولدز

یکی دیگر از پارامترهای موثر بر پدیده الکترو هیدرودینامیک در جریان‌های جابجایی اجباری، عدد رینولدز جریان می‌باشد. شکل 12 جریان ثانویه تولید شده روی یک پله پسرو تحت تاثیر ولتاژ 18 kV را در رینولدزهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص شده است، در رینولدزهای پایین‌تر یعنی مادامی که مومنتم جریان ورودی کمتر است، تاثیر ولتاژ اعمالی بر سیال و انحراف آن بیشتر می‌باشد. به عبارتی دیگر، انحراف سیال در رینولدزهای پایین‌تر به سمت صفحه متصل به زمین باعث تولید گردابه‌های قوی‌تر و حجیم‌تر در زیر الکتروود تزریق‌کننده می‌شود. در نتیجه به نظر می‌رسد که پدیده الکترو هیدرودینامیک در شرایطی که مومنتم جریان ورودی کمتر باشد موثرتر واقع می‌شود و با افزایش مومنتم از قدرت و حجم گردابه تولید شده کاسته می‌شود. همچنین در رینولدزهای پایین گردابه‌های کوچک در نقطه جدایش و گردابه‌های بزرگ در منطقه انبساط یافته شکل می‌گیرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ایجاد گردابه کوچک در نقطه جدایش باعث تقویت گردابه بزرگ می‌شود. همچنین گردابه کوچک به دلیل داشتن قدرت لازم در تخریب لایه مرزی حرارتی، نقش موثری در کاهش دمای دیواره ایفا می‌کند.

#### 6-6- تاثیر میدان الکتریکی بر ضریب انتقال حرارت

در شکل 13 ضریب انتقال حرارت موضعی در منطقه تحت شار حرارتی ثابت، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بدون اعمال میدان الکتریکی از لبه پله ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد و تا گوشه پله این روند ادامه دارد. اما پس از این نقطه به دلیل تشکیل منطقه بازگردشی و چرخش سیال، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. بنابراین کمینه ضریب انتقال حرارت در گوشه (شروع انبساط ناگهانی) پله رخ داده است. این کمینه ضریب انتقال حرارت به دلیل ایجاد منطقه گردابه‌های سرعت پایین ایجاد می‌شود. با اعمال میدان الکتریکی نیروی خارجی به جریان سیال وارد شده، در نتیجه الگوی جریان تغییر و ضریب انتقال حرارت به شدت تحت تاثیر باد کرونا قرار گرفته و افزایش می‌یابد. شایان ذکر است علاوه بر برهم‌زدن الگوی

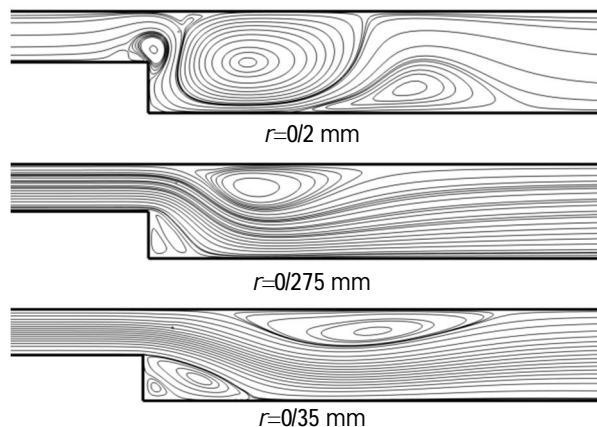


شکل 10 خطوط هم دما ( $\alpha = 45^\circ$ )  
الف)  $V=0 \text{ kV}$  ب)  $V=18 \text{ kV}$

#### 4-6- تاثیر شعاع الکتروود تزریق‌کننده بر جریان سیال و ضریب انتقال حرارت

عوامل متعددی می‌تواند بر جریان ثانویه ایجاد شده توسط اعمال ولتاژ به سیال موثر باشد. بنابراین بررسی تاثیر این عوامل از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. یکی از عوامل تاثیرگذار شعاع الکتروود تزریق‌کننده می‌باشد. در شکل 11 تاثیر شعاع الکتروود تزریق‌کننده بر جریان سیال نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع الکتروود تزریق‌کننده و به دلیل کاهش تعداد یون‌های ایجاد شده در سیال، از قدرت جریان ثانویه کاسته می‌شود.

با توجه به اینکه شعاع الکتروود تزریق‌کننده پارامتر موثری بر نحوه شکل‌گیری جریان ثانویه می‌باشد، لازم است تاثیر آن بر انتقال حرارت نیز بررسی شود. همان‌گونه که ذکر شده است در شعاع‌های کوچکتر، سیال داخل کانال بیشتر تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرد و بنابراین انتظار می‌رود که انتقال حرارت نیز بیشتر شود. در جدول 2 ضریب انتقال حرارت متوسط ناحیه تحت شار حرارتی در شعاع‌های مختلف الکتروود تزریق‌کننده گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش شعاع الکتروود تزریق‌کننده،

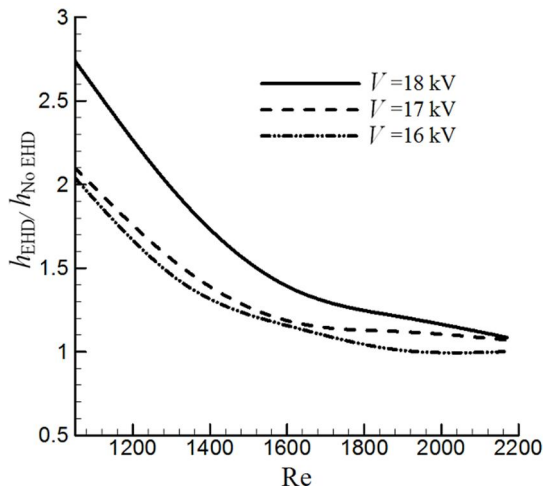


شکل 11 خطوط جریان در شعاع‌های مختلف الکتروود تزریق‌کننده  
( $\alpha = 45^\circ, V = 18 \text{ kV}, Re = 530$ )

محیط افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی بار الکتریکی، مقدار نیروی الکتریکی افزایش می‌یابد. این افزایش نیروی الکتریکی منجر به برهم زدن بیشتر جریان سیال و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در شکل 14 تاثیر ولتاژ الکتریکی بر ضریب انتقالی حرارت در رینولدزهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، با افزایش عدد رینولدز به نظر می‌رسد که جریان ثانویه کرونا از قدرت لازم برای انحراف جریان سیال برخوردار نمی‌باشد و توانایی مقابله با مومنتم جریان ورودی را ندارد و در نتیجه تولید گردابه‌های ضعیف‌تر، منجر به کاهش انتقال حرارت در رینولدزهای کمتر می‌شود. بنابراین با افزایش رینولدز جریان ورودی باید از ولتاژ الکتریکی بالاتری استفاده شود تا ضریب انتقال حرارت افزایش یابد.

### 7- تاثیر مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده بر ضریب انتقال حرارت

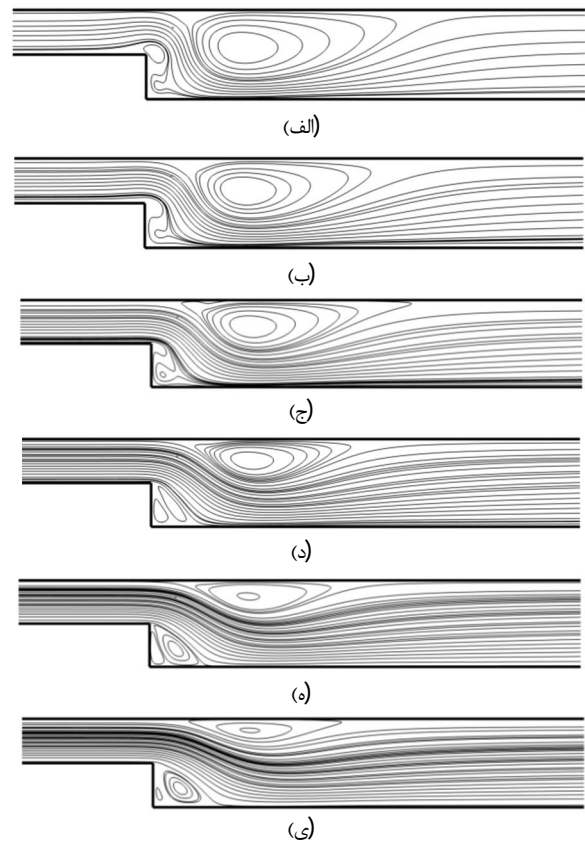
در قسمت‌های قبلی تاثیر پارامترهایی همچون شعاع الکتروود تزریق کننده، عدد رینولدز جریان و ولتاژ اعمالی مورد مطالعه قرار گرفته است. اما به منظور بررسی تاثیر مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده بر ضریب انتقال حرارت روی پله مورد نظر، ضریب انتقال حرارت موضعی در مکان‌های مختلف در ولتاژ ثابت 18 kV و رینولدز 770 در شکل 15 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب انتقال حرارت به مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده وابسته است و با کاهش زاویه مورد نظر میزان ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به منظور ارزیابی بیشتر، ضریب انتقال حرارت متوسط در ناحیه تحت شرایط حرارتی در جدول 3 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش زاویه مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده، ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش می‌یابد. این نتیجه به دلیل آن است که با کاهش زاویه قرارگیری الکتروود تزریق کننده در ولتاژ و عدد رینولدز ثابت، میزان به هم ریختگی جریان سیال افزایش می‌یابد و در نتیجه لایه مرزی حرارتی بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد.



شکل 14 نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت در رینولدز و ولتاژهای متفاوت،  $\alpha = 45^\circ$

جدول 3 ضریب انتقال حرارت متوسط در حالت‌های مختلف (V=18 kV, Re=770)

$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 22.5^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\bar{h}$
3/48	4/93	6/32	

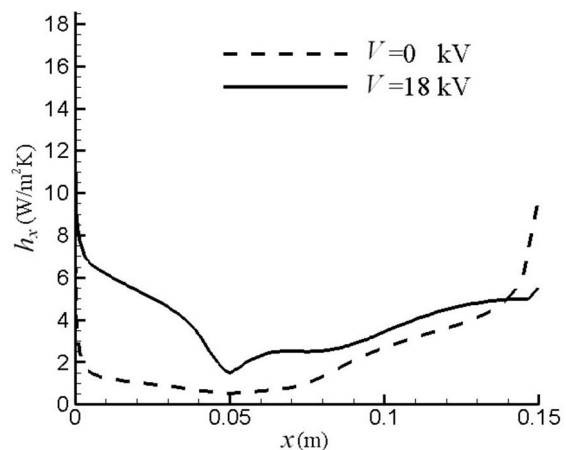


شکل 12 تاثیر عدد رینولدز بر جریان سیال  $V=18\text{ kV}$ ,  $\alpha = 45^\circ$  (الف)  $\text{Re}=770$  (ب)  $\text{Re}=1050$  (ج)  $\text{Re}=1330$  (د)  $\text{Re}=1610$  (ه)  $\text{Re}=1890$  (و)  $\text{Re}=2170$  (ز)

جریان توسط نیروی خارجی اعمالی، میدان الکتریکی باعث انحراف بیشتر سیال خنک جریان اصلی کانال به سمت دیواره گرم می‌شود که این امر تاثیر بسزایی در کاهش دمای دیواره‌ها دارد.

### 6-7- تاثیر ولتاژ اعمالی بر ضریب انتقال حرارت

ولتاژ الکتریکی اعمالی به سیال یکی دیگر از پارامترهای موثر در پدیده الکترو هیدرودینامیک می‌باشد. زیرا با تغییر در ولتاژ الکتریکی، چگالی بار الکتریکی در محیط تغییر می‌یابد. بنابراین با افزایش ولتاژ الکتریکی، مولکول‌های بیشتری از هوا یونیزه شده و در نتیجه چگالی بار الکتریکی در



شکل 13 ضریب انتقال حرارت موضعی ( $\alpha = 45^\circ$ ,  $\text{Re}=770$ )

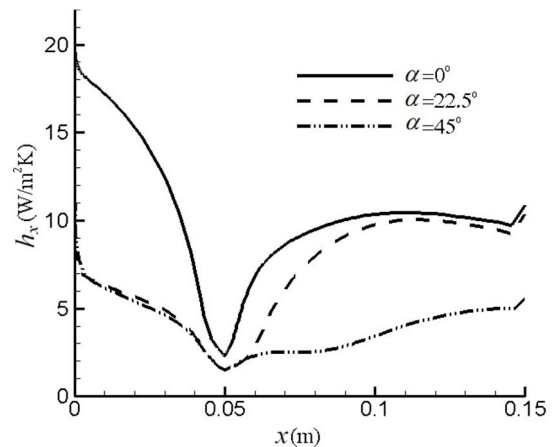
$J$	چگالی جریان الکتریکی ( $A\cdot m^{-2}$ )
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی ( $m^2\cdot s^{-2}$ )
$n$	متغیر عمود بر سطح
$q$	شار حرارتی ( $W\cdot m^{-2}$ )
$r$	شعاع الکتروود تزریق کننده (cm)
Re	عدد رینولدز
$T$	دما (K)
$V$	ولتاژ (V)
علایم یونانی	
$\beta$	یون پذیری ( $m^2\cdot v^{-1}\cdot s^{-1}$ )
$\varepsilon$	ضریب گذردهی الکتریکی ( $F\cdot m^{-1}$ )
$\rho_c$	چگالی بار الکتریکی ( $C\cdot m^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$ )

زیر نویس ها

$S$	سطح
$O$	مرجع

10- مراجع

- Nie, J.H., Armaly, B.F., Three-dimensional convective flow adjacent to backward-facing step-effects of step height, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2431-2438, 2002.
- Armaly, B.F., Li, A., and Nie, J.H., Measurements in three-dimensional laminar separated flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 9, pp. 3573-3582, 2003.
- Erturk, E., Numerical solutions of 2-D steady incompressible flow over a backward-facing step, *Computers & Fluids*, Vol. 35, pp. 633-655, 2008.
- Abu-Nada, E., Investigation of entropy generation over a backward facing step under bleeding conditions, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 3237-3242, 2008.
- Bergles, A. E., Nirmalan, V., Junkhan, J. H., and Webb, R. L., Bibliography of augmentation of convective heat and mass transfer, part 2, Report HTL-31, ISU-ERI-Ames-84221, *Heat Transfer Laboratory*, Iowa State University, Ames, IA, 1983.
- Bergles, A. E., Jensen, M. K., Somerscales, E. F. C., and Manglik, R. M., Literature review of heat transfer enhancement technology for heat exchanges in gas-fired applications, Report GRI 91-0146, *Gas Research Institute*, Chicago, 1991.
- Bergles, A. E., Jensen, M. K., and Shome, B., 1995, Bibliography on enhancement of convective heat and mass transfer, Report HTL-23, *Heat transfer laboratory*, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 1995.
- M. M. Ohadi, N. Sharaf, D. A. Nelson, Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer in a shell-and-tube heat exchanger, *Journal of Experimental Heat Transfer*, Vol. 4, No. 1, pp. 19-39, 1991.
- N. Kasayapanand, T. Kiatsiriroat, EHD enhanced heat transfer in wavy channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 809-821, 2005.
- S. A. O. Ahmedou, M. Havet, Analysis of the EHD enhancement of heat transfer in a flat duct, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 16, pp. 489-494, 2009.
- A. Alamgholilou, E. Esmailzadeh, Experimental investigation on hydrodynamics and heat transfer of fluid flow into channel for cooling of rectangular ribs by passive and EHD active enhancement methods, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, pp. 61-73, 2012.
- 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.
- FLUENT 6.3 user's guide, Fluent Inc., Lebanon, NH, (2006).
- S. S. Hoseininezhad, N. Amanifard, H. M. 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)
- N. Oussalah, Y. Zebboudj, Finite-element analysis of positive and negative corona discharge in wire-to-plane system, *The European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 34, pp. 215-223, 2006.



شکل 15 ضریب انتقال حرارت موضعی در حالت های مختلف ( $V=18\text{ kV}, Re=770$ )

8- جمع بندی

در تحقیق حاضر مشخصه های جریان و انتقال حرارت تحت تاثیر محرک الکترو هیدرودینامیکی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی تاثیر روش EHD بر میدان جریان و همچنین بررسی تاثیر پارامترهای مختلف آن بر ضریب انتقال حرارت می باشد. نتایج بدست آمده به صورت زیر می باشد:

- نتایج نشان می دهد که با کاهش شعاع الکتروود تزریق کننده، ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش می یابد. این نتیجه به دلیل آن است که با کاهش شعاع الکتروود تزریق کننده در ولتاژ ثابت، بار الکتریکی الکتروود تزریق کننده و در نتیجه نیروی کولمب ایجاد شده نسبت به شعاع های بزرگتر افزایش می یابد.
- با افزایش عدد رینولدز، جریان ثانویه کرونا از قدرت لازم برای انحراف جریان سیال برخوردار نمی باشد و توانایی مقابله با مومنتم جریان ورودی را ندارد و در نتیجه تولید گردابه های ضعیف تر منجر به کاهش انتقال حرارت نسبت به رینولدزهای کمتر می شود.
- اگر ولتاژ اعمالی بر الکتروود تزریق کننده افزایش یابد، جریان کرونای حاصل از آن نیز افزایش می یابد و در اثر جریان کرونای بیشتر، نیروی ایجاد شده از طرف میدان الکتریکی بر هوا بیشتر می شود. بنابراین نیرو ضمن برهم زدن بیشتر لایه مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می گردد.
- تغییر در مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده باعث تغییر در ضریب انتقال حرارت می شود. نتایج نشان می دهد که با کاهش زاویه قرارگیری میزان ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.

9- فهرست علائم

$D_h$	قطر هیدرولیکی (m)
$E$	میدان الکتریکی ( $V\cdot m^{-1}$ )
$f_e$	نیروی الکترو هیدرودینامیکی ( $V\cdot m^{-3}$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$ )
$H$	ارتفاع کانال (m)