



بررسی عددی تأثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و ضریب انتقال حرارت در یک کانال مسطح

علی رفیع¹، نیما امانی‌فرد^{2*}، حامد محدث دیلمی³، فرید دولتی⁴

1- کارشناس ارشد، 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

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 دی 1393

پذیرش: 15 فروردین 1394

ارائه در سایت: 29 فروردین 1394

کلید واژگان:

محرک پلاسما

انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری

کانال مسطح

تحلیل عددی

چکیده

یکی از راه‌های نوین تولید گردابه به روش فعال به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت، استفاده از محرک پلاسما است که به وسیله تزریق مومنتم به لایه مرزی باعث ایجاد اغتشاش در جریان و تولید گردابه می‌شود. در مقاله حاضر، مشخصه‌های میدان جریان و دما از قبیل تابع جریان و ضریب انتقال حرارت در یک کانال مسطح تحت شار حرارتی ثابت، بدون حضور و همچنین تحت تأثیر محرک پلاسما در شرایط دو بعدی، آشفتگی، تراکم ناپذیر و پایدار به روش حجم محدود به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی رینولدهای مختلف جریان ورودی در ولتاژهای متفاوت در نظر گرفته شده است و محرک پلاسما در وسط ناحیه تحت شار حرارتی قرار داده شده است و تأثیر آن بر تابع جریان و ضریب انتقال حرارت مشاهده شده است. در ابتدا نتایج عددی حاضر با نتایج عددی برای یک کانال مسطح مقایسه شده که از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهد که در یک رینولدز مشخص، با افزایش ولتاژ ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد، اما در یک ولتاژ ثابت با افزایش سرعت ورودی جریان، ضریب انتقال حرارت تا رینولدز 250 نرخ صعودی و پس از آن به دلیل کاهش اثر گردابه حاصل از پلاسما سیر نزولی دارد. همچنین سرعت جریان ورودی بر روی ابعاد گردابه تولید شده تأثیرگذار می‌باشد. طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان یک حالت بهینه بین ولتاژ اعمالی و رینولدز جریان ورودی یافت.

Numerical investigation of the plasma actuator effects on the flow field and heat transfer coefficient in a flat channel

Ali Rafi, Nima Amanifard*, Hamed Mohaddes Deylami, Farid Dolati

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

*P.O.B. 3756R asht, Iran, namanif@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 January 2015
Accepted 04 April 2015
Available Online 18 April 2015

Keywords:

Plasma Actuator
Forced Convection Heat Transfer
Flat Channel
Numerical Investigation

ABSTRACT

Plasma actuator is one of the newest ways in vortex generation and flow control techniques that can enhance heat transfer rate 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 plasma actuator on the incompressible, turbulent, steady flow in a flat channel. In this approach, the flow field and heat transfer characteristics such as the stream function and heat transfer coefficient were evaluated through a variety of Reynolds number, in the presence and absence of applied voltages. The present computed results are first compared with the numerical data in case of rectangular flat channel and the results agree very well. The numerical results indicate that at a constant Reynolds number with the presence of a plasma actuator, the heat transfer coefficient will be increased but in a constant applied voltage the heat transfer coefficient will increase to the Reynolds of 250 and then will decrease, respectively. In addition, the size of generated vortexes significantly depends on the applied voltage and the upstream flow speed. On the other hand, according to the results, the flow speed affects the size of generated vortex and the actuator effect disappears at high Reynolds. According to the results, an optimized point for the applied voltage and flow speed exists.

1- مقدمه

سیستم‌هایی است که این افزایش در آن سیستم‌ها مهم و مطلوب است. سازنده روش مختلف برای افزایش انتقال حرارت جابجایی توسط برگلز و همکاران [1-3] در سال‌های 1983، 1991 و 1995 معرفی شده‌اند که می‌توانند در دو گروه عمده روش‌های غیرفعال و فعال طبقه‌بندی شوند. وجه

امروزه با توجه به محدود بودن منابع مختلف انرژی و پایان‌پذیری آن‌ها، انواع روش‌های بهره‌وری در مصرف انرژی، مورد توجه محققان می‌باشد. یکی از راه‌های معقول بهینه‌سازی مصرف انرژی، افزایش آهنگ انتقال گرما در

Please cite this article using:

A. Rafi, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, F. Dolati, Numerical investigation of the plasma actuator effects on the flow field and heat transfer coefficient in a flat channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 23-30, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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. اما در روش‌های فعال، اعمال نیروهای خارجی بر سیال موجب تغییر میدان جریان سیال و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شوند. امروزه یکی از روش‌های افزایش انتقال گرما با استفاده از میدان‌های الکتریکی با ولتاژ بالا صورت می‌پذیرد، که اساس آن نیروهای الکتریکی به وجود آمده در اثر یونیزاسیون سیال دی‌الکتریک می‌باشد، که می‌تواند یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها برای این منظور در نظر گرفته شود.

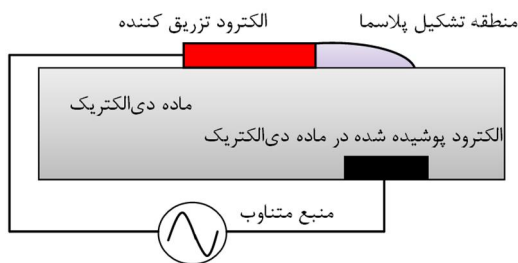
سلماسی و همکاران [4] اثر یک عملگر پلاسمایی بر کارایی ایرفویل NLF0414 در زوایای حمله پس از واماندگی را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. این بررسی نشان داد که حضور عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل و در نزدیکی شروع جدایش سبب جابه‌جا شدن نقطه جدایش در زاویه حمله 18 درجه می‌شود و همچنین این میزان تاخیر در شروع جدایش بر روی سطح ایرفویل سبب افزایش نسبت ضریب برا به ضریب پسا و یا در حقیقت بازده ایرفویل در این زاویه می‌شود.

شمس طالقانی و همکاران [5] تأثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی در مشخصه‌های جریان یونی القایی توسط عملگرهای پلاسمایی را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک موقعیت سرعت ماکزیمم به سطح نزدیکتر می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق بیان می‌کنند که عملگرهای پلاسمایی گردابه‌هایی در همان فرکانس تحریک ولتاژ اعمال شده تولید می‌کنند.

در مطالعه‌ای دیگر شمس طالقانی و همکاران [6] اثرات سیکل کاری عملگرهای پلاسمایی بر روی بهبود توزیع فشار حول ایرفویل NLF0414 را بررسی نمودند و دریافتند که عملگر پلاسمایی در تحریک‌های غیردائمی با فرکانس تحریک کم روی سیکل‌های کاری پایین، کارایی بهتری دارند. رایبند و روی [7] جریان رانده شده توسط محرک پلاسما در داخل یک کانال با طول محدود را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که محرک پلاسما به جریان نزدیک دیواره مومنتم تزریق کرده و با حرکت جریان به سمت پایین دست، این تزریق به سمت ارتفاع کانال نفوذ می‌کند. با وجود محرک پلاسما در داخل کانال سرعت ایجاد شده در خروجی کانال حدود 1-3 متر بر ثانیه می‌باشد که این سرعت با افزایش تعداد محرک پلاسما در ولتاژ ثابت، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که راندمان این نوع سیستم‌ها پایین و کمتر از 0/1 درصد بوده که برای پمپ کردن جریان‌های کوچک مناسب می‌باشد.

ابراهیم و اسکوت [8] با استفاده از یک مدل عددی به جریان رانده شده در داخل یک کانال تحت تأثیر محرک پلاسما را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در کانال‌های با ارتفاع 0/02 متر و 0/03 متر، سرعت بیشینه به درستی به دست آمده است. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در کانال‌های با ارتفاع زیاد، دو نقطه بیشینه سرعت به وسیله هر محرک پلاسما ایجاد شده که متمایل به سمت پایین دست جریان دارند.

وانگ و روی [9] با به کارگیری یک محرک پلاسما به شکل نعل اسبی¹، به بررسی اثرات آن بر بهبود کارایی خنک‌کاری لایه‌ای پرداختند. آن‌ها ابتدا به بررسی تأثیر نیروی الکتریکی حاصل از محرک پلاسمایی نعلی شکل در



شکل 1- نمایی از محرک پلاسمایی

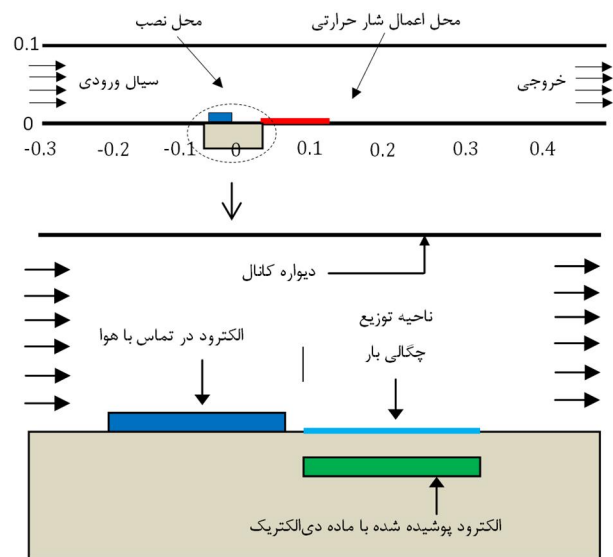
2- Internal flow
3- External flow

1- Horse-Shoe

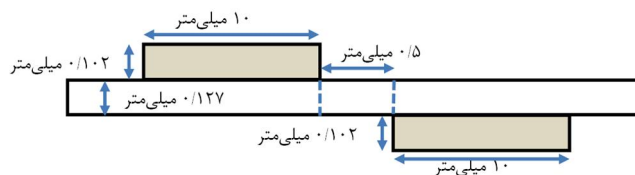
3- هندسه حل و شبکه محاسباتی

شماتیکی از هندسه دو بعدی دامنه محاسباتی و محل قرارگیری محرک پلازما در بخشی از یک کانال مسطح در شکل 2 نمایش داده شده است. کانال تحت شار حرارتی ثابت 100 وات بر متر مربع قرار دارد. این مقدار شار حرارتی به کف کانال و در حد فاصل 1 تا 11 سانتی متری اعمال شده است. همان گونه که در شکل 2 نشان داده شده است، نقطه شروع اعمال شار حرارتی دقیقاً بعد از محرک پایینی می باشد.

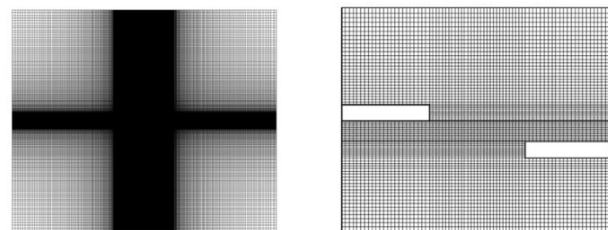
طراحی مدل هندسی و تولید شبکه محاسباتی با استفاده از نرم افزار گمبیت¹ انجام گرفته و شبکه به صورت سازمان یافته، غیریکنواخت و چهار وجهی می باشد. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان های نزدیک دیواره و الکترودها که گرادیان های شدید وجود دارد، از شبکه بندی با تراکم بیشتری در این نواحی استفاده شده است. در شکل 3 ابعاد الکترودهای به کار رفته در شبیه سازی نشان داده شده است. ابعاد به کار رفته مطابق مدل سوزن و هوآنگ [16] در نظر گرفته شده است. در شکل 4 نیز نمایی از شبکه تولید شده در کل دامنه و اطراف الکترودها نشان داده شده است.



شکل 2 دامنه محاسباتی



شکل 3 ابعاد الکترودها و فاصله قرارگیری



شکل 4 نمایی از شبکه محاسباتی

1- Gambit

4- معادلات حاکم بر میدان الکتریکی و میدان جریان

مقدار نیروی حجمی حاصل از اعمال محرک پلازما به صورت رابطه (1) قابل محاسبه می باشد، که به عنوان یک عبارت چشمه در معادلات بقای مومنتم وارد می شود.

$$\vec{f}_b = \rho_c \vec{E} \quad (1)$$

در این رابطه ρ_c و \vec{E} به ترتیب چگالی حجمی بار الکتریکی و بردار میدان الکتریکی می باشد. به منظور تعیین نیروی الکتریکی تولیدی از معادله سوم ماکسول (قانون فارادی) به صورت رابطه (2) استفاده می شود [16]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

اگر از تغییرات زمانی میدان مغناطیسی در رابطه بالا صرف نظر شود که فرضی معتبر در استفاده از محرک های پلازما می باشد [16]، رابطه (2) به رابطه (3) تبدیل خواهد شد:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (3)$$

این مطلب بیان می کند که گرادیان پتانسیل، اسکالر است. بنابراین طبق رابطه (4):

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (4)$$

از معادله اول ماکسول (قانون گاوس)، رابطه (5) را داریم:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (5)$$

با فرض این که نفوذپذیری ϵ_0 یک مشتق فضایی غیر صفر داشته باشد، معادله فوق به صورت رابطه (6) ارائه می شود:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \vec{E}) = \rho_c \quad (6)$$

با ترکیب معادلات (4) و (6)، معادله (7) را خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = -\rho_c \quad (7)$$

نفوذپذیری به صورت $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ قابل بیان می باشد که ϵ_r نفوذپذیری محیط موردنظر و ϵ_0 نفوذپذیری سطح آزاد می باشد. در این جا یکی از پارامترهای مهم در محرک های پلاسمایی تحت عنوان طول دبابی با علامت λ_d معرفی می گردد. این طول، مقیاس فاصله ای است که روی آن چگالی های بار مشخصی به طور همزمان می توانند وجود داشته باشند. همچنین باید دقت نمود که کوچک ترین سلول شبکه نباید بزرگ تر از این مقیاس طولی در مجاورت پلازما باشد. رابطه (8) برای طول دبابی معرفی می گردد: [16]

$$\frac{\rho_c}{\epsilon_0} = -\frac{1}{(\lambda_d)^2} \phi \quad (8)$$

که طول دبابی در این رابطه به صورت رابطه (9) ارائه می شود:

$$\lambda_d = \sqrt{\epsilon_0 k_B T_{i,e} / (e^2 n_{i,e})} \quad (9)$$

که ϵ_0 ضریب نفوذپذیری خلاء، k_B ثابت بولتزمن، $T_{i,e}$ دماهای یون و الکترون و چگالی بار یون و الکترون می باشد. با استفاده از اصل برهم نهی می توان پتانسیل اسکالر را به صورت زیر به دو بخش پتانسیل ناشی از میدان الکتریکی و پتانسیل ناشی از چگالی بار مطابق رابطه (10) نمایش داد:

$$\Phi = \phi + \varphi \quad (10)$$

با فرض طول دبابی کوچک، سطح دی الکتریک شامل پتانسیل ایجاد شده توسط بار الکتریکی بوده و تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمالی قرار نمی گیرد. بنابراین می توان دو معادله مستقل در ترم های دو پتانسیل نوشت. معادله دیفرانسیل جزئی برای پتانسیل میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمالی مطابق رابطه (11) عبارت است از:

گاوس به کار رفته به صورت رابطه (22) می باشد:

$$G(x) = \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad x \geq 0 \quad (22)$$

در این رابطه پارامتر μ بیانگر مقدار بیشینه مکانی x و σ نسبت طول الکتروند به طول دبابی به عنوان شاخصه مقیاس می باشد.

خلاصه شرایط مرزی برای معادلات حاکم بر محرک پلاسما در شکل 5 نشان داده شده است.

6- روش حل عددی

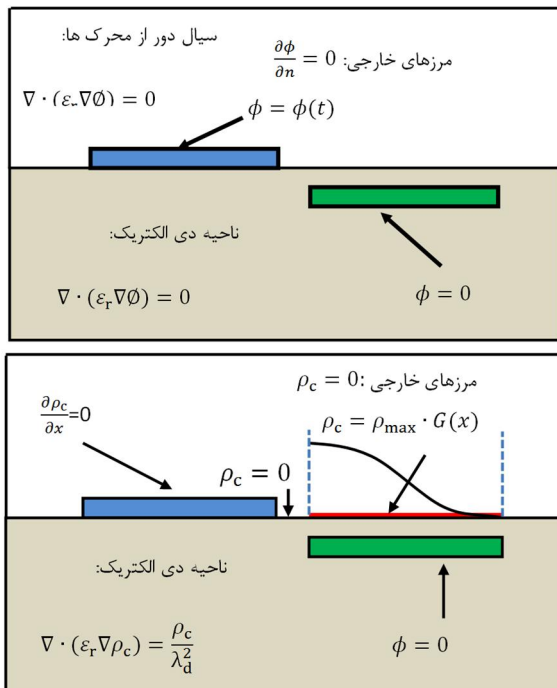
جهت مدل سازی آشفتگی، مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ استاندارد بر پایه معادلات متوسط گیری شده نایبر- استوکس به کار رفته و لذا دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم و معادلات انتقال k و ϵ برای جریان تحت شرایط دوبعدی، تراکم ناپذیر، لزج، تک فاز و با در نظر گرفتن نیروی حجمی حاصل از اعمال میدان الکتریکی مطابق روابط (23)، (24) و (25) می باشد [17,18]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (23)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + (\mu + \mu_t)\nabla^2 u + f_e \quad (24)$$

$$\mu_t / \rho = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (25)$$

لازم به ذکر است که معادلات حاکم بر پدیده پلاسما شامل معادلات میدان الکتریکی و میدان جریان سیال می باشند، که این معادلات می توانند به صورت مستقل مورد تحلیل قرار گیرند. حل عددی معادلات (23) تا (25) با استفاده از کد فلونت، براساس حجم محدود و توسط حل کننده بر پایه فشار صورت گرفته و جهت گسسته سازی ترم فشار و سایر ترم های 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 شده اند. به منظور تشخیص همگرایی حل، معیار کاهش باقیمانده های تراز شده 10^{-8} می باشد. علاوه بر آن کاهش خاص شار جرمی به میزان کمتر از 0/2% شار کل و رصد کردن تغییرات کمیت های مهم جریان در نواحی حساس لحاظ



شکل 5 شرایط مرزی برای معادلات حاکم بر محرک پلاسما

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (11)$$

و برای معادله دیفرانسیل جزئی مربوط به پتانسیل دوم مطابق رابطه (12) داریم:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (12)$$

از معادله (8)، معادله (13) حاصل می شود:

$$\frac{\Phi}{(\lambda_d)^2} = \frac{\phi + \varphi}{(\lambda_d)^2} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \rightarrow \frac{\rho_c (\lambda_d)^2}{\epsilon_0} + \phi = \varphi \quad (13)$$

با جاگذاری این معادله در رابطه (7)، رابطه (14) را خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla (-\frac{\rho_c (\lambda_d)^2}{\epsilon_0} + \phi)) = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (14)$$

فرض می شود که ϕ ، معادله لاپلاس (11) را ارضاء می کند، بنابراین معادله (13) به صورت معادله (15) ساده می شود:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla (-\frac{\rho_c (\lambda_d)^2}{\epsilon_0})) + \nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (15)$$

از آنجایی که ϵ_0 و λ_d ثابت می باشند، می توان آن ها را از عملگرهای دیفرانسیلی حذف نموده که در نتیجه معادله (16) حاصل می شود:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \rho_c) = \frac{\rho_c}{(\lambda_d)^2} \quad (16)$$

بنابراین می توان بردار نیروی حجمی ناشی از اثرات محرک پلاسمایی را به شکل معادله (17) در معادلات نایبر استوکس وارد نمود:

$$\bar{f}_b = \rho_c \bar{E} = \rho_c (-\nabla \phi) \quad (17)$$

5- خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی

هوا به عنوان سیال عامل و به صورت تراکم ناپذیر با خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده است. جریان در ورودی کانال دارای سرعت یکنواخت می باشد. مرز خروجی دامنه محاسباتی دارای شرط مرزی فشار خروجی می باشد و بر روی دیواره ها شرط عدم لغزش فرض شده است. برای حل معادلات میدان الکتریکی نیاز به شرایط مرزی مناسب برای پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی می باشد. به این منظور روی الکتروند تزریق کننده، پتانسیل الکتریکی به صورت جریان متناوب، طبق رابطه (18) اعمال می شود:

$$\phi(t) = \phi^{\max} f(t) \quad (18)$$

که $f(t)$ را می توان به صورت تابع موج، مطابق رابطه (19) تعریف نمود:

$$f(t) = \sin(2\pi\omega t) \quad (19)$$

در رابطه بالا ω ، فرکانس موج و ϕ^{\max} دامنه موج می باشد. همان گونه که مشاهده می شود، $\phi(t)$ تابعی از زمان است و برای حل حالت پایا باید از حالت مستقل از زمان بهره گرفته شود. به همین منظور در حالت پایا $f(t)$ براساس موج مربعی طبق رابطه (20) بیان می شود:

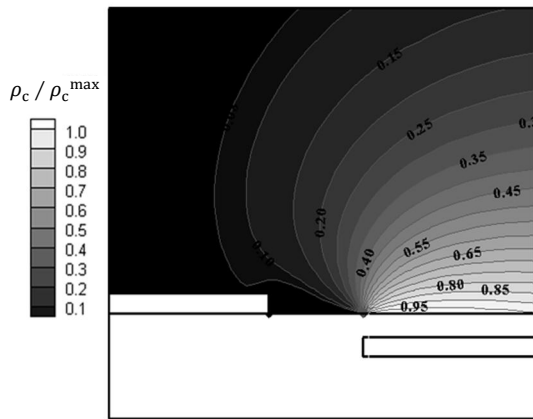
$$f(t) = \begin{cases} +1 & \sin(2\pi\omega t) \geq 0 \\ -1 & \sin(2\pi\omega t) \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

برای الکتروند پوشیده شده با ماده دی الکتریک، مقدار پتانسیل الکتریکی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

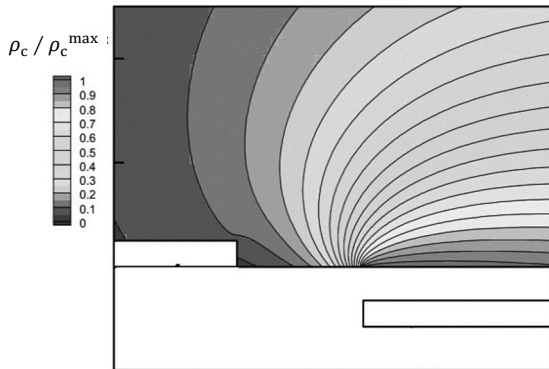
شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی بر بالای الکتروند پوشیده شده با ماده دی الکتریک به صورت رابطه (21) بیان می شود:

$$\rho_{c,w}(x, t) = \rho_c^{\max} G(x) f(t) \quad (21)$$

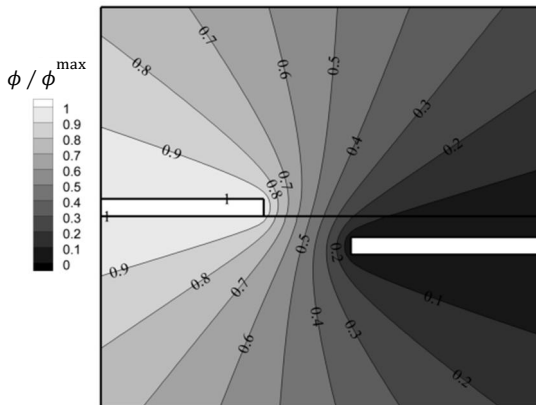
در رابطه بالا تابع G یک تابع توزیع نیمه گاوسی است. ساختار تابع توزیع



شکل 7-الف توزیع چگالی بار الکتریکی تحقیق حاضر



شکل 7-ب توزیع چگالی بار الکتریکی [16]



شکل 8 توزیع پتانسیل الکتریکی

همچنین با در نظر گرفتن دمای متوسط سیال بین ورودی و خروجی کانال، مطابق رابطه (28) برای مقدار دمای متوسط سیال داریم:

$$T_b = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (28)$$

به منظور بررسی تأثیر محرک پلاسما بر میزان انتقال حرارت از صفحه تحت شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت موضعی در شکل 9 نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، با اعمال ولتاژ الکتریکی، ضریب انتقال حرارت سطح به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. افزایش انتقال حرارت نشان داده شده در حضور محرک پلاسما از دو مکانیزم تشکیل شده است. مکانیزم اول تولید گردابه‌های ایجاد شده در محیط سیال بر اثر تأثیر محرک پلاسما است و مکانیزم دوم، افزایش مومنتم در لایه مرزی هیدرودینامیکی است که با افزایش سرعت سیال در لایه مرزی حرارتی و افزایش انتقال حرارت همراه است.

شده‌اند. کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر پنج هسته‌ای با 2/64 گیگاهرتز اینتل¹ به صورت پردازش موازی انجام شده و زمان محاسباتی 2 تا 4 ساعت برای هر حل بوده است. به منظور یافتن جواب‌های مستقل از شبکه محاسباتی مطابق شکل 6، ضریب انتقال حرارت محلی در ناحیه اعمال شار حرارتی نشان می‌دهد که شبکه دارای 38124 سلول، برای حل عددی در ولتاژ اعمالی 16kV مناسب می‌باشد. همچنین استقلال شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

7- بحث و بررسی نتایج

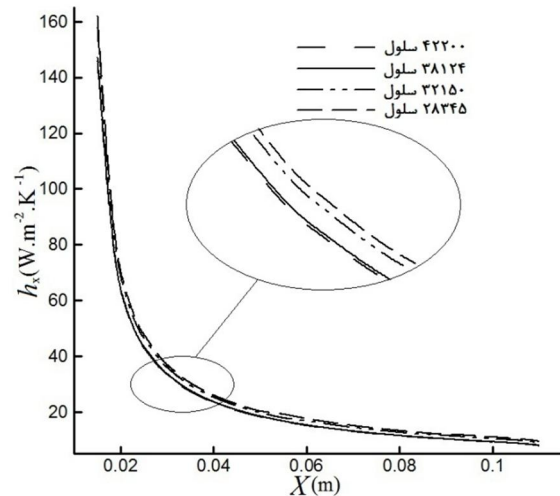
جهت حصول اطمینان از صحت نتایج و اعتبارسنجی آن، نتایج تحلیل عددی حاضر با نتایج عددی [16] برای یک صفحه تخت مقایسه شده است. برای حالتی که ولتاژ 16 کیلو ولت به الکترود تزریق کننده اعمال می‌شود، توزیع چگالی بار الکتریکی در شکل 7 مقایسه شده است و بین نتایج عددی حاضر و نتایج عددی [16] تطابق مطلوبی برقرار می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود، مقدار چگالی بار الکتریکی در مکانی بالای الکترود پوشیده با ماده دی‌الکتریک به مقدار بیشینه خود می‌رسد و به صورتی که در شکل 7 مشخص است با فاصله گرفتن از سطح مذکور، چگالی بار الکتریکی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به توزیع پتانسیل الکتریکی که در شکل 8 نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکترود تزریق کننده دارای مقدار بیشینه می‌باشد و با نزدیک شدن به سطح الکترود پوشیده با ماده دی‌الکتریک از مقدار آن کاسته می‌شود. بنابراین طبق تعریف نیروی الکتریکی حاصل از اعمال ولتاژ الکتریکی، در مجاورت الکترود در تماس با هوا بیشتر است و انتظار می‌رود جریان ثانویه تولیدی در اثر یونیزاسیون سیال دی‌الکتریک دارای قدرت بیشتری باشد. بنابراین تغییر ولتاژ اعمالی می‌تواند در تغییر الگوی جریان سیال داخل کانال نقش موثری ایفا کند.

8- تأثیر محرک پلاسما بر ضریب انتقال حرارت

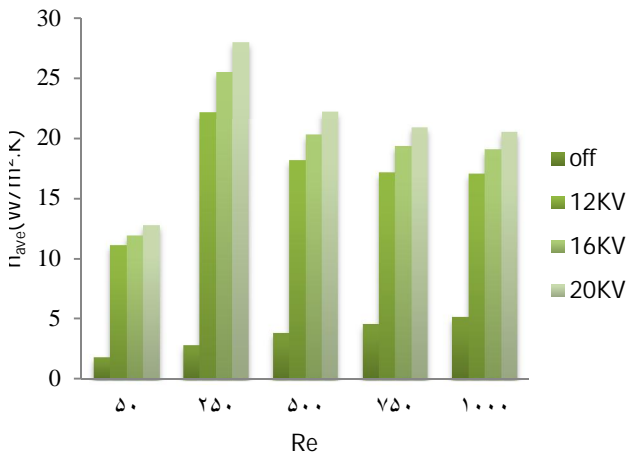
به منظور بررسی میزان انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط مطابق روابط (26) و (27) تعریف می‌شوند:

$$h_x = \frac{q''}{(T_x - T_b)} \quad (26)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (27)$$



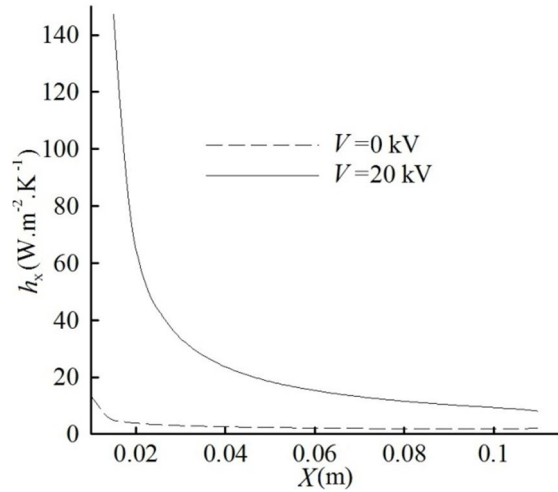
شکل 6 بررسی اثر تعداد سلول شبکه محاسباتی بر ضریب انتقال حرارت موضعی



شکل 11 اثر ولتاژ و عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت متوسط

عنوان یک پارامتر مؤثر به طور دقیق بررسی گردد، تا محدوده تأثیرگذاری محرک مشخص شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تأثیر محرک پلاسما با افزایش ولتاژ به دلیل بیشتر شدن قدرت یونیزه کردن سیال، افزایش می‌یابد. برای بررسی میزان تأثیرگذاری تزریق مومنتم خارجی به جریان اصلی در حضور محرک پلاسمایی، پروفیل سرعت جریان عبوری در مقطعی مشخص از کانال در شکل 12 نشان داده شده است. به همین منظور در سه ولتاژ اعمالی 12، 16 و 20 کیلو ولت، میزان تزریق مومنتم به لایه مرزی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ اعمالی، سرعت سیال در لایه مرزی افزایش می‌یابد. البته ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که با افزایش عدد رینولدز پروفیل سرعت در نزدیکی صفحه پایینی در مقطع مورد نظر دچار هیچ‌گونه تغییر خاصی نشده است.

البته به منظور توجیه این مطلب نیاز است که تابع جریان تحت تأثیر محرک پلاسما مورد بررسی قرار گیرد. شکل 13 جریان ثانویه تولید شده در کانال تحت تأثیر ولتاژ 20kV 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، تأثیر 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 گردابه‌ای قوی‌تر و حجیم‌تر در اطراف الکتروود تزریق کننده می‌شود. در نتیجه به نظر می‌رسد که محرک پلاسما در شرایطی که مومنتم جریان ورودی کمتر باشد موثر واقع می‌شود و با افزایش مومنتم از قدرت و حجم گردابه تولید شده کاسته می‌شود. همچنین با افزایش عدد رینولدز به نظر می‌رسد که جریان ثانویه 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 نسبت به رینولدزهای کمتر می‌شود. بنابراین در رینولدزهای مختلف میزان تأثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و انتقال حرارت از دو منظر قابل بررسی است و توجه به آن ضروری است. در رینولدزهای پایین همان‌گونه که از نتایج مشخص است، بحث مکانیزم تولید گردابه، قدرت گردابه و تعداد آن است و در رینولدزهای بالا میزان افزایش مومنتم جریان در لایه مرزی می‌باشد.

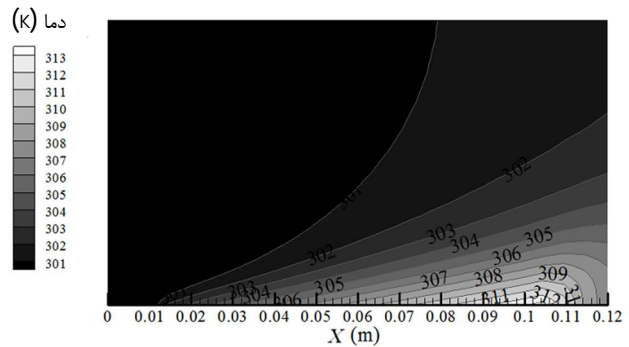


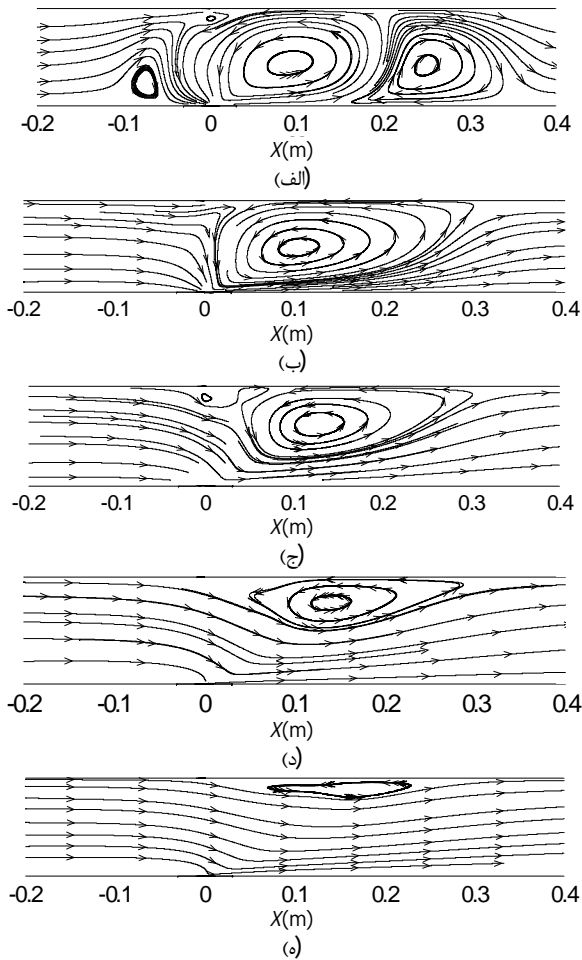
شکل 9 تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی در حالت روشن و خاموش محرک پلاسما (Re=250)

همچنین توزیع دمای سیال در رینولدز 250 و ولتاژ 20kV در شکل 10 نشان داده شده است. در حالتی که محرک پلاسما خاموش می‌باشد ضخامت لایه مرزی در طول کانال در حال رشد می‌باشد اما با روشن شدن محرک پلاسما و تزریق مومنتم به لایه مرزی در داخل کانال، توزیع دما در کانال الگویی کاملاً متفاوت خواهد داشت.

9- تأثیر عدد رینولدز و ولتاژ اعمالی بر ضریب انتقال حرارت

در شکل 11 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با ولتاژ اعمالی در رینولدزهای مختلف مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حالتی که محرک پلاسما خاموش می‌باشد، افزایش ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد که به دلیل افزایش عبارتهای جابه‌جایی در جریان داخل کانال می‌باشد. اما در حالتی که محرک پلاسما روشن می‌باشد، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در Re=250 بیشینه و پس از آن نزولی می‌باشد. دلیل این امر این است که اگر چه محرک پلاسما در رینولدزهای پایین (Re=50) با تولید گردابه‌هایی باعث به هم ریختگی جریان سیال شده و این به هم ریختگی عامل اصلی افزایش انتقال حرارت است، ولی تداخل گردابه‌ها در داخل کانال باعث ایجاد موانع حرارتی موضعی در سطح تحت شار حرارتی کانال می‌شود. در اعداد Re=250 به بالاتر، به تدریج میزان به هم ریختگی جریان کاهش می‌یابد و باعث کاهش اثر پلاسما می‌شود و در نتیجه میزان افزایش انتقال حرارت کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان دریافت، به منظور دستیابی به حداکثر تأثیر محرک پلاسما، نیاز است رینولدز جریان به



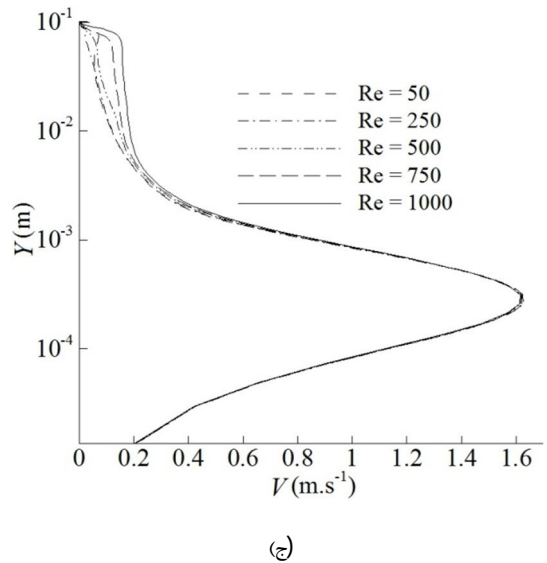
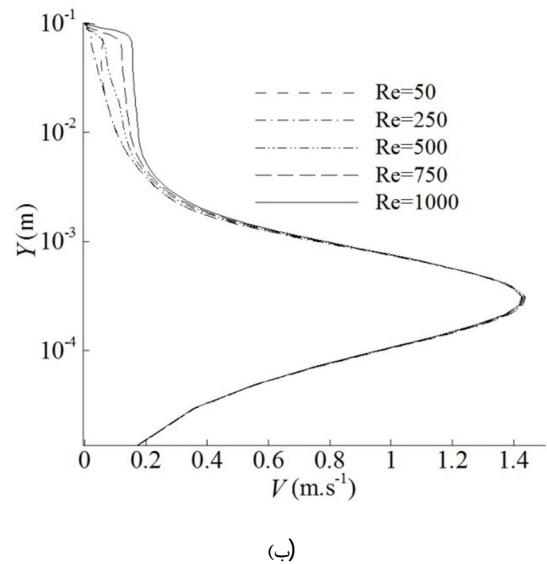
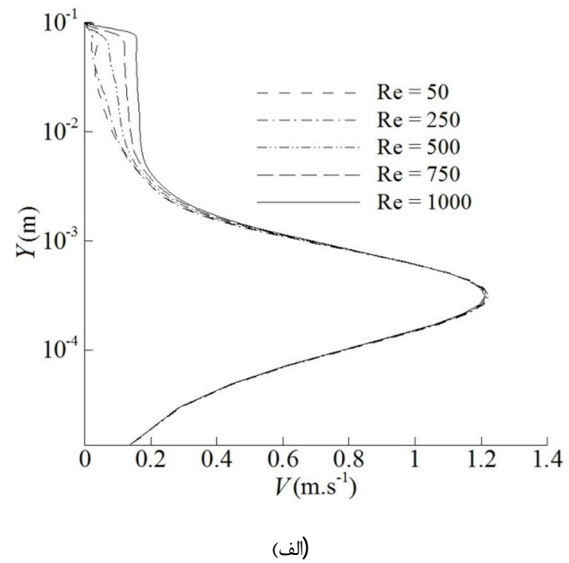


شکل 13 اثر عدد رینولدز بر روی تابع جریان در ولتاژ 20 کیلوولت
 Re=1000 (ه), Re=750 (د), Re=500 (ج), Re=250 (ب), Re=50 (الف)

10- نتیجه گیری

در این تحقیق بررسی مشخصه‌های جریان در یک کانال تخت با شار حرارتی ثابت تحت تأثیر محرک پلازما به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی تأثیر محرک پلازما بر میدان جریان و ضریب انتقال حرارت می‌باشد. همچنین تأثیر پارامترهای موثر از قبیل عدد رینولدز ورودی جریان و ولتاژ اعمالی به الکترودها بررسی شده است و مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

- محرک پلازما سبب تولید نیروی حجمی در داخل سیال شده و اثر آن به صورت افزایش سرعت جریان در نزدیکی الکترودها بیرونی می‌باشد. این افزایش سرعت ناگهانی در رینولدزهای پایین جهت افزایش راندمان خنک‌کاری می‌تواند مطلوب باشد.
- نیروی تولید شده توسط میدان الکتریکی تابعی از ولتاژ اعمالی است و با آن رابطه مستقیم دارد.
- اثر رینولدز بر روی قدرت پلازما یک تابع سهموی است. در رینولدزهای کمتر از 250 تأثیر مثبت و پس از آن تأثیر منفی دارد.
- ضریب انتقال حرارت با ولتاژ اعمالی به الکترودها رابطه مستقیم داشته و در ولتاژ 20 کیلوولت به طور میانگین 10 تا 15 درصد بیشتر از ولتاژهای 12 و 16 کیلوولت است.



شکل 12 پروفیل سرعت در مقطعی از کانال
 (الف) 12 kV, (ب) 16 kV, (ج) 20 kV

خروجی 0
توربولانس t
مکان موضعی x

• در رینولدزهای بسیار پایین اثرات قوی محرک پلاسما، باعث ایجاد گردابه‌های پادساعت‌گرد ثانویه می‌شود، که این پدیده به عنوان یک مانع حرارتی ضریب انتقال حرارت را کاهش می‌دهد.

11- فهرست علائم

C_{μ}	ثابت توربولانسی
E	بردار میدان الکتریکی (Vm^{-1})
e	بار الکترون (C)
f	نیروی (N)
f_b	نیروی حجمی در واحد حجم (Fm^{-3})
f_e	نیروی الکتریکی (F)
H	میدان مغناطیسی (F)
h	ضریب انتقال حرارت ($Wm^{-2}K^{-1}$)
\bar{h}	ضریب انتقال حرارت متوسط ($Wm^{-2}K^{-1}$)
k	انرژی جنبشی (kJ)
K_B	ثابت بولتزمن
L	طول (m)
$n_{i,e}$	تعداد الکترون
q''	شار گرمایی (Wm^{-2})
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
$T_{i,e}$	دمای متوسط (K)
t	زمان (s)
u	سرعت (ms^{-2})

علائم یونانی

ϵ_0	نفوذپذیری سطح آزاد
ϵ_r	نفوذپذیری محیط مورد نظر
ρ	چگالی حجمی (kgm^{-3})
ρ_c	چگالی حجمی بار الکتریکی (Cm^{-3})
\emptyset	پتانسیل الکتریکی (V)
λ_d	طول دمای (m)
μ_0	ضریب گذردهی مغناطیسی
μ_t	ویسکوزیته توربولانس ($kgm^{-1}s^{-1}$)

زیر نویس‌ها

b	بالک
e	الکترون
i	ورودی

12- مراجع

- [1] A. E. Bergles, V. Nirmalan, J. H. Junkhan and R. L. Webb, 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.
- [2] A. E. Bergles, M. K. Jensen, E. F. C. Somerscales, and R. M. Manglik, Literature review of heat transfer enhancement technology for heat exchanges in gas-fired applications, Report GRI 91-0146, *Gas Research Institute*, Chicago, 1991.
- [3] A. E. Bergles, M. K. Jensen, and B. Shome, Bibliography on enhancement of convective heat and mass transfer, Report HTL-23, *Heat transfer laboratory, Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, NY, 1995.
- [4] A. Salmasi, A. Shadaram, M. Mirzaei, A. Shams Taleghani, Numerical experimental investigation on the effect of a plasma actuator on NLF0414 airfoils' efficiency after the stall, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 104-116, 2012. (In Persian)
- [5] A. Shams Taleghani, A. Shadaram, M. Mirzaei, Experimental investigation of geometric and electrical characteristics by measurements of the induced flow, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 132-145, 2012. (In Persian)
- [6] A. Shams Taleghani, A. Shadaram, M. Mirzaei, Effects of duty cycles of the plasma actuators on improvement of the pressure distribution over NLF0414 airfoil, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 106-114, 2012. (In Persian)
- [7] M. Riherd, S. Roy, Measurements and simulations of a channel flow powered by plasma actuators, *Journal of applied physics*, Vol. 112, DOI: 10.1063/1.4749250, 2012.
- [8] I.H. Ibrahim, M. Skote, Simulating plasma actuators in a channel flow configuration by utilizing the modified Suzen-Huang model, *Computers & Fluids*, Vol. 99, pp. 144-155, 2014.
- [9] Ch. Ch. Wang, and S. Roy, Active Cooling of Turbine Blades using Horse-Shoe Plasma Actuator, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit AIAA-2009-0679*, 5 - 8 January 2009, Orlando, Florida.
- [10] J. L. Yu, L. M. He, Y. F. Zhu, W. Ding, Y. Q. Wang, Numerical simulation of the effect of plasma aerodynamic actuation on improving film hole cooling performance, *Heat Mass Transfer*, Vol. 49, pp.897-906, 2013.
- [11] M. Malik, L. Weinstein, and M. Hussani, Ion Wind Drag Reduction, *AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, AIAA Paper 83-0231, 1983.
- [12] M. Forte, J. Jolibois, F. Moreau, G. Touchard and M. Gazalens, Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non- Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity- Application to Flow Control, , *3rd AIAA Flow Control Conference*, AIAA Paper 2006- 2863.
- [13] T. C. Corke, M. L. Post, D. M. Orlov, Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications, *Review Article: Exp. Fluids*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-26, 2008.
- [14] B. Jayaraman, Y. Cho, W. Shyy, Modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, *38th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference*, 2007.
- [15] B. Jayaraman, W. Shyy, Modeling of Dielectric Barrier Discharge-Induced Fluid Dynamics and Heat Transfer, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 44, pp. 130-191, 2007.
- [16] Y. B. Suzen, P. G. Huang, J. D. Jacob, Numerical Simulations of Plasma Based Flow Control Applications, *AIAA-2005-4633*, 35th, 2005.
- [17] 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. (Persian)
- [18] FLUENT 6.3 user's guide, Fluent Inc., Lebanon, NH, (2006).