ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

على رفيع<sup>1</sup>، نيما امانىفرد<sup>2\*</sup>، حامد محدث ديلمى<sup>3</sup>، فريد دولتى<sup>4</sup>

1- كارشناس ارشد، مهندسى مكانيك، دانشگاه گيلان، 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 پستیaranif@guilan.ac.ir ،3756

| چکیدہ  | اطلاعات مقاله   |
|--|---|
| 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<br>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<br>ضریب انتقال حرارت در یک کانال مسطح تحت شار حرارتی ثابت، بدون حضور و همچنین تحت تاثیر محرک پلاسما در شرایط دو بعدی،<br>- | مقاله پژوهشی کامل<br>دریافت: 26 دی 1393<br>پذیرش: 15 فروردین 1394<br>ارائه در سایت: 29 فروردین 1394 |
| آشفته، تراکم ناپذیر و پایدار به روش حجم محدود به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی رینولدزهای مختلف جریان<br>ورودی در ولتاژهای متفاوت در نظر گرفته شده است و محرک پلاسما در وسط ناحیه تحت شار حرارتی قرار داده شده است و تاثیر آن بر تابع  | <i>کلید واژگان:</i><br>محرک پلاسما<br>انتظار مار میلومار  |
| 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<br>مناسبی برخوردار میباشد. نتایج عددی نشان میدهد که در یک رینولدز مشخص، با افزایش ولتاژ ضریب انتقال حرارت افزایش مییابد، اما در<br>یک ولتاژ ثابت با افزاش , سرعت ورودی حربان, ضریب انتقال حرارت تا رینولدز 250 نرخ صعودی و س راز آن به دلبل کاهش اثر گردابه حاصل  | انتقال حرارت جابه جایی اجباری<br>کانال مسطح<br>تحلیل عددی   |
| ان پلاسما سیر نزولی دارد. همچنین سرعت جریان ورودی بر روی ابعاد گردابه تولید شده تاثیرگذار می باشد. طبق نتایج بهدست آمده می توان یک<br>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** ABSTRACT Original Research Paper Plasma actuator is one of the newest ways in vortex generation and flow control techniques that Received 16 January 2015 Accepted 04 April 2015 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 Available Online 18 April 2015 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 Keywords: were evaluated through a variety of Reynolds number, in the presence and absence of applied Plasma Actuator Forced Convection Heat Transfer voltages. The present computed results are first compared with the numerical data in case of Flat Channel rectangular flat channel and the results agree very well. The numerical results indicate that at a Numerical Investigation 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. شانزده 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 پایان پذیری 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)

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 بهوجود 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 بهصورت 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] تاثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی در مشخصههای جریان یونی القایی توسط عملگرهای پلاسمایی را بهصورت 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 میکند.

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.

رایحد 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 می کند. با وجود محرک پلاسما در داخل کانال سرعت ایجاد شده در خروجی کانال حدود 1-3 متر بر ثانیه می باشد که این سرعت با افزایش تعداد محرک پلاسما در ولتاژ ثابت، افزایش می یابد. همچنین نتایج آنها نشان می دهد که راندمان این نوع سیستمها پایین و کمتر از 1/0 درصد بوده که برای پمپ کردن جریانهای کوچک مناسب می باشد.

ابراهیم و اسکوت [8] با استفاده از یک مدل عددی به جریان رانده شده در داخل یک کانال تحت تاثیر 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 بهدست آمده است. همچنین نتایج آنها نشان میدهد که در کانالهای با ارتفاع زیاد، دو نقطه بیشینه سرعت بهوسیله هر محرک پلاسما ایجاد شده که متمایل به سمت پایین دست جریان دارند.

وانگ و روی [9] با به کار گیری یک محرک پلاسما به شکل نعل اسبی<sup>1</sup>، به بررسی اثرات آن بر بهبود کارایی خنک کاری لایهای پرداختند. آنها ابتدا به بررسی تاثیر نیروی الکتریکی حاصل از محرک پلاسمای نعلی شکل در

خنک کاری لایه ای روی یک صفحه تخت پرداختند. یو و همکاران [10]، به صورت عددی اثرات آیرودینامیکی محرک پلاسما را بهمنظور بهبود عملکرد خنک کاری لایه ای از طریق یک سوراخ استوانه ای بررسی نمودند. بدین منظور در مدلسازی خود اثر انتقال حرارتی محرک پلاسما را تحلیل کردند. آنها دریافتند که سرعت و نسبت وزش در راندمان خنککاری لایهای بسیار تاثیرگذار میباشد. سپس به بررسی تأثیر موقعیت و تعداد محرکهای پلاسما يرداختند. همچنين نتايج آنها نشان داد كه به دليل اثر حرارتي محرك آیرودینامیکی پلاسما، در ناحیه پیرامون محرک، کارایی خنککاری پائینتر از حالت بدون استفاده از محرک میباشد. یکی دیگر از کاربردهای محرک پلاسما، کنترل لایه مرزی جریان، به وسیله افزایش مومنتم جریان در نواحی نزدیک به دیوارهها میباشد. از آنجایی که افزایش مومنتم جریان در لایه مرزی باعث به تأخیر افتادن جدایش جریان و کاهش بازدارندگی میشود، امروزه محققان تحقیقات وسیعی را بهمنظور به کارگیری این محرک در کنترل لايه مرزی جريانهای داخلی<sup>2</sup> و خارجی<sup>3</sup> انجام میدهند. مَليک و همکاران [11] نخستین کسانی بودند که از نیروی جت حاصل از یک تخلیه توسط جریان مستقیم بهمنظور ایجاد یک ناحیه پلاسما و در نهایت کاهش نیروی بازدارندگی بر روی صفحات تخت استفاده کردند. فُرت و همکاران [12] از جمله محققانی هستند که به بررسی تاثیر استفاده از محرک پلاسما بر جریان عبوری از روی یک بالواره پرداختند. آنها در زمینه تاثیر پارامترهای مختلفی نظیر هندسه، جنس الکترودها، ولتاژ ورودی، فرکانس و دیگر یارامترهای محرک پلاسما تحقیقات زیادی انجام دادهاند.

با توجه به کاربرد محرک پلاسما در میزان افزایش مومنتم جریان سیال، در تحقیق حاضر به صورت عددی به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف محرک پلاسما بر میزان افزایش نرخ انتقال حرارت در یک کانال مسطح پرداخته شده است.

#### 2- محرك پلاسما

محرک پلاسما به عنوان یک روش فعال، از دو الکترود که یک الکترود در معرض هوا قرار دارد و الکترود دیگر کاملاً توسط ماده دی الکتریک پوشیده شده، تشکیل شده است. نمایی از بهکارگیری محرک پلاسما در شکل 1 نشان داده شده است. زمانی که به الکترودها یک ولتاژ بالا اعمال میشود، مولکولهای هوای اطراف الکترود پوشیده با ماده دی الکتریک یونیزه شده و منطقه پلاسما تشکیل می گردد. با یونیزه شدن مولکولهای هوا و برخورد آن با سایر مولکولها، یک نیروی حجمی ایجاد میشود [13-15].





<sup>1-</sup> Horse-Shoe

 <sup>2-</sup> Internal flow
 3- External flow

#### 3- هندسه حل و شبکه محاسباتی

شماتیکی از هندسه دو بعدی دامنه محاسباتی و محل قرارگیری محرک پلاسما 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 سانتیمتری اعمال شده است. همان گونه که در شکل 2 نشان داده شده است، نقطه شروع اعمال شار حرارتی دقیقا بعد از محرک پایینی 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. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکانهای نزدیک دیواره و الکترودها که گرادیانهای شدید وجود دارد، از شبکهبندی با تراکم بیشتری در این نواحی استفاده شده است. در شکل 3 ابعاد الکترودهای به کار رفته درشبیه 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.









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

مقدار نیروی حجمی حاصل از اعمال محرک پلاسما به صورت رابطه (1) قابل محاسبه میباشد، که به عنوان یک عبارت چشمه در معادلات بقای مومنتم وارد میشود.

$$\vec{f}_{\rm b} = \rho_{\rm c} \vec{E} \tag{1}$$

در این رابطه <sub>c</sub> و **ت** به ترتیب چگالی حجمی بار الکتریکی و بردار میدان الکتریکی میباشد. به منظور تعیین نیروی الکتریکی تولیدی از معادله سوم ماکسول (قانون فارادی) به صورت رابطه (2) استفاده می شود [16]:

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

اگر از تغییرات زمانی میدان مغناطیسی در رابطه بالا صرفنظر شود که فرضی معتبر در استفاده از محرکهای پلاسما میباشد [16]، رابطه (2) به رابطه (3) تبدیل خواهد شد:

$$\nabla \mathbf{x} \, \mathbf{\vec{E}} = \mathbf{0}$$

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

 $\nabla \cdot (\varepsilon_0 E) = \rho_c$ 

علی رفیع و همکاران

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

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_{\rm c}}{\varepsilon_0} \tag{5}$$

با فرض این که نفوذپذیری <sub>6</sub>0 یک مشتق فضایی غیر صفر داشته باشد، معادله فوق به صورت رابطه (6) ارائه می شود:

(3)

(4)

با

(7)

(10)

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \nabla \phi) = -\rho_c$$

نفوذپذیری به صورت  $\varepsilon_{\rm r} \cdot \varepsilon_{\rm r} = \varepsilon_{\rm r} \cdot \varepsilon_{\rm r}$  قابل بیان میباشد که  $\varepsilon_{\rm r}$  نفوذپذیری محیط موردنظر و  $\varepsilon_{\rm 0}$  نفوذپذیری سطح آزاد میباشد. در این جا یکی از پارامترهای مهم در محرکهای پلاسمایی تحت عنوان طول دبای با علامت  $\lambda_{\rm d}$  معرفی میگردد. این طول، مقیاس فاصلهای است که روی آن چگالیهای بار مشخصی به طور همزمان میتوانند وجود داشته باشند. همچنین باید دقت نمود که کوچکترین سلول شبکه نباید بزرگتر از این مقیاس طولی در

مجاورت پلاسما باشد. رابطه (8) برای طول دبای معرفی می گردد:[16]

$$\frac{\rho_{\rm c}}{\varepsilon_0} = -\frac{1}{(\lambda_{\rm d})^2} \Phi \tag{8}$$

که طول دبای در این رابطه به صورت رابطه (9) ارائه میشود:

$$\lambda_{\rm d} = \sqrt{\varepsilon_0 k_{\rm B} T_{\rm i,e}} / (e^2 n_{\rm i,e}) \tag{9}$$

که <sub>6</sub>۵ ضریب نفوذپذیری خلاء، <sub>k</sub><sub>B</sub> ثابت بولتزمن، **T**<sub>i.e</sub> دماهای یون و الکترون و چگالی بار یون و الکترون میباشد. با استفاده از اصل برهم نهی میتوان 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:

# $\Phi = \phi + \phi$

با فرض طول دبای کوچک، سطح دیالکتریک شامل پتانسیل ایجاد شده توسط بار الکتریکی بوده و تحت تاثیر میدان الکتریکی اعمالی قرار نمیگیرد. بنابراین میتوان دو معادله مستقل در ترمهای دو پتانسیل نوشت. معادله دیفرانسیل جزئی برای پتانسیل میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمالی مطابق رابطه (11) عبارت است از:

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

در این رابطه پارامتر µ بیانگر مقدار بیشینه مکانی x و σ نسبت طول الکترود به طول دبای به عنوان شاخصه مقیاس میباشد.

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

### 6- روش حل عددی

(25)

جهت مدل سازی آشفتگی، مدل دو معادله ای ۲-۸ استاندارد بر پایه معادلات متوسط گیری شده ناویر - استوکس به کار رفته و لذا دستگاه معادلات پیوستگی، مومنتم و معادلات انتقال ۸ و ع برای جریان تحت شرایط دوبعدی، تراکمناپذیر، لزج، تکفاز و با در نظر گرفتن نیروی حجمی حاصل از اعمال میدان الکتریکی مطابق روابط (23)، (24) و (25) می باشد [17،18]:

$$7.u = 0$$
 (23)

 $\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u} = -\nabla\boldsymbol{p} + (\mu + \mu_t)\nabla^2\boldsymbol{u} + \boldsymbol{f}_e$ <sup>(24)</sup>

$$\mu_t \,/\, \rho = C_\mu k^2 \,/\, \varepsilon$$

لازم به ذکر است که معادلات حاکم بر پدیده پلاسما شامل معادلات میدان الکتریکی و میدان جریان سیال میباشند، که این معادلات میتوانند به صورت مستقل مورد تحلیل قرار گیرند. حل عددی معادلات (23) تا (25) با استفاده از کد فلوئنت، براساس حجم محدود و توسط حل کننده بر پایه فشار صورت گرفته و جهت گسسته سازی ترم فشار و سایر ترمهای معادلات به 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 <sup>8</sup>-10 میباشد. علاوه بر آن کاهش خالص شار جرمی به میزان کمتر از %20 شار کل و رصد کردن تغییرات کمیتهای مهم جریان در نواحی حساس لحاظ



**شکل** 5 شرایط مرزی برای معادلات حاکم بر محرک پلاسما

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{r}} \nabla \phi) = \boldsymbol{0} \tag{11}$$

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

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{r}} \nabla \boldsymbol{\varphi}) = -\frac{\rho_{\mathrm{c}}}{\varepsilon_{0}}$$
(12)

از معادله (8)، معادله (13) حاصل میشود:

$$\frac{\Phi}{(\lambda_{\rm d})^2} = \frac{\phi + \varphi}{(\lambda_{\rm d})^2} = \frac{\rho_{\rm c}}{\varepsilon_0} \to \frac{\rho_{\rm c} (\lambda_{\rm d})^2}{\varepsilon_0} + \phi = \varphi$$
(13)

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

$$\nabla \cdot \left( \varepsilon_{\rm r} \nabla \left( - \frac{\rho_{\rm c} (\lambda_{\rm d})^2}{\varepsilon_0} + \phi \right) \right) = - \frac{\rho_{\rm c}}{\varepsilon_0}$$
(14)

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

$$\nabla \cdot (\varepsilon_{\rm r} \nabla (-\frac{\rho_{\rm c} (\lambda_{\rm d})^2}{\varepsilon_0})) + \nabla (\varepsilon_{\rm r} \nabla \phi) = -\frac{\rho_{\rm c}}{\varepsilon_0}$$
(15)

از آنجایی که <sub>0</sub>3 و λ ثابت میباشند، میتوان آنها را از عملگرهای دیفرانسیلی حذف نموده که در نتیجه معادله (16) حاصل میشود:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_{\rm r} \nabla \rho_{\rm c}) = \frac{\rho_{\rm c}}{(\lambda_{\rm d})^2}$$
(16)

بنابراین میتوان بردار نیروی حجمی ناشی از اثرات محرک پلاسمایی را به شکل معادله (17) در معادلات ناویراستوکس وارد نمود:

$$\vec{I}_{\rm b} = \rho_{\rm c} \vec{E} = \rho_{\rm c} (-\nabla \phi) \tag{17}$$

# 5- خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی

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

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

که f(t) را می توان به صورت تابع موج، مطابق رابطه (19) تعریف نمود: (19) = sin( $2\pi\omega t$ )

در رابطه بالا w، فرکانس موج و  $\phi^{\max} \phi$  دامنه موج میباشد. همان گونه که مشاهده میشود،  $(t)\phi$  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)

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

برای الکترود پوشیده شده با ماده دیالکتریک، مقدار پتانسیل الکتریکی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی بر بالای الکترود پوشیده شده با ماده دیالکتریک به صورت رابطه (21) بیان میشود:

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

در رابطه بالا تابع 6 یک تابع توزیع نیمه گاوسی است. ساختار تابع توزیع

شدهاند. کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر پنج هستهای با 2/64 گیگاهرتز اینتل<sup>1</sup> به صورت پردازش موازی انجام شده و زمان محاسباتی 2 تا 4 ساعت برای هر حل بوده است. به منظور یافتن جوابهای مستقل ازشبکه محاسباتی مطابق شکل b، ضریب انتقال حرارت محلی در ناحیه اعمال شار حرارتی نشان میدهد که شبکه دارای 38124 سلول، برای حل عددی در ولتاژ اعمالی **16**kVمناسب میباشد. همچنین استقلال شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

# 7- بحث وبررسي نتايج

جهت حصول اطمينان از صحت نتايج و اعتبارسنجي آن، نتايج تحليل عددي حاضر با نتایج عددی [16] برای یک صفحه تخت مقایسه شده است. برای حالتي كه ولتاژ 16 كيلو ولت به الكترود تزريق كننده اعمال مي شود، توزيع چگالی بار الکتریکی در شکل 7 مقایسه شده است و بین نتایج عددی حاضر و نتايج عددي [16] تطابق مطلوبي برقرار ميباشد. همان گونه كه مشاهده می شود، مقدار چگالی بار الکتریکی در مکانی بالای الکترود یوشیده با ماده دىالكتريك به مقدار بيشينه خود مىرسد و بهصورتى كه در شكل 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 می شود که پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکترود تزریق کننده دارای مقدار بیشینه میباشد و با نزدیک شدن به سطح الکترود پوشیده با ماده دی الکتریک از مقدار آن کاسته می شود. بنابراین طبق تعریف نیروی الكتريكي حاصل از اعمال ولتاژ الكتريكي، در مجاورت الكترود در تماس با هوا بیشتر است و انتظار میرود جریان ثانویه تولیدی در اثر یونیزاسیون سیال دی الكتريك داراى قدرت بيشترى باشد. بنابراين تغيير ولتاژ اعمالي ميتواند در تغيير الكوى جريان سيال داخل كانال نقش موثرى ايفا كند.

# 8- تاثير محرك يلاسما بر ضريب انتقال حرارت

به منظور بررسی میزان انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط مطابق روابط (26) و (27) تعريف مى شوند:



$$\overline{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \tag{27}$$



<sup>1-</sup> Core i52.64 GHz Intel



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

$$\boldsymbol{\tau}_{\rm b} = \frac{\boldsymbol{\tau}_{\rm i} + \boldsymbol{\tau}_{\rm o}}{2} \tag{28}$$

به منظور بررسی تاثیر 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 می یابد. 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.





شكل 11 اثر ولتاژ و عدد رينولدز بر ضريب انتقال حرارت متوسط

عنوان یک پارامتر مؤثر به طور دقیق بررسی گردد، تا محدوده تأثیرگذاری محرک مشخص شود. همچنین نتایج نشان میدهد که تاثیر محرک پلاسما با افزایش ولتاژ به دلیل بیشتر شدن قدرت یونیزه کردن سیال، افزایش مییابد.

برای بررسی میزان تاثیرگذاری 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. همان گونه که مشاهده میشود با افزایش ولتاژ اعمالی، سرعت سیال در لایه مرزی افزایش میابد. البته ذکر این نکته حائز اهمیت میباشد که با افزایش عدد رینولدز پروفیل سرعت در نزدیکی صفحه پایینی در مقطع مورد نظر دچار هیچ گونه تغییر خاصی نشده است.

البته به منظور توجيه اين مطلب نياز است كه تابع جريان تحت تأثير محرک پلاسما مورد بررسی قرار گیرد. شکل 13 جریان ثانویه تولید شده در کانال تحت تاثیر ولتاژ **20**kV را در رینولدزهای مختلف نشان میدهد. همان گونه که در این شکل مشخص شده است، در رینولدزهای پایین تر 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 پایین تر به سمت صفحه متصل به زمین باعث تولید گردابهای قوی تر و حجیم تر در اطراف الکترود تزریق کننده می شود. در نتیجه به نظر می رسد که محرک پلاسما در شرایطی که مومنتم جریان ورودی کمتر باشد موثر واقع می شود و با افزایش مومنتم از قدرت و حجم گردابه تولید شده کاسته می-شود. همچنین با افزایش عدد رینولدز به نظر میرسد که جریان ثانویه از قدرت لازم برای انحراف جریان سیال برخوردار نمی باشد 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 رينولدزهاى مختلف ميزان تأثير محرك پلاسما بر ميدان جريان و انتقال حرارت از دو منظر قابل بررسی است و توجه به آن ضروری است. در رینولدزهای پایین همان گونه 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.



همچنین توزیع دمای سیال در رینولدز 250 و ولتاژ 20k۷ در شکل 10 نشان داده شده است. در حالتی که محرک پلاسما خاموش می باشد ضخامت لایه مرزی در طول کانال در حال رشد می باشد 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- تاثير عدد رينولدز و ولتاژ اعمالي بر ضريب انتقال حرارت

در شکل 11 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با ولتاژ اعمالی در رینولدزهای مختلف مقایسه شده است. همان گونه 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 بههم ریختگی جریان سیال شده و این بههم ریختگی عامل اصلی افزایش انتقال حرارت است، ولی تداخل گردابهها در داخل کانال باعث ایجاد موانع حرارتی موضعی در سطح تحت شار ریختگی جریان کاهش مییابد و باعث کاهش اثر پلاسما میشود و در نتیجه میزان افزایش انتقال حرارت کاهش مییابد. بنابراین میتوان دریافت، به میزان افزایش انتقال حرارت کاهش مییابد. بنابراین میتوان دریافت، به



ل 200 من 200 م 0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 X (m) 20kV شكل 10 توزيع دما در داخل كانال در Re=250 و ولتاژ



(الف) 12 kV (ب) 16 kV (ج) 20 kV



(الف) Re=1000 (ج) Re=500 (ج) Re=500 (د) Re=500 (ه

# 10- نتيجه گيري

در این تحقیق بررسی مشخصههای جریان در یک کانال تخت با شار حرارتی ثابت تحت تاثیر محرک پلاسما به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی تاثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و ضریب انتقال حرارت میباشد. همچنین تاثیر 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 پلاسما سبب تولید نیروی حجمی در داخل سیال شده و اثر آن به صورت افزایش سرعت جریان در نزدیکی الکترود 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 پلاسما یک تابع سهموی است. در رینولدزهای
   کمتر از 250 تاثیر مثبت و پس از آن تاثیر منفی دارد.
- ضریب انتقال حرارت با ولتاژ اعمالی به الکترود رابطه مستقیم داشته و در ولتاژ 20 کیلو ولت به طور میانگین 10 تا 15 درصد بیشتر از ولتاژهای 12 و 16 کیلو ولت است.

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

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

#### 11- فهرست علائم

ثابت توربولانسى  $C_{\mu}$ E بردار ميدان الكتريكى (٧m-1) بار الكترون (C) е f (N) نيرو  $f_{\rm b}$ نیروی حجمی در واحد حجم (Fm<sup>-3</sup>) نيروى الكتريكي (F) f ميدان مغناطيسي(F) Н h ضريب انتقال حرارت (Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>) ضريب انتقال حرارت متوسط (Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>) ħ k انرژی جنبشی (kJ)  $\mathbf{K}_{\mathrm{B}}$ ثابت بولتزمن طول (m) L تعداد الكترون  $n_{i,e}$ شار گرمایی (<sup>2-</sup>Wm) g Re عدد رينولدز

رير T دما(K)

(K) دمای متوسط (K

زمان (s)

سرعت (ms<sup>-2</sup>)

#### علائم يونانى

u

<sup>2</sup>0 نفوذپذیری سطح آزاد

<sup>2</sup>r نفوذپذیری محیط مورد نظر

ρ چگالی حجمی (kgm<sup>-3</sup>)

ر (Cm<sup>-3</sup>) چگالی حجمی بار الکتریکی (Pc

Ø پتانسیل الکتریکی(۷)

(m) طول دبای $\lambda_d$ 

 $\mu_0$  ضریب گذردهی مغناطیسی

(kgm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) ويسكوزيته توربولانس (

#### زيرنويسها

**b** بالک

**e** الكترون

ا ورودى

| خروجى     | 0 |
|-----------|---|
| توربولانس | t |
| مكان ممضع | x |

# 12- مراجع

- 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 Iaboratory, 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 & Fliuds*, 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, 35<sup>th</sup>, 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).

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-06