

ماهنامه علمى پژوهشى

ں م**کانیک مد**رس



کنترل دما و جدایش جریان درلولههای U شکل با استفاده از محرک پلاسمایی DBD

سهراب خانیان¹، نیکی رضازاده^{2*}

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار 2 - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار *سبزوار، صندوق پستی n.rezazadeh@hsu.ac.ir ، 9617976487

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در جریانهای با رینولدز بالا داخل لولههای U شکل پدیدهی جدایش در قسمت انحنای لولهها رخ میدهد که موجب افت فشار و درحالتهای	مقاله پژوهشی کامل ۱۲۰۰۰ علمان می ۱۵۵۹
همراه با انتقال حرارت موجب افزایش نامطلوب دمای سطح در آن ناحیه می شود این افزایش دما به علت کاهش نرخ انتقال حرارت از سطح به	دریافت: 15 اردیبهشت 1394 یذیرش: 31 مرداد 1394
سیال روی میدهد که در کاربردهای صنعتی علاوه بر کاهش انتقال حرارت موجب تخریب سطح لولهها میگردد. در کارحاضر حذف شدن ناحیه -	پ یو کی ارائه در سایت: 28 مهر 1394
ی جدایش به وسیلهی نیروی حجمی ایجاد شده توسط محرکهای پلاسمایی و به واسطهی آن گاهش ماگزیمم دمای رخ داده در این ناحیه و د. مدیر تنابع مدر کانت مدین این قابی قابی است از مار میزاند. میکناند این	كليد واژگان:
همچنین تعییرات عدد پخت مورد سبیه ساری قرار درفته است. برای این منظور محر کهای پاکسمایی ۲۲۸۷ و ۲۲۸۷ و ۲۶۸۷ با تابع ولار	محر ک پلاسماییUDD حدایش جایان
جدایش وماکزیم. دمای رخ داده در این نقطه بررسی شود. محاسبات با استفاده از مدل پیشنهادی سوزن با روش حل عددی به صورت وابسته به	دمای سطح
زمان انجام شده است و نتایج در طول زمان عملکردی 0تا50گزارش شده است. نتایج نشان میدهد ماکزیمم دمای سطح که در ناحیهی	حل وابسته به زمان
جدایش رخ میدهد در حضور عملگرهای پلاسمایی نزدیک این منطقه کاهش قابلتوجهی دارد که به علت حذف و تغییر منطقه جدایش است.	كنترل فعال جريان

Flow separation and temperature control in U- shape tube by using DBD plasma actuator

Sohrab Khanian, Niki Rezazadeh*

كانبك

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. *P.O.B.9617976487 Sabzevar, Iran, n.rezazadeh@hsu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT In flows with high Reynolds inside the U-shaped tubes, separation phenomenon occurs in the Original Research Paper Received 05 May 2015 curvature of tubes causing pressure loss and in conditions associated with heat transfer Accepted 22 August 2015 undesirable increase surface temperature in that region is noted. Due to reduced heat transfer rate Available Online 20 October 2015 from surface to fluid temperature increase occurs in industrial applications in addition to reduced heat transfer which causes damage to surface pipes. In the present study, elimination of the Keywords: separation zone through body force created by plasma actuators and because it reduces the Plasma actuator DBD maximum temperature occurred in this region and changes the Peclet number is simulationin this Flow separation Surface temperature region. For this purpose, the plasma actuators5kV, 12kV and 19kV with square voltage function Time dependent solution inside U-shaped tube in the three streams with Reynolds 3000,4500 and 6000 have been placed Active flow control to influence actuators on separation control, and maximum temperature occurred at this point be investigated.Calculations using proposed model of Suzen with time-dependent numerical procedure has been done. And results during time performance of 0 to 50 have been reported.

1 - مق*د*مه

در سالهای اخیر مطالعات و آزمایشهای زیادی توسط پژوهش گران به خصوص مهندسین مکانیک در زمینهی عملگرهای کنترل فعال جریان صورت گرفته است. مطالعاتی که با اعمال تغییر در جریان سیال سعی در بهبود شرایط مطابق با اهداف کنترل دارند. در بسیاری از ساختهای مکانیکی که در معرض جریان سیال قرار دارند پدیدهی جدایش رخ میدهد که یکی از

1- Dielectric Barrier Discharge

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S, Khanian, N, Rezazadeh, Flow separation and temperature control in U- shape tube by using DBD plasma actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 151-161, 2015 (In Persian)

در نتیجه استهلاک کمتر، وزن بسیار کم آنها و اینکه به شکل صفحه با ضخامت کم میباشند که این ویژگی سوم موجب می شود بتوان این محرکها را روی قطعات با اشکال پیچیده نصب کرد، آنها را به یکی از وسایل کنترل فعال جریان مورد توجه تبدیل کرده است. محرک پلاسمایی(DBD) از دو الكترود تشكيل شده است كه يكى متصل به زمين است و به الكترود ديگر كه در معرض هوا قرار دارد ولتاژ متناوب (AC) یا غیر متناوب (DC) در حد چند kV و فرکانسی در مقیاس چند kHz اعمال می شود. بین دو الکترود مادهای عایق معمولا از جنس کاپتون قرار دارد تا مانع از شکست الکتریکی زودهنگام هوا شود. مكانيزم اين روش به اين گونه است كه در حضور ميدان الكتريكي سیال دیالکتریک ابتدا دو قطبی شده و با افزایش شدت جریان یونیزه میشود. یونهای مثبت و منفی و الکترونها تحت تأثیر میدان الکتریکی شتاب می گیرند. برخورد این یون ها و الکترون ها با ذرات خنثی موجب می شود یون های جدید تولیدشده و با تکرار این روند یک تخلیه یونی به شکل بهمن یونی رخ دهد. با برخورد این یونها و الکترونها به ذرات خنثی سیال، مومنتم به سیال انتقال داده شده و منجر به حرکت سیال نزدیک سطح می شود. در شکل 1 نمایی کلی از یک محرک پلاسمایی DBD معمولی نشان داده شده است.

به خاطر قابلیت محرکها در اعمال نیروی حجمی و حذف کردن ناحیهی جدایش این محرکها در صنایع متفاوت کاربردهای بسیار متنوعی پیدا کرده است. به طور مثال کاهش صدا ناشی از حرکت سیال از روی موانع و حفرهها، مثلا صدای ناشی از محفظهی قرارگیری چرخهای هواپیما در حین بلند شدن و فرود را میتوان نام برد. در این راستا، لی و همکاران [1] در تحقیقی عملکرد محرکهای پلاسمایی را در جهت کاهش صدای تولیدشده به علت حرکت سیال روی یک استوانه را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند هرچه سرعت جریان افزوده میشود تأثیرگذاری محرکهای پلاسمایی کمتر شده و بهترین تأثیر گذاری در فرکانسهای زیر 6kHz روی میدهد. همچنین پتل و همکاران [2] درکاری تجربی محرکهای پلاسمایی را به چند شیوهی مختلف بر روی ماکت هواپیمایUCAV1303 نصب کردند. آنها نشان دادند که محرکهای پلاسمایی در مقایسه با فلپها و قسمتهای متحرک بال به شکل موثرتری ضریب لیفت را افزایش و ضریب درگ وارد بر بالها را کاهش میدهند. هالک و همکاران [3] واکنشهای محرکهای پلاسمایی را به تغییرات فشار به عنوان یک وسیله حساس به فشار برای کاربردهای اندازهگیری فشار مورد تحقیق قرار دادند. آنها نشان دادند ولتاژ مورد نیاز برای تولید پلاسما با افزایش فشار به شکل تقریبا خطی افزایش مییابد. از آنجا که برای کاربرد باراندمان بیشتر در صنعت ما نیاز به سرعت القایی بیشتر

يلاسما جريان سيال توليدي الکترود در معرض هوا

برای حذف گردابههای قویتر داریم در زمینهی بررسی رفتار پلاسمای محركها در شرایط مختلف تحقیقاتی انجام شد به طور مثال كاتسنی و همکاران [4] برای چهارموج ولتاژ سینوسی, مربعی, دندانهای مثبت و دندانهای منفی نشان دادند که تخلیه برای نیم سیکلهای مثبت و منفی متفاوت است واین تفاوت باعث تغییر در نیروی تولیدشده توسط محرک پلاسمایی میشود. بیشترین قدرت مصرفی را موج مربعی دارد درحالی که قدرت مصرفی موج سینوسی تقریبا نصف این مقدار است. دو موج دیگر دندانهای مثبت و دندانهای منفی در مقایسه با قابلیت ضعیف تحریک کنندگی میدان جریانی که از خود نشان میدهند قدرت مصرفی زیادی دارند. در زمینههای تغییر هندسه برای افزایش سرعت القایی نیز تحقیقاتی انجام شد از جمله تحقیق تجربی عرفانی و همکاران [5] که یک روش جدید در هندسهی الكترودهای پوشیده شدهی محرک پلاسماییDBD ارائه کردند. آنها نشان دادند برای رسیدن به سرعت بالا پهنای اولین الکترود پوشیده شده نزدیک الكترود ولتاژدار باید كمتر از 30% پهنای كل الكترودهای پوشیده شده باشد. همچنین چانگ و همکاران[6] به صورت تجربی میدان الکتریکی محرک پلاسمایی را از طریق تغییر زاویه بین الکترودها تغییر دادند. نتایج اثبات کرد که نیروی تولید شده توسط محرک با افزایش زاویهی بین الکترودها از90 درجه به 270 درجه تا حدود 50% نسبت به محركهاى متداول تحقيقاتي که روی یک صفحهی تخت نصب میشوند بهبود مییابد. در تحقیقی دیگر تطهیری و همکاران [7] تأثیر مانع دیالکتریک بر سرعت القایی در لایهی مرزی هوای ساکن را مورد بررسی قرار دادند. همچنین شمس طالقانی و همكاران [8] جابجایی زاویهی واماندگی ایرفویل NACA0012 توسط محرکهای پلاسمایی رامورد بررسی قرار دادند. پوریوسفی و همکاران [9] تأثیر تحریک پایا و ناپایا بر عملکرد محرکهای پلاسمایی را بررسی کردند. در تحقیقی دیگر مراد و همکاران [10] تأثیر محرکهای پلاسمایی بر سرعت احتراق متان و هوا را مدلسازی کردند ونیز جعفری و همکاران [11] نقش کنترلی محرکهای پلاسمایی را در لایهی مرزی مورد تحلیل قرار دادند. برای شبیهسازی عملکرد محرکهای پلاسمایی مدلهای عددی ارائه شد که می توان به مدل پل سنگ و همکاران [12] که در آن از فرمولهای شیمیایی یونها و نوعهای خنثی نیتروژن و اکسیژن استفاده میشد و روش عددی دیگری که توسط مامانور و همکاران [13] که در آن ذرات هوا را به سه بخش شامل یونهای یک ظرفیتی منفی , مثبت و الکترونها تقسیم می کرد و مدل ریاضیاتی که توسط سوزن [15،14] ارائه شد اشاره کرد. در تحقیقی دیگر ری هرد و همکاران [16] نشان دادند هرچه ولتاژ و تعداد محرکها افزایش مییابد سرعت ودبی جرمی افزایش مییابد. علاوه بر این میرزایی و شادآرام تاثیرات سیکل کاری عملگر پلاسمایی بر بهبود توزیع فشار حول ايرفويلNLFO414 [17] و نيز اثر اين محركها را بر كارايي همين ايرفويل در زاویهی پس از واماندگی [18] مورد بررسی قرار دادند. همچنین میرزایی

و صداقتی زمان پاسخ یک پرتابه به فرمانهای کنترلی را با این محرکها
[19] بهبود دادند. در خصوص جریان داخل لولههای U شکل و انتقال
حرارت در آنها نیز پژوهشهایی انجام شده است که با استفاده از روشهای
فعال و غیرفعال سعی در کنترل جریان برای حذف گردابهها، کاهش تنش و
افزایش انتقال حرارت در صنایعی چون سیستمهای خورشیدی [21،20] و
مبدلهای گرمایی [22] رادارند. از آنجا که در صنعت لولههای انتقالدهندهی
سیال همراه با انتقال حرارت در هندسهها و فیزیکهای جریانی بسیار متنوع،
به صورت بسیار گسترده مورد استفاده قرار میگیرند و استفاده از محرکهای

صفحه ی عایق الكترود متصل به زمين

شکل 1 نمایی کلی از یک تک محرک DBD مسطح

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

یلاسمایی DBD در لولههای U شکل به منظور کنترل دما مورد بررسی قرار نگرفته است و تنها برای کنترل جریان در داخل لولههای صاف یا با خم کم که جدایشی نداشته و بدون پدیدهی انتقال حرارت بودهاند به صورت تجربی انجام شده است [16] در این تحقیق ما به بررسی عملکرد محرکهای پلاسمایی DBD در حذف و تغییر موقعیت نقطهی جدایش و کنترل ماکزیمم دمای رخ داده در ناحیهی جدایش در لولههای U شکل میپردازیم.

در انحنای لوله ناحیهی جدایش قابل توجهی رخ میدهد که این جدایش موجب افت فشار و کاهش نرخ انتقال حرارت در ناحیهی جدایش و به سبب آن افزایش شدید دمای سطح در آن نقطه می شود، محرک های پلاسمایی در ناحیهی ایجاد جدایش قرار داده شده است تا میزان تأثیر محرک بر این پارامترها بررسی شود. نتایج نشان میدهد که محرکهای DBD قادرند تا سرعتهای ورودی بالایی جدایش رخ داده در انحنای لوله را برطرف کنند و همچنین دارای قدرت و قابلیت بسیار بالایی در کنترل دمای سطح در فیزیکهای همراه با انتقال حرارت میباشند و به صورت بسیار چشم گیری ماکزیمم دمای رخ داده در سطح (به علت وجود جدایش) در منطقهی گردابه را کاهش دهند.

2- فرمولهای حاکم بر حل عددی و شبیهسازی

زمــانی کــه نیــروی الکترومغنــاطیس نــاچیز فــرض شــود نیــروی الکتروهیدرودینامیک به صورت زیر نوشته میشود.
(1)
$$\vec{f} =
ho_c \vec{E}$$

 $ar{E}$ که f نشان دهندهی نیـروی حجمـی در واحـدحجم، $ho_{
m c}$ چگـالی بـار و $ar{f}$ میدان الکتریکی است. چون در پلاسما از تغییرات میدان مغناطیسی صرفنظر میشود معادلهی ماکسول به صورت زیر نوشته میشود [24,23]. $\nabla \times E = \mathbf{0}$ (2)

در نتیجه میدان الکتریکی از گرادیان یک تابع عددی بدست میآید. (3) $\vec{E} = -\nabla \Phi$

از قانون گاوس داریم:

- $\nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}) = \rho_c$ (4)
- $\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \phi) = -\rho_{\rm c}$ (5)
- (6) $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$

که در رابطهی فوق*6*واحد اندازه گیری الکتریسیته فضای آزاد و*٤*واحـد اندازه گیری الکتریسیته فضای نسبی متوسط است چون ذرات هوا به سختی یونیزه می شوند تابع پتانسیل Φ به دو بخش، پتانسیل ناشی از ولتاژ بکار برده شده \emptyset و پتانسیل ناشی از چگالی ذرات باردار در پلاسما φ تقسیم میشود. (7) $\phi = \phi + \phi$

ولتاژ اعمالشده روی الکترود در معرض هوا به عنوان شرایط مرزی به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \phi) = \mathbf{0} \tag{11}$$

برای میدان الکتریکی تولید شده توسط ذرات باردار معادلهی دیگری به صورت زیر نوشته میشود.

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \varphi) = -(\rho_c / \varepsilon_0)$$
(12)

شرایط مرزی و ناحیهی محاسباتی برای معادلهی 11 در شکل 2 نشان داده شده است.

$$\lambda_{\rm d} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{e^2 n_0}} \sqrt{\frac{k T_{\rm i} T_{\rm e}}{T_{\rm i} + T_{\rm e}}}$$
(13)

برای چگالی بار در هر نقطه داخل پلاسما داریم:
(
$$e\phi$$
) منه $en_0 \begin{bmatrix} e\phi \\ e\phi \end{bmatrix}$ برای جگالی بار در $e\phi$

 $\frac{\rho_{\rm c}}{2} = \frac{e_{\rm VL}}{2}$ (14) $\frac{1}{\varepsilon_0} \left[\exp\left(\frac{\tau}{kT_i}\right) + \exp\left(\frac{\tau}{kT_c}\right) \right]$ \mathcal{E}_0 جایی که $n_{
m c}$, $n_{
m e}$, $n_{
m c}$, $n_{
m c}$, $n_{
m c}$, $n_{
m i}$, e جایی که $n_{
m c}$, $n_{
m i}$, $n_{
m c}$, $n_{
m i}$, $n_{
m c}$ دانسیتهی الکترونها، چگالی زمینهی پلاسما و ثابت بولتزمن می باشند. با

سادهسازی معادلهی 14 توسط بسط تیلور [18] و جایگذاری طول دیای در آن در نهایت معادلهی 12 به صورت زیر نوشته میشود.

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

شرایط مرزی برای معادلهی 15 در شکل3 نشان داده شده است برای انجام فرایند شبیهسازی ماکزیمم ولتاژ برابر با $5 \ {
m kV} = 5 \ {
m gmax}$ و فرکانس برابر با 4/5kHz فرض میشود. مقدار $arepsilon_{
m r}$ برای کاپتون برابر با 2/7 در نظر ω =4/5kHz با گرفته می شود. در ناحیهی روی الکترود متصل به زمین، پایین دست الکترود در معرض هوا چگالی بار به صورت زیر تعریف می شود.

$$\rho_{c,w(x,t)} = \rho_c^{\max} G(x) f(t) \quad (16)$$

$$\text{ The statestime of the statestime$$

$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$
(17)

$$c_{c} \text{ max} f(t) = \rho_c^{\max} f(t)$$
(18)

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

که $ho_{
m c}^{
m max}$ ماکزیمم چگالی بار در ناحیه و برابر با $ho_{
m c}^{
m max}$ ماکزیمم چگالی بار در ناحیه و ا حل مدل سوزن در حالت ولتاژ متناوب یا کلی تر وابسته به زمان سنگین بوده و به خاطر این موضوع فرمولها به صورت بی بعد با شرایط مرزی نشان داده شده در شکل 4 در مقالهی دوم ایشان پیشنهاد شد.





 $\phi(t) = \phi^{\max} f(t)$ (8) قسمت زمانی تابع تولید موج ولتاژ را میتوان به صورت سینوسی یا مربعی به صورت زیر فرض کرد. $f(t) = \sin(2\pi\omega t)$ (9) $f(t) = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}$ $sin(2\pi\omega t) \geq 0$ (10) $sin(2\pi\omega t) < 0$ در رابطهی فوق ω فرکانس و ϕ^{\max} دامنهی موج است. برای میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمال شده به الکترودها معادله ی زیر استفاده شده است.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11



شکل 3 شرایط مرزی و ناحیهی محاسباتی برای معادلهی 15



شکل 4 شرایط مرزی مدل سوزن در حالت بیبعد

به خاطر سنگین بودن حل و این موضوع که حل به صورت بیبعد کلیتر است در این مقاله تمامی روندهای شبیهسازی با حل فرمول ها به صورت بدون بعد انجام شده است.

3- اعتبارسنجي

به منظور اعتبارسنجی مراحل حل عددی به دو بخش تقسیم میشود که شامل ابتدا اثبات صحت پیادهسازی مدل سوزن و سپس اعتبارسنجی اعمال مدل سوزن در لوله متناسب با شرایط مرزی حاکم بر فیزیک جریانهای جاری در لوله به وسیلهی مقایسه با کار تجربی ری هرد [16] است. حل عددی با استفاده از روش المان محدود انجام شده است و برای برقراری شرط استقلال از شبکه از چهار نوع مدل مش استفاده شده است. همان گونه که در جدول 1 دیده می شود تفاوت درصد خطای مشرهای با 1907 و 71673 سلول برابر با 3/0درصد است و این نشان می دهد که از مش با 45091 سلول برابر از مش نوع 4 استفاده شده است. در تمامی مراحل حل برای دقت بالاتر از مش نوع 4 استفاده شده است. در تمامی مراحل حل برای سلول به بعد شرط استقلال از شبکه برقرار است. در تمامی مراحل حل برای سلول به تو این نوع 4 استفاده شده است. در تمامی مراحل ما برای سلول به تو این نوع 4 استفاده شده است. در تمامی مراحل حل برای موازن به ترتیب در شکل 5 و 6 نشان داده شده است. در تحقیق حاضر مدل سوزن را به صورت بی بعد و وابسته به زمان حل کرده ایم و خطوط جریان و

ماکزیمم سرعت1m/s حاصل از شبیه سازی ما در شکل 7 نشان داده شده است. همچنین در شکل 8 پروفیل سرعت حاصل از کار عددی با پروفیل سرعت کار تجربی سنتناکریشنن مقایسه شده است و در صد خطای نتایج برابر با 1/6 است. پروفیل های سرعت حل عددی حاصل از مش مدل 4 و کار تجربی ری هرد [16] در نقطهی x=3/75cm در حالت استفاده از یک جفت محرک در شکل 9 باهم مقایسه شده است که دارای درصد خطایی برابر با 1/2 است.

4 - فرمولهای کوپل شده با مدل سوزن

در این حل عددی سه دسته فرمول ها شامل فرمول های مدل سوزن، فرمول ناویراستوکس برای جریان توربولانس و فرمول انرژی به صورت کوپل با یکدیگر حل میشوند. سیال داخل لوله هوا در نظر گرفته شده است در معادله های ناویراستوکس به خاطر اینکه عدد ماخ زیر 0/3 است سیال را تراکم ناپذیر فرض کرده ایم و برای حل، عدد توربولانسی 0/03 انتخاب شده است. شرط ورودی سرعت ثابت و خروجی فشار ثابت قرار داده شده است. همچنین عدد رینولدز با استفاده از فرمول زیر بدست آمده است.

مش	مدل	چهار	براى	خطا	درصد	مقايسەي	جدول 1	
----	-----	------	------	-----	------	---------	--------	--

درصد خطای شکل9	متوسط نرخ رشد	تعداد سلول محاسباتى	مش
3/6	1/379	16407	1
2/4	1/315	32659	2
1/5	1/337	45091	3
1/2	1/326	71673	4



شکل 5 خطوط جریان حاصل از کار تجربی،ماکزیمم سرعت1m/s.



مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11





شکل 7 خطوط جریان حاصل از کار شبیه سازی ما، ماکزیمم سرعت 1 m/s



شکل 8 پروفیل های سرعت حاصل از حل عددی و کار تجربی سنتناکریشنن



شکل 9 پروفیل های سرعت حاصل از حل عددی و کار تجربی ری هرد

مدل سوزن است و
$$k$$
 انرژی جنبشی توربولانسی و ا ماتریس همانی است.
برای معادله انرژی مورد استفاده داریم.
(21) $\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T)$ (21)
برای هوای ورودی شرط دما ثابت برابر با 293k در نظر گرفته شده
است.

5- هندسهي لوله و استقرار محرك يلاسمايي

لولههای U شکل متداول دارای قطر*d*=3 cm و فاصلهی اتصال گلوییها برابر با *M*=2cm می باشـند در شـکلهـای 10 و 11هندسـهی لولـه U شـکل و محرک پلاسمایی کارشده به طور کامل نشان داده شده است. در شکل10، R=4cm و L=8cm است و از مرزهایی که به صورت درشت نقطهچین شده است شار گرمایی در حدود 1000w/**m**² خارج میشود. این شار به صورت دریافتی از سطح است.

6- نتايج

در شکل12دو منطقهای که جدایش رخ میدهد نشان داده شده است و منطقه جدایش مورد بررسی در مقاله با فلش مشخص شده است. در شکل 13 ناحیهی جدایش در رینولدز 6000 نشان داده شده است. هنگامی که ولتاژ برابر با Ø^{max} = 5kV با موج مربعی به محرک اعمال میشود نیرویی در جهت پاییندست جریان ایجاد می شود که با جریان بر گشتی گردابه یاد ساعتگردکه نزدیک مرز به سمت بالا حرکت میکند مخالفت میکند نیروی ایجاد شده توسط محرک در ناحیهی بین دو الکترود دارای مقدار بزرگتری می باشد و موجب میشود که بر جریانی که به سمت بالا حرکت میکند غلبه کند و در ناحیهی کوچک بین دو الکترود جریان با سرعتی قابل توجه ولی در حجم کم در جهت منفی محور ۷ به وجود بیاید وچون در بالادست و پایین



شكل 10 هندسەي لولەي U شكل





مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

دست این ناحیه جهت جریان به سمت بالا است در این ناحیه گردابهای با جهت ساعت گرد بوجود میآید و یک گردابهی پادساعتگردی که در ولتاژ صفر وجود داشت به دو گردابهی پادساعتگرد و یک گردابهی ساعتگرد تقسیم میشود. با افزایش ولتاژ قدرت گردابهی ساعتگرد زیادتر شده و در ولتاژ V18k قسمت عمدهای از این گردابه به جریان اصلی پیوسته و به تدریج دو گردابه باقی میماند. همچنین با افزایش ولتاژ گردابهی پایینی به تدریج به سمت پاییندست جریان اصلی حرکت میکند و از قدرتش کاسته میشود. در شکل 14 دیده میشود که در رینولدز 4500 هنگامی که ولتاژ را افزایش میدهیم مثلا در ولتاژ V18 نه تنها گردابهی میانی از بین میرود بلکه چون سرعت داخل لوله در رینولدز 4500 هنگامی که ولتاژ رینولدز 6000 است سبب میشود گردابهها نیز به جز گردابهی میانی(قدرت گردابهی میانی به مقدار زیادی وابسته به ولتاژ است و نه سرعت جریان پاییندست جریان با افزایش ولتاژ از بین برود.

در شکل 15 دیده میشود که در رینولدز 3000 همـهی گردابـههـا در ولتاژ 19kV از بین میروند. همچنین دیده می شود که هوا به سمت محرک کشیده می شود و بعد در جهت پایین دست جریان به آن نیرو وارد می شود. در نمودارها اگر حرکت جریان در جهت مثبت محورها باشد سرعت با علامت مثبت و در غیر این صورت با علامت منفی مشخص شده است. در شکل16 دیده می شود با افزایش ولتاژ حرکت جریان به واسطه ی گردابه در جهت مثبت محور y متوقف شده و در جهت منفی y بر مقدارش افزوده می شود در ضمن دیده میشود که بیشترین نیروی حجمی در نزدیکی سطح روی میدهد و با فاصله گرفتن از سطح نیروی تولیدشده توسط محرک پلاسمایی به شدت کاهش می یابد. در شکل 17 دیده می شود که به دلیل کاهش قدرت گردابهها که بخاطر کاهش عدد رینولدز رخ داده است، شاهد افزایش مقدار سرعت نزدیک مرز دیواره نسبت به پروفیلهای شکل16 هستیم. در نمودارهای 16و 17و 18 دیده می شود که در نزدیکی نقطهی *x*=-3/17 به خاطر این که نقطهی مرکز گردابهی ساعت گرد است سرعت به صفر می رسد و در فاصلهی کوچکی بالای این ناحیه علامت سرعت مثبت میشود به این دلیل که آن قسمت، ناحیهی بالایی گردابه است. پس از شکلهای 16، 17 و





18 نتیجه می شود در گردابه ی میانی سرعت قسمت های نزدیک به دیواره نسبت به قسمت های دیگر بسیار بیشتر است. چون جریان اصلی و جریان بازگشتی تولید شده ناشی از گردابه ی میانی نزدیک سطح هردو در جهت هم میباشند ولی در قسمتی ازگردابه که از سطح دورتر است این دو جریان درخلاف جهت یکدیگر میباشند و در نهایت موجب می شود اندازه یا قدر مطلق سرعت قسمت های دورتر از سطح (سطح لوله) گردابه ی میانی کمتر شود. همچنین دیده می شود که هرچه عدد رینولدز افزایش می یابد قدرت گردابه ها هم افزایش یافته و در نتیجه سرعت جریان القایی نزدیک سطح

ىش مىيابد از مقايسه شكلهاى20،19و21 نتيجه مىشود كه بـه دليـل	کاھ
که هرچه عدد رینولدز کاهش مییابد قدرت گردابههای پاد ساعت گرد هم	اینک
مش مییابد محرک قادر میشود ناحیهی بیشتری را تحت تأثیر خود قرار	کاھ
د. همچنین دیده میشود بـا افـزایش ولتـاژ نقطـهی جـدایش بـه سـمت	دهد
یندست جریان منتقل میشود.	پايي
در شکلهای 23،22و24 نمودارهای دمای سطح لولـه در سـمتی کـه	
رک پلاسمایی قرار دارد رسم شده است دیده میشود که از قسمت میـانی	مح
ترود ولتاژدار به بعددرجهت منفی محورy ما کاهش قابل توجه دمای سطح	الك

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11



کاهش می یابد که از یک مقدار ولتاژ خاص به بعد در آن نقطه مینیمم دمای سطح مشاهده می شود. در شکل 22 دیده می شود از قسمت میانی الکترود ولتاژدار تا قسمت

انتهایی آن (در جهت منفی محور ۷) افزایش ولت اژ سبب میشود سرعت گردابه 1 (گردابه ی میانی) که در این ناحیه قرار دارد افزایش پیدا کندچون ناحیه ی بین دو الکترود به واسطه میدان الکتریکی، سیال را از روبرو به سمت خود می کشد و به سمت پایین دست جریان پرتاب می کند و قسمت پایینی گردابه ی 1 در این ناحیه قرار دارد و جهت حرکت این قسمت از گردابه موافق با این نیروهایی مکشی و پرتابی است در نتیجه با افزایش ولت اژ بر سرعت گردابه ی میانی افزوده می شود و هرچه سرعت افزایش پیدا کند دمای سطح کاهش بیشتری می یابد. در شکل های 23 و 24مشاهده می شود در ناحیه وسط تا انتهای الکترود



شکل 16 پروفیل مؤلفهی سرعت در جهت y (v) در عدد رینولدز 6000 در نقطهی1/22-*y (*ناحیهی بین دو الکترود)

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

157

8-3.35

-3.3

-3.25



	×-3.35			0.50	-	
نیز تغییر چندانی نم <i>ی ک</i> ند.	-3.3 -				÷.	
هنگامی که ولتاژ افزایش مییابد نیروی مکش بین دو الکترود علاوه بـر	-3.25 -					
اینکه به گردابهی 1 سرعت میدهد باعث میشود که مرکز گردابهی 1به	-3.2 -					
سمت ناحیهی بین دو الکترود کشیده شـود در نتیجـه بـا افـزایش ولتـاژ بـه	-3.15 -					
گ دایدای کوچکت ولی قدرت زیادتہ تبدیل مے شود و در نمایت با کے حکت	-3.1 -					
	-3	1	1			
	-2	-1.5	-1 $v(m/s)$	-0.5	0	
ا کمبر است و این موضوع همچنین باعث می شود مرکز کردابهی آ سریغ بر			v (m/s)			
به ناحیهی بین دو الکترود کشیده شود موجب میشود کـه گردابـهی 1 در	ولدز 6000، در	ر (<i>۷</i>) در عدد رین	رعت در جهت /	ل مۇلفەى سر	شكل 19 پروفي	
	زمين)	كترود متصل به	حیهی انتهایی ال	یy=−1/9 (نا<	نقطهى	

-3.6

-3.55

-3.5

(H) -3.45

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

158

ولتاژهای پایین تری نابود شود. در نیمهی ابتدایی الکترود ولتاژدار مقدار دما با تغییر ولتاژ تغییر چشمگیری نمی کند زیرا در این ناحیه اندازه سرعت چه هنگامی که محرک خاموش بوده و یک گردابه وجود دارد و چه هنگامی که محرک روشن شده و گردابهی کوچکی در آن ناحیه قرار دارد و یا در رینولدزهای کوچکتر که گردابه برطرف شده است، سرعت بسیار پایین است و تغییری در انتقال حرارت و در نتیجه دمای سطح ایجاد نمی شود.

در شکل 22 در بازهی (2- ,8-) هر چه ولتاژ زیادتر می شود دمای سطح بیشتر می شود ولی در شکل 24 در ولتاژ 19 kV دمای سطح از همیه کمتر شده است چون در شکل 24 گردابهی 3 نابودشده و افزایش ولتاژ موجب سرعت گرفتن سیال در جهت پاییندست جریان و در نتیجه کاهش دمای سطح شده ولی در شکل 22 افزایش ولتاژ موجب ایجاد نیرو در خلاف جهت جریان برگشتی و در نتیجه کاهش سرعت جریان برگشتی شده است که در نتیجه سبب افزایش دمای سطح می شود.

در شکلهای 25 و 26 نمودارهای سه بعدی دما در حالتهایی که به ترتیب محرک خاموش و روشن است رسم شدهاند دیده می شود که در ناحیهی گلویی لوله (ناحیه 1) افزایش دما رخ میدهد که به دلیل جدایش اتفاق افتاده در این ناحیه است. در ناحیهی قرارگیری محرک پلاسمایی (ناحیهی 2) محدودهی دما بالای گستردهتر و با ماکزیمم دمای بیشتری



 $-\Delta t = 50 \text{ s}, 19000 (V)$

430

420



شکل 24 نمودار دمای سطح لوله در قسمت قرارگیری محرک، رینولدز3000





مشاهده می شود. هنگامی که محرک روشن می شود در ناحیه ی 2 کاهش





دمای قابلتوجهی رخ میدهد و یک ماکزیمم دمای در حالت خاموش در
ناحیهی 2 تبدیل به دو ماکزیمم دما با مقدار کمتر ویک مینیمم دما در این
ناحیه میشود. اگر تعداد بیشتری محرک پلاسمایی در قسمت پاییندست
ناحیهی 2 قرار دهیم ماکزیمم دما به سمت خروجی نزدیک تر شده و از
مقدارش کاسته میشود در کل میتوان با افزایش تعداد محرکها افزایش دما
در ناحیهی 2 را به طور کامل از بین برد.
در شکلهای 27، 28و 29 نمودارهای پکلت روی دیوارهای که تغییرات
دمایش بحث شد رسم شده است. پکلت یک عدد بدون بعد است که بـه بیـان
نفوذ گرمایی سیال میپردازد و دارای فرمول زیر است.



$$\mathbf{Pe} = \mathbf{Re} \cdot \mathbf{Pr} = \frac{\rho V L C_{\mathrm{P}}}{k}$$
(22)

که در آن L طول مشخصه، $C_{\rm P}$ ظرفیت گرمایی ویژه ، k ضریب هدایت و Re عدد رینولدز در لوله است. با توجه به معادله ی (22) هرچه سرعت افزایش می یابد نفوذ حرارت نیز افزایش می یابد. در شکل 27دیـده مـیشـود مقدار عدد پکلت در قسمت میانی و لبههای الکترود ولتاژدار به مقدار مینیممی میرسد چون در ابتدای الکترود جریان اصلی به بر آمدگی الکترود در معرض هوا برخورد می کند و سرعتش به مقدار زیادی کاهش پیدا می کند و در وسط الکترود در معرض هوا به خاطر اینکه جدایش رویداده و گردابه از آن مکان شروع می شود سرعت به صفر نزدیک شده و همچنین در قسمت انتهایی الکترود در معرض هوا به دلیل اینکه جریان برگشتی به برآمدگی الكترود برخورد مىكند سرعتش به مقدار زيادى كاسته مىشود چون طبق فرمول كاهش سرعت موجب كاهش يكلت مي شود مادر اين سه نقطه شاهد مینیمم عدد پکلت هستیم. درشکلهای 28،27و29 میبینید که در بازهی (1 - و2-) روى سطح دىالكتريك با افزايش ولتاژ عدد يكلت افزايش يافته كه این به خاطر نیروی حجمی است که محرک ایجاد کرده و مقدار مینیمم چهارم که در این شکلها رخ داده است به این علت است که در رینولدزهای 6000و4500 گردابهی 1از بین نرفته و از نقطه ی 1-=y شروع شده و تا2-=y ادامه دارد و مینیمم پنجم در رینولدزهای 6000و4500 به خاطر وجود انتهای گردابه در نقطهی y=-4 است. در شکل 29 این مینیمم پنجم هنگامی که ولتاژ اعمال می شود وجود ندارد که آن به این دلیل است که هنگام اعمال ولتاژ گردابهی سوم به خاطر قدرت کم در رینولدز 3000 به سرعت از بین می رود. در شکل های 27و28 در بازهی (2- ,4-) با افزایش ولتاژ نیروی حجمی در خلاف جهت حرکت جریان برگشتی افزایش می یابد و موجب کاهش سرعت و در نتیجه کاهش عدد یکلت می شود ولی در رینولدز 3000 چون در همان ولتاژهای کم گردابهی سوم از بین می رود و فقط یک جریان با سرعت کم در جهت پاییندست جریان داریم که با افزایش ولتاژ نیروی حجمی بیشتری به آن القا میشود و در نتیجه سرعتش افزایش می-یابد و عددپکلت آن نیز افزایش پیدا می کند.

7- نتيجه گيري

محرکهای پلاسمایی به خوبی قادرند تا جدایش و گردابههای ایجاد شده در لولههای U شکل و به طور کلی لولههای منحنی شکل را بر طرف کنند. این محرکها وقتی بالاترین کارایی را از خود نشان میدهند که در ناحیهی جدایش نصب شوند زیرا در این نقطه سرعت کم بوده و سرعت القا شده توسط محرک میتواند در جریان تغییرهای مطلوب را ایجاد کند. بیشترین نیروی حجمی درهر رینولدز در ناحیهی بعد الکترود ولتاژدار رخ میدهد و الکترودها باید به گونهای قرار گیرند که ناحیهی هدف برای کاهش دما یا برطرف کردن جدایش بعد از الکترود در معرض هوا به خصوص در قسمت

ست علائم	8- فهر	میانی دو الکترود قرار گیرد. همان طور که دیده شد دمای سطح در فاصـلهی
بار مقدماتی(C)	е	بین دو الکترود در حالتی که محرک خاموش اسـت مـاکزیمم مقـدار خـود را
میدان الکتریکی(N/c)	Ε	داراست درحالی که هنگام روشن شدن این ماکزیمم دما بـه حـدی کـاهش
نیروی حجمی در واحد حجم(N)	\overrightarrow{f}	مییابد که به مینیمم دما تبدیل میشود و چـون در بیشـتر صـنایع مشـکل
ثابت بولتزمن	k	اصلی این است که دمای نقطهای از سطح به شدت زیاد میشود در حالی که
دانسيتهي الكترونها(c/ m ³)	$n_{ m e}$	دمای نقاط دیگری در حد معمول اسـت اسـتفاده از محـرکـهـای پلاسـمایی
دانسیتهی یونها (c/ m ³)	$n_{ m i}$	بسیار کاربردی است زیرا این محرکها همان طور که مورد تحلیل قرار گرفت
عددپکلت	Ре	قادرند دمای ماکزیمم سطح را آنقدر کاهش دهند که حتی در مواردی شاهد
		مینیمم شدن دمای آن ناحیه باشیم.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11

- [11] J. Jafari, M. Safari, Y. Ahmadizadeh, B. Shokri, Air flow control in boundary layer with use of plasma actuators, *Journal of aeronautical engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 59-66, 2010 (In Persian).
- [12] K. P. Singh, S. Roy, Modeling plasma actuators with air chemistry for effective flow control, *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, No. 12, pp.123308, 2007.
- [13] M. Mamunuru, T. Simon, D. Ernie, U. Kortshagen, Plasma actuator simulation: Force contours and dielectric charging characteristics, in 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, USA, 2010.
- [14] Y. B. Suzen, P. G. Huang, D.Ashpis, Numerical simulations of flow separation control in low-pressure turbines using plasma actuators, in *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, USA, 2007.
- [15] Y. B. Suzen, P. G. Huang, J. D. Jacob, D. E. Ashpis, Numerical simulations of plasma based flow control applications, in *35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Toronto, Canada, 2005.
- [16] M. Riherd, S. Roy, Measurements and simulations of a channel flow powered by plasma actuators, *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, No. 5, pp.053303, 2012 .
- [17] A. S. 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, 2013 (In Persian).
- [18] A. Salmasi, A. Shadaram, M. Mirzaei, Numerical and 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, 2013 (In Persian).
- [19] M. Mirzaei, M. N. S, Improvement of projectile time response to control commands using plasma actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 118-124, 2013 (In Persian).
- [20] P. Y. Wang, H. Y. Guan, High temperature collecting performance of a new all-glass evacuated tubular solar air heater with U-shaped tube heat exchanger, *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, pp. 315-323, 2014.
- [21] R. Liang, L. Ma, Theoretical and experimental investigation of the filledtype evacuated tube solar collector with U tube, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 9 ,pp. 1735–1744, 2011.
- [22] B. Bouhacina, R. Saim, Analysis of thermal and dynamic comportment of a geothermal vertical U-tube heat exchanger, *Energy and Buildings*, Vol. 58, pp. 37-43, 2013.
- [23] J. R. Roth, D. M. Sherman, S. R. Wilkinson, Electrohydrodynamic flow control with a glow discharge surface plasma, *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, pp. 1166-1172, 2000 .
- [24] C. L. Enloe, T. E. Mclaughlin, R. D. VanDyken, K. D. Kachner, E. J. Jumper, T. C. Corke, M. Post, O. Haddad, Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator : geometric effects, AIAA Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 595-604, 2004.
- [25] C. L. Enloe, T. E. Mclaughlin, G. I. Font, J. W. Baughn, Parameterization of temporal structure in a single dielectric barrier aerodynamic plasma actuator, AIAA Journal, Vol. 44, No. 6, pp. 1127-1136, 2005
- [26] C. L. Enloe, T. E. Mclaughlin, R. D. VanDyken, J. C. Fischer, Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator, in 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2004.

- (K) دما بر حسب کلوین (K
 - (K) دمای یون (K)

علائم يوناني

(Coulomb/**m**³) چگالی بار (kgm-3) β چگالی (kgm-3)

$$(\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1})$$
لزجت ديناميكي (

9- مراجع

- [1] Y. Li, X. Zhang, X. Huang, The use of plasma actuators for bluff body broadband noise control, *Experiments in Fluids*, Vol. 49, No. 2, pp. 367-377, 2010.
- [2] M. P. Patel, T. T. Ng, S. Vasudevan, Plasma actuators for hingeless aerodynamic control of an unmanned air vehicle, *AIRCRAFT*, Vol. 44, No. 4, pp. 1264-1274, 2007.
- [3] M. M. Hollick, M. Arjomandi, B. S. Cazzolato, An investigation into the sensory application of DBD plasma actuators for pressure measurement, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 171, No. 2, pp. 102-108, 2011.
- [4] M. Kotsonis, S. Ghaemi, Forcing mechanisms of dielectric barrier discharge plasma actuators at carrier frequency of 625 Hz, *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, pp.11330, 2011.
- [5] R. Erfani, T. Erfani, S. V. Utyuzhnikov, Optimisation of multiple encapsulated electrode plasma actuator, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 120-127, 2013.
- [6] M. Cheong, B. G. A. Greig, An investigation into the effect of electric field on the performance of dielectric barrier discharge plasma actuators, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 8, pp. 1600-1607, 2011.
- [7] G. Tathiri, G. Pouryoussefi, A. Doostmahmoudi, M. Mirzaei, Experimental investigation of the effect ofdielectric barrier on induced velocity of quiescent air boundary layer with comparison of corona wind and AC-DC DBD plasma, *Journal of solid and fluid mechanics*, Vol. 4, No. 3, pp. 103-110, 2013 (In Persian).
- [8] S. A. S. S. Taleghani, A. Shadaram, M. Mirzaei, Experimental investigation of active flow control for changing stall angle of a NACA0012 airfoil using plasma-actuator, *Journal of fluid and aerodynamic mechanics*, Vol. 1, No. 1, pp. 89-97,2012 (In Persian).
- [9] G. Pouryoussefi, M. Mirzaei, Experimental investigation of the effect of steady and unsteady actuation on performance of plasma actuators for active flow control in boundary layer, *Journal of fluid and aerodynamic mechanics*, Vol. 3, No. 2, pp. 51-62, 2014 (In Persian).
- [10] E. Ebrahimi, Morad, M. Payande, Numerical modeling affect plasma actuator intemperature field and velocity turbulent combustion CO4 and air, *ICHMT*, pp. 1-7, 2014 (In Persian).

161

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11