



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

سهراب خانیان¹، نیکو رضازاده^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

* سبزواری، صندوق پستی 9617976487، n.rezazadeh@hsu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 اردیبهشت 1394
پذیرش: 31 مرداد 1394
ارائه در سایت: 28 مهر 1394

کلید واژگان:

محرک پلاسمایی DBD

جدایش جریان

دمای سطح

حل وابسته به زمان

کنترل فعال جریان

چکیده

در جریان‌های با رینولدز بالا داخل لوله‌های U شکل پدیده‌ی جدایش در قسمت انحنای لوله‌ها رخ می‌دهد که موجب افت فشار و درحالت‌های همراه با انتقال حرارت موجب افزایش نامطلوب دمای سطح در آن ناحیه می‌شود این افزایش دما به علت کاهش نرخ انتقال حرارت از سطح به سیال روی می‌دهد که در کاربردهای صنعتی علاوه بر کاهش انتقال حرارت موجب تخریب سطح لوله‌ها می‌گردد. در کار حاضر حذف شدن ناحیه‌ی جدایش به وسیله‌ی نیروی حجمی ایجاد شده توسط محرک‌های پلاسمایی و به واسطه‌ی آن کاهش ماکزیمم دمای رخ داده در این ناحیه و همچنین تغییرات عدد پکلت مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. برای این منظور محرک‌های پلاسمایی 5kV، 12kV و 19kV با تابع ولتاژ مربعی داخل لوله‌ی U شکل در سه جریان با رینولدزهای 3000، 4500 و 6000 قرار داده شده‌اند تا میزان تأثیر عملگر بر روی کنترل جدایش و ماکزیمم دمای رخ داده در این نقطه بررسی شود. محاسبات با استفاده از مدل پیشنهادی سوزن با روش حل عددی به صورت وابسته به زمان انجام شده است و نتایج در طول زمان عملکردی 0 تا 50 گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد ماکزیمم دمای سطح که در ناحیه‌ی جدایش رخ می‌دهد در حضور عملگرهای پلاسمایی نزدیک این منطقه کاهش قابل توجهی دارد که به علت حذف و تغییر منطقه جدایش است.

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

Sohrab Khanian, Niki Rezazadeh*

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

*P.O.B.9617976487 Sabzevar, Iran, n.rezazadeh@hsu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 May 2015
Accepted 22 August 2015
Available Online 20 October 2015

Keywords:

Plasma actuator DBD
Flow separation
Surface temperature
Time dependent solution
Active flow control

ABSTRACT

In flows with high Reynolds inside the U-shaped tubes, separation phenomenon occurs in the curvature of tubes causing pressure loss and in conditions associated with heat transfer undesirable increase surface temperature in that region is noted. Due to reduced heat transfer rate 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 separation zone through body force created by plasma actuators and because it reduces the maximum temperature occurred in this region and changes the Peclet number is simulation in this region. For this purpose, the plasma actuators 5kV, 12kV and 19kV with square voltage function inside U-shaped tube in the three streams with Reynolds 3000, 4500 and 6000 have been placed 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. The results shows that maximum surface temperature that occurs in the region of separation in the presence of plasma actuator near this region has a significant reduction that is due to the elimination and change separation region.

1- مقدمه

دلایل آن کاهش مومنتم در لایه‌ی مرزی است. محرک‌های پلاسمایی قادر هستند تا مومنتم قابل توجهی را به لایه‌ی مرزی اعمال کنند. یکی از این عملگرها که به تازگی مورد بررسی بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است محرک‌های پلاسمایی DBD¹ است این محرک‌ها به علت سرعت واکنش بالا نسبت به تغییرات داده‌شده از سوی مدار کنترل کننده، غیر متحرک بودن و

در سال‌های اخیر مطالعات و آزمایش‌های زیادی توسط پژوهشگران به خصوص مهندسیین 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:

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)

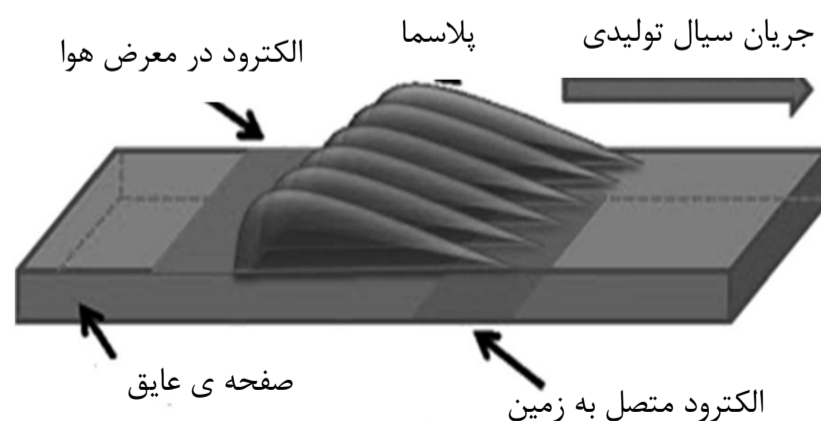
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

برای حذف گردابه‌های قوی‌تر داریم در زمینه‌ی بررسی رفتار پلاسمای محرک‌ها در شرایط مختلف تحقیقاتی انجام شد به طور مثال کاتسنی 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 و این تفاوت باعث تغییر در نیروی تولیدشده توسط محرک پلاسمایی می‌شود. بیشترین قدرت مصرفی را موج مربعی دارد در حالی که قدرت مصرفی موج سینوسی تقریباً نصف این مقدار است. دو موج دیگر دندانه‌ای مثبت و دندانه‌ای منفی در مقایسه با قابلیت ضعیف تحریک‌کنندگی 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 الکترودهای پوشیده شده‌ی محرک پلاسمایی DBD ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند برای رسیدن به سرعت بالا پهنای اولین الکتروده پوشیده شده نزدیک الکتروده ولتاژدار باید کمتر از 30% پهنای کل الکترودهای 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 از 90 درجه به 270 درجه تا حدود 50% نسبت به محرک‌های متداول تحقیقاتی که روی یک صفحه‌ی تخت نصب می‌شوند بهبود می‌یابد. در تحقیقی دیگر تظہیری و همکاران [7] تأثیر مانع دی‌الکتریک بر سرعت القایی در لایه‌ی مرزی هوای ساکن را مورد بررسی قرار دادند. همچنین شمس طالقانی و همکاران [8] جابجایی زاویه‌ی واماندگی ایرفویل NACA0012 توسط محرک‌های پلاسمایی را مورد 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 و نیز 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 می‌توان 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 می‌کرد و مدل ریاضیاتی که توسط سوزن [14، 15] 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 تأثیرات سیکل کاری عملگر پلاسمایی بر بهبود توزیع فشار حول ایرفویل NLF0414 [17] و نیز اثر این محرک‌ها را بر کارایی همین ایرفویل 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 [20، 21] و مبدل‌های گرمایی [22] را دارند. 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

در نتیجه استهلاک کمتر، وزن بسیار کم آن‌ها و اینکه به شکل صفحه با ضخامت کم می‌باشند که این ویژگی سوم موجب می‌شود 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 الکتروده تشکیل شده است که یکی متصل به زمین است و به الکتروده دیگر که در معرض هوا قرار دارد ولتاژ متناوب (AC) یا غیر متناوب (DC) در حد چند KV و فرکانسی در مقیاس چند kHz اعمال می‌شود. بین دو الکتروده ماده‌ای عایق معمولاً از جنس کاپتون قرار دارد تا مانع از شکست الکتریکی زودهنگام هوا شود. مکانیزم این روش به این گونه است که در حضور میدان الکتریکی سیال دی‌الکتریک ابتدا دو قطبی شده و با افزایش شدت جریان یونیزه می‌شود. یون‌های مثبت و منفی و الکترون‌ها تحت تأثیر میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند. برخورد این یون‌ها و الکترون‌ها با ذرات خنثی موجب می‌شود یون‌های 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 می‌شود. 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، مثلاً 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 تأثیرگذاری در فرکانس‌های زیر 6kHz روی می‌دهد. همچنین پتل و همکاران [2] در کاری تجربی محرک‌های پلاسمایی را به چند شیوه‌ی مختلف بر روی ماکت هواپیمای UC1303 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 پلاسمای با افزایش فشار به شکل تقریباً خطی افزایش می‌یابد. از آنجا که برای کاربرد بارانداز بیشتر در صنعت ما نیاز به سرعت القایی بیشتر



شکل 1 نمایی کلی از یک تک محرک DBD مسطح

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

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

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = -(\rho_c / \epsilon_0) \quad (12)$$

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

λ_d طول دمای است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{e^2 n_0}} \sqrt{\frac{k T_i T_e}{T_i + T_e}} \quad (13)$$

برای چگالی بار در هر نقطه داخل پلاسما داریم:

$$\frac{\rho_c}{\epsilon_0} = \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0} \approx -\frac{en_0}{\epsilon_0} \left[\exp\left(\frac{e\phi}{kT_i}\right) + \exp\left(\frac{e\phi}{kT_e}\right) \right] \quad (14)$$

جایی که e ، n_i ، n_e و n_0 به ترتیب بار مقدماتی، دانسیته‌ی یون‌ها، دانسیته‌ی الکترون‌ها، چگالی زمینه‌ی پلاسما و ثابت بولتزمن می‌باشند. با ساده‌سازی معادله‌ی 14 توسط بسط تیلور [18] و جایگذاری طول دمای در آن در نهایت معادله‌ی 12 به صورت زیر نوشته می‌شود.

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

شرایط مرزی برای معادله‌ی 15 در شکل 3 نشان داده شده است برای انجام فرایند شبیه‌سازی ماکزیمم ولتاژ برابر با $\phi^{\max} = 5 \text{ kV}$ و فرکانس برابر با $\omega = 4/5 \text{ kHz}$ فرض می‌شود. مقدار ϵ_r برای کاپتون برابر با 2/7 در نظر گرفته می‌شود. در ناحیه‌ی روی الکتروود متصل به زمین، پایین دست الکتروود در معرض هوا چگالی بار به صورت زیر تعریف می‌شود.

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

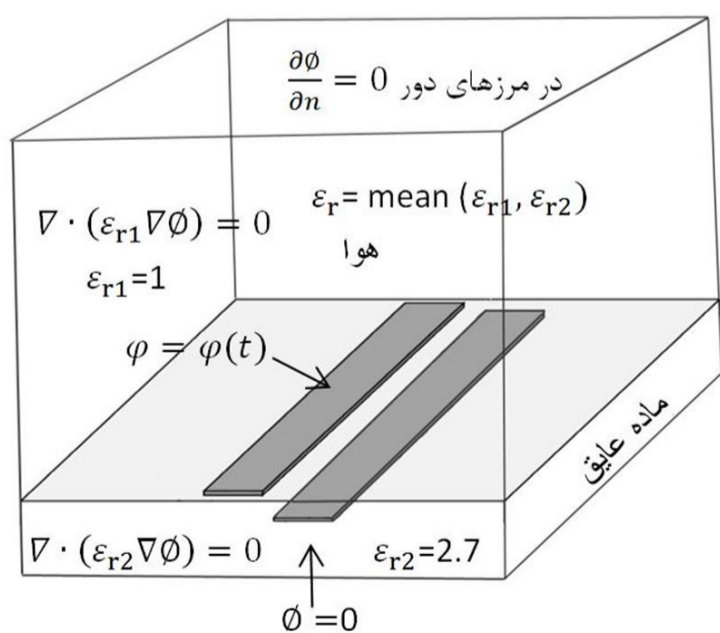
تابع $G(x)$ به گونه‌ای تعیین می‌شود که توزیع پلاسما روی الکتروود پایینی با دقت بهتری شبیه‌سازی شود. توزیع پلاسما شبیه توزیع نیمه گوسی است که با رابطه‌ی زیر نوشته می‌شود [26,25].

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

در شکل 3 مقدار ρ_c از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$\rho_{c,w}(x,t) = \rho_c^{\max} f(t) \quad (18)$$

که ρ_c^{\max} ماکزیمم چگالی بار در ناحیه و برابر با $0/0075 \text{ C/m}^3$ است. 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.



شکل 2 شرایط مرزی و ناحیه‌ی محاسباتی برای معادله‌ی 11

پلاسمایی DBD در لوله‌های LA 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 LA 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 می‌شود، محرک‌های 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 چشم‌گیری ماکزیمم دمای رخ داده در سطح (به علت وجود جدایش) در منطقه‌ی گردابه را کاهش دهند.

2- فرمول‌های حاکم بر حل عددی و شبیه‌سازی

زمانی که نیروی الکترومغناطیس ناچیز فرض شود نیروی الکترومغناطیس به صورت زیر نوشته می‌شود.

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

که \vec{f} نشان دهنده‌ی نیروی حجمی در واحد حجم، ρ_c چگالی بار و \vec{E} میدان الکتریکی است. چون در پلاسما از تغییرات میدان مغناطیسی صرف نظر می‌شود معادله‌ی ماکسول به صورت زیر نوشته می‌شود [24,23].

$$\nabla \times E = 0 \quad (2)$$

در نتیجه میدان الکتریکی از گرادیان یک تابع عددی بدست می‌آید.

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (3)$$

از قانون گاوس داریم:

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_c \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -\rho_c \quad (5)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (6)$$

که در رابطه‌ی فوق ϵ_0 واحد اندازه‌گیری الکتریسیته فضای آزاد و ϵ_r واحد اندازه‌گیری الکتریسیته فضای متوسط است چون ذرات هوا به سختی یونیزه می‌شوند تابع پتانسیل ϕ به دو بخش، پتانسیل ناشی از ولتاژ بکار برده شده ϕ و پتانسیل ناشی از چگالی ذرات باردار در پلاسما ϕ تقسیم می‌شود.

$$\phi = \phi + \phi \quad (7)$$

ولتاژ اعمال شده روی الکتروود در معرض هوا به عنوان شرایط مرزی به صورت زیر است:

$$\phi(t) = \phi^{\max} f(t) \quad (8)$$

قسمت زمانی تابع تولید موج ولتاژ را می‌توان به صورت سینوسی یا مربعی به صورت زیر فرض کرد.

$$f(t) = \sin(2\pi\omega t) \quad (9)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1 & \sin(2\pi\omega t) \geq 0 \\ -1 & \sin(2\pi\omega t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه‌ی فوق ω فرکانس و ϕ^{\max} دامنه‌ی موج است. برای میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمال شده به الکتروودها معادله‌ی زیر استفاده شده است.

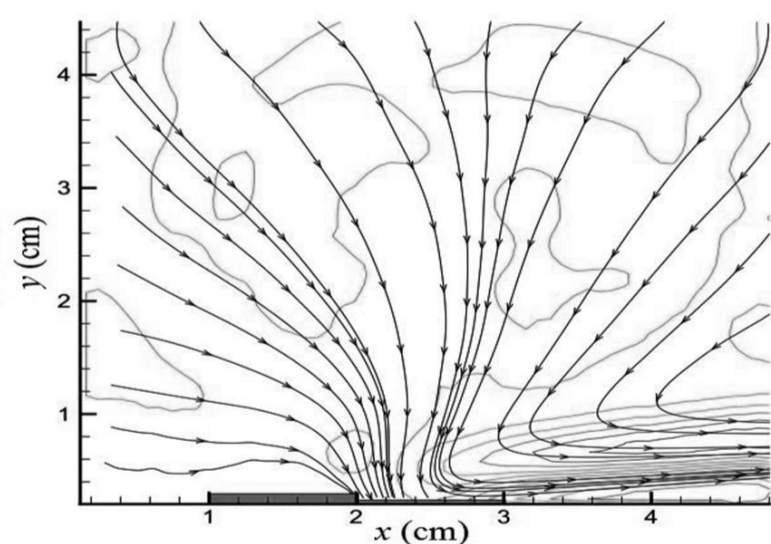
ماکزیمم سرعت 1m/s حاصل از شبیه‌سازی ما در شکل 7 نشان داده شده است. همچنین در شکل 8 پروفیل سرعت حاصل از کار عددی با پروفیل سرعت کار تجربی سنتناکریشن مقایسه شده است و در صد خطای نتایج برابر با $1/6$ است. پروفیل‌های سرعت حل عددی حاصل از مدل 4 و کار تجربی ری هرد [16] در نقطه‌ی $x=3/75\text{cm}$ در حالت استفاده 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

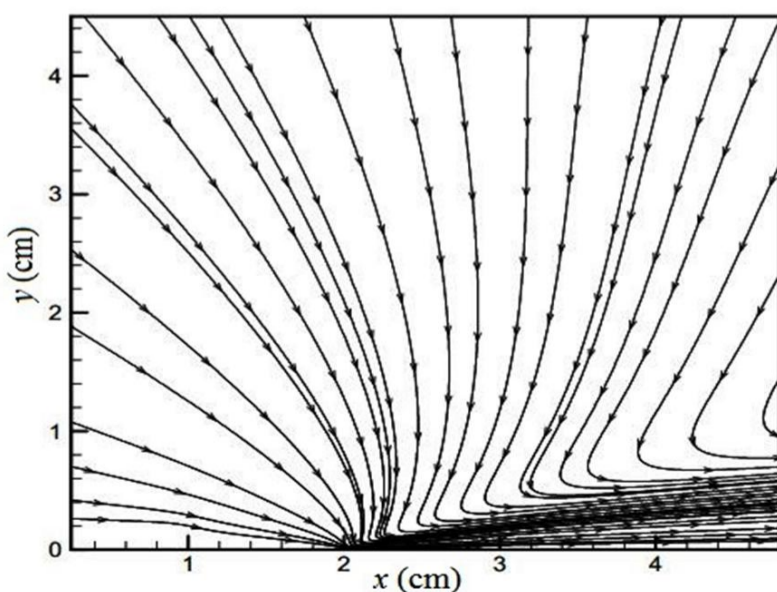
در این حل عددی سه دسته فرمول‌ها شامل فرمول‌های مدل سوزن، فرمول ناپیراستوکس برای جریان توربولانس و فرمول انرژی به صورت کوپل با یکدیگر حل می‌شوند. سیال داخل لوله هوا در نظر گرفته شده است در معادله‌های ناپیراستوکس به خاطر اینکه عدد ماخ زیر $0/3$ است سیال را تراکم ناپذیر فرض کرده‌ایم و برای حل، عدد توربولانسی $0/03$ 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.

جدول 1 مقایسه‌ی درصد خطا برای چهار مدل مش

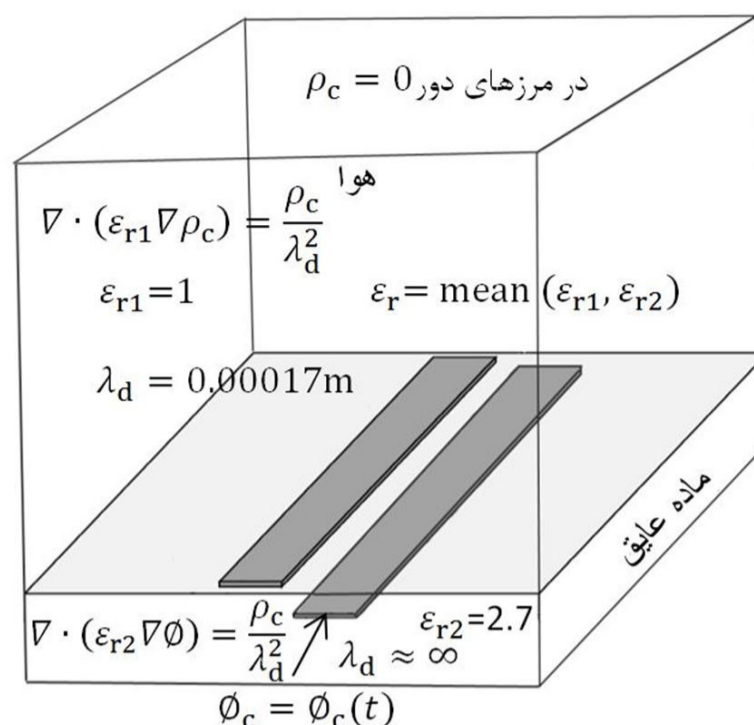
مش	تعداد سلول محاسباتی	متوسط نرخ رشد	درصد خطای شکل 9
1	16407	1/379	3/6
2	32659	1/315	2/4
3	45091	1/337	1/5
4	71673	1/326	1/2



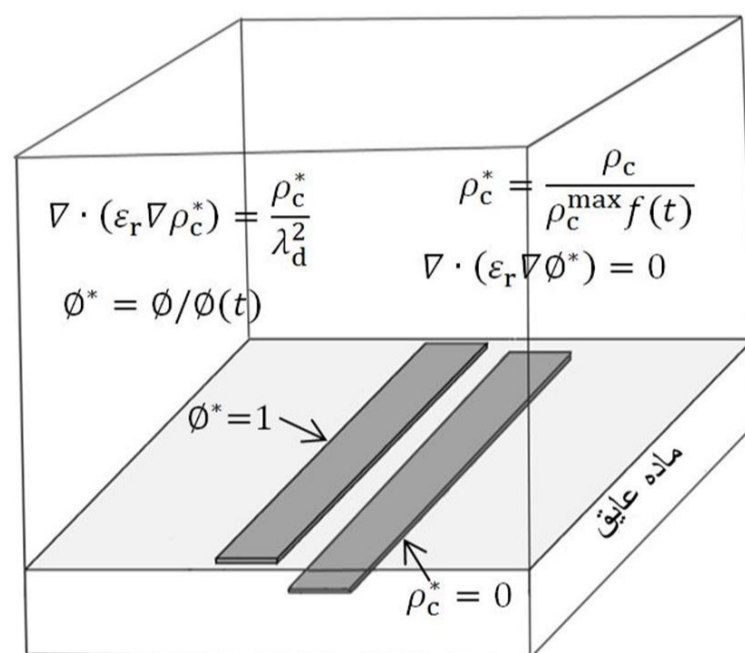
شکل 5 خطوط جریان حاصل از کار تجربی، ماکزیمم سرعت 1m/s .



شکل 6 خطوط جریان حاصل از کار عددی سوزن، ماکزیمم سرعت 1m/s



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 فرمول‌ها به صورت بدون بعد انجام شده است.

3- اعتبارسنجی

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. همان‌گونه که در جدول 1 دیده می‌شود تفاوت درصد خطای مش‌های با 45091 و 71673 سلول برابر با $0/3$ درصد است و این نشان می‌دهد که از مش با 45091 سلول به بعد شرط استقلال از شبکه برقرار است. در تمامی مراحل حل برای دقت بالاتر از مش نوع 4 استفاده شده است.

خطوط جریان و ماکزیمم سرعت 1m/s حاصل از کار تجربی و کار عددی سوزن به ترتیب در شکل 5 و 6 نشان داده شده است. در تحقیق حاضر مدل سوزن را به صورت بی‌بعد و وابسته به زمان حل کرده‌ایم و خطوط جریان و

مدل سوزن است و K انرژی جنبشی توربولانسی و λ ماتریس همانی است.

برای معادله انرژی مورد استفاده داریم.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (21)$$

برای هوای ورودی شرط دما ثابت برابر با 293K در نظر گرفته شده است.

5- هندسه‌ی لوله و استقرار محرک پلاسمایی

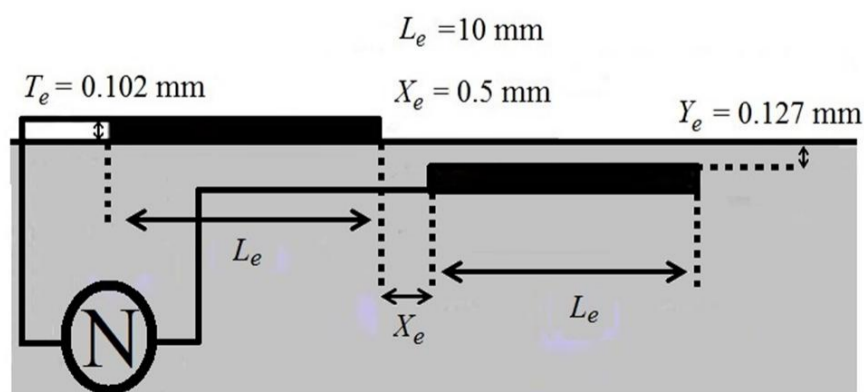
لوله‌های U شکل متداول دارای قطر $d=3\text{ cm}$ و فاصله‌ی اتصال گلوبی‌ها برابر با $M=2\text{ cm}$ می‌باشند در شکل‌های 10 و 11 هندسه‌ی لوله U شکل و محرک پلاسمایی کار شده به طور کامل نشان داده شده است. در شکل 10، $L=8\text{ cm}$ و $R=4\text{ cm}$ است و از مرزهایی که به صورت درشت نقطه‌چین شده است شار گرمایی در حدود 1000 W/m^2 خارج می‌شود. این شار به صورت دریافتی از سطح است.

6- نتایج

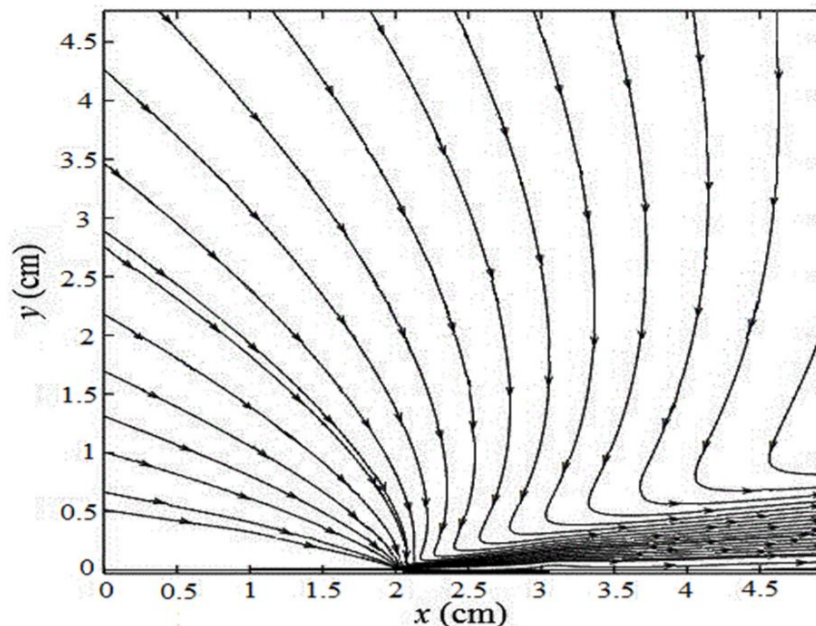
در شکل 12 دو منطقه‌ای که جدایش رخ می‌دهد نشان داده شده است و منطقه جدایش مورد بررسی در مقاله با فلش مشخص شده است. در شکل 13 ناحیه‌ی جدایش در رینولدز 6000 نشان داده شده است. هنگامی که ولتاژ برابر با $\phi^{\text{max}} = 5\text{ kV}$ با موج مربعی به محرک اعمال می‌شود نیرویی در جهت پایین دست جریان ایجاد می‌شود که با جریان برگشتی گردابه پاد ساعتگرد که نزدیک مرز به سمت بالا حرکت می‌کند مخالفت می‌کند نیروی ایجاد شده توسط محرک در ناحیه‌ی بین دو الکترود دارای مقدار بزرگتری می‌باشد 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 z به وجود بیاید و چون در بالادست و پایین



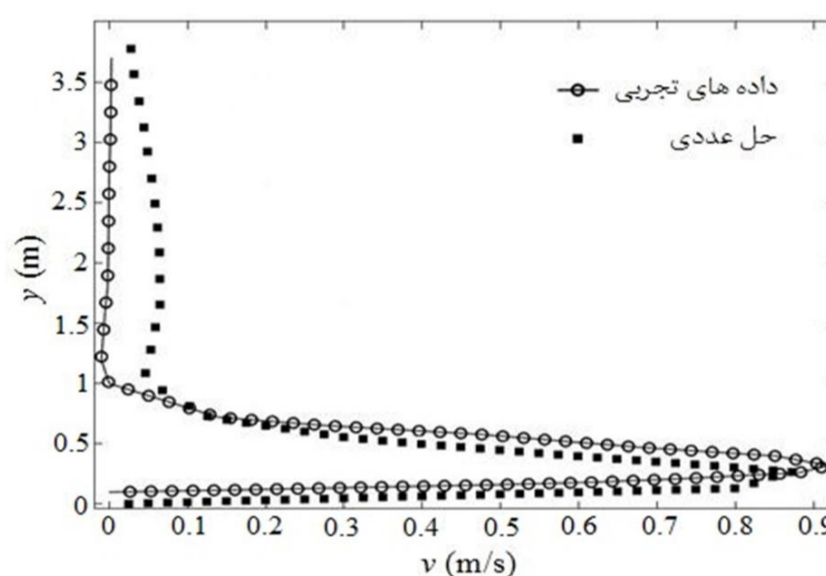
شکل 10 هندسه‌ی لوله‌ی U شکل



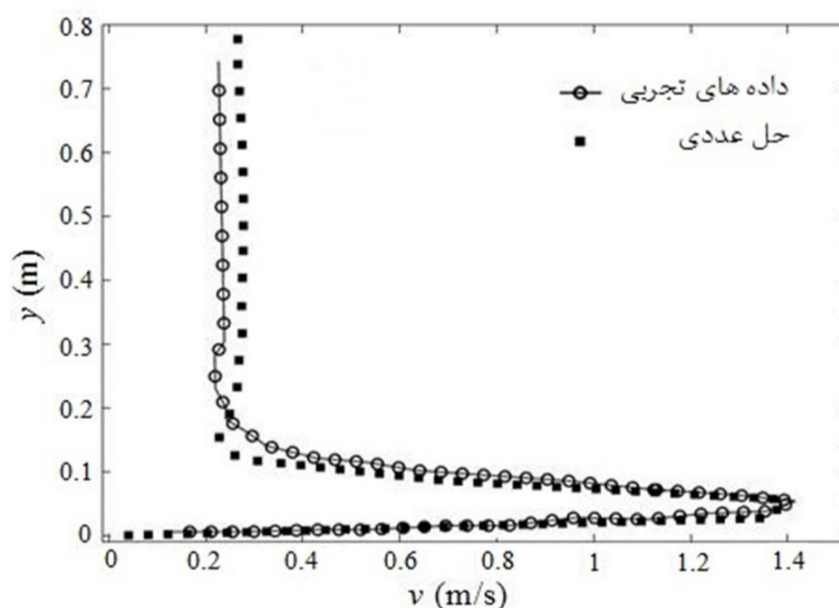
شکل 11 هندسه‌ی محرک پلاسمایی نصب شده روی لوله



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



شکل 8 پروفیل‌های سرعت حاصل از حل عددی و کار تجربی سنتناکریشن



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

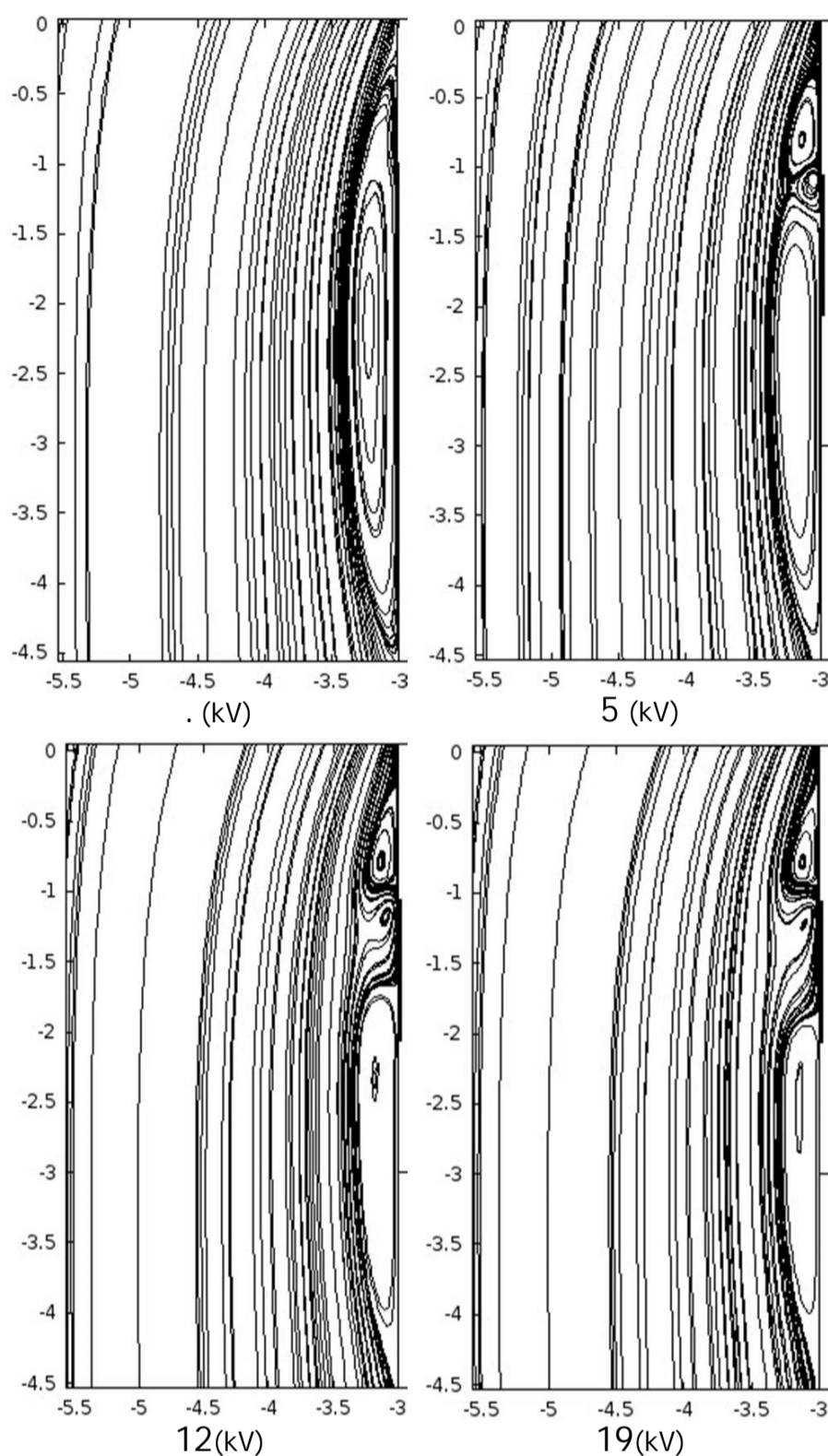
$$Re_D = \frac{4\rho VA}{\pi D \mu} \quad (19)$$

که μ لزجت دینامیکی و D قطر لوله است.

معادله‌ی مومنتم به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho I + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\rho k I] + F \quad (20)$$

جایی که F نیروی حجمی است که رابط برای کوپل شدن با فرمول‌های



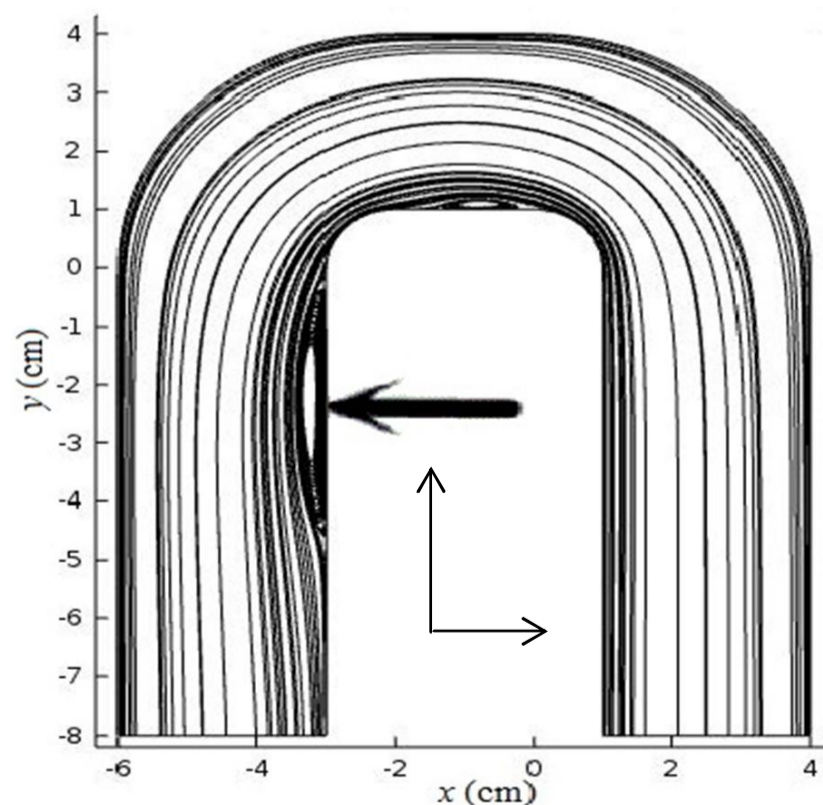
شکل 13 خطوط جریان در منطقه‌ی جدایش در رینولدز 6000

18 نتیجه می‌شود در گردابه‌ی میانی سرعت قسمت‌های نزدیک به دیواره نسبت به قسمت‌های دیگر بسیار بیشتر است. چون جریان اصلی و جریان بازگشتی تولید شده ناشی از گردابه‌ی میانی نزدیک سطح هردو در جهت هم می‌باشند ولی در قسمتی از گردابه که از سطح دورتر است این دو جریان در خلاف جهت یکدیگر می‌باشند و در نهایت موجب می‌شود اندازه یا قدر مطلق سرعت قسمت‌های دورتر از سطح (سطح لوله) گردابه‌ی میانی کمتر شود. همچنین دیده می‌شود که هرچه عدد رینولدز افزایش می‌یابد قدرت گردابه‌ها هم افزایش یافته و در نتیجه سرعت جریان القایی نزدیک سطح کاهش می‌یابد از مقایسه شکل‌های 19، 20 و 21 نتیجه می‌شود که به دلیل اینکه هرچه عدد رینولدز کاهش می‌یابد قدرت گردابه‌های پاد ساعت گرد هم کاهش می‌یابد محرک قادر می‌شود ناحیه‌ی بیشتری را تحت تأثیر خود قرار دهد. همچنین دیده می‌شود با افزایش ولتاژ نقطه‌ی جدایش به سمت پایین دست جریان منتقل می‌شود.

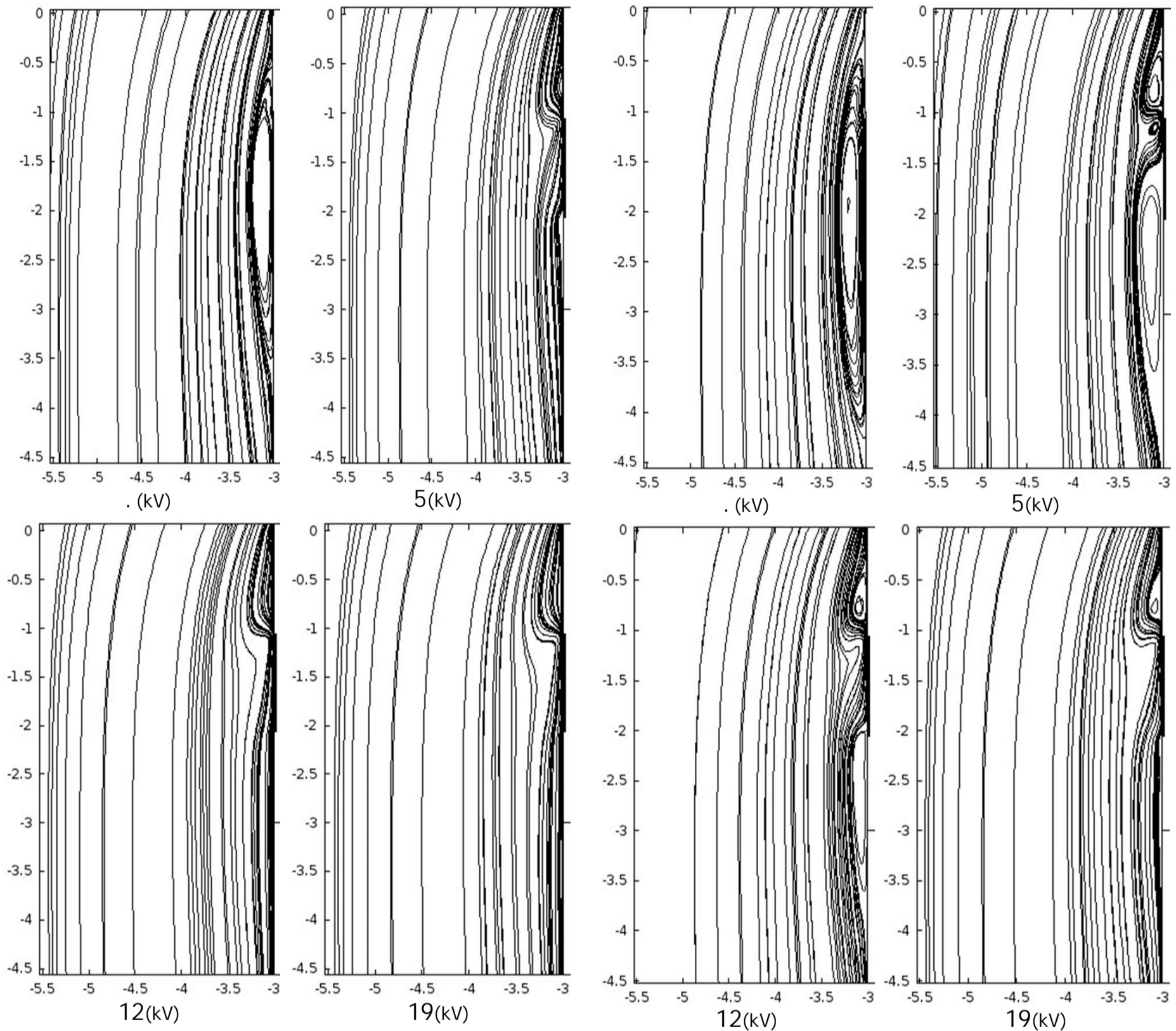
در شکل‌های 22، 23 و 24 نمودارهای دمای سطح لوله در سمتی که محرک پلاسمایی قرار دارد رسم شده است دیده می‌شود که از قسمت میانی الکتروود ولتاژدار به بعد در جهت منفی محور x ما کاهش قابل توجه دمای سطح

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 19kV 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 پایین دست جریان اصلی حرکت می‌کند و از قدرتش کاسته می‌شود. در شکل 14 دیده می‌شود که در رینولدز 4500 هنگامی که ولتاژ را افزایش می‌دهیم مثلاً در ولتاژ 19kV نه تنها گردابه‌ی میانی از بین می‌رود بلکه چون سرعت داخل لوله در رینولدز 4500 کمتر از حالت با 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 اصلی) دارای قدرت کمتر و در نتیجه سرعت کمتر باشند و گردابه‌ی پایین دست جریان با افزایش ولتاژ از بین برود.

در شکل 15 دیده می‌شود که در رینولدز 3000 همه‌ی گردابه‌ها در ولتاژ 19kV از بین می‌روند. همچنین دیده می‌شود که هوا به سمت محرک کشیده می‌شود و بعد در جهت پایین دست جریان به آن نیرو وارد می‌شود. 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 شکل 16 دیده می‌شود با افزایش ولتاژ حرکت جریان به واسطه‌ی گردابه در جهت مثبت محور x متوقف شده و در جهت منفی x بر مقدارش افزوده می‌شود در ضمن دیده می‌شود که بیشترین نیروی تولید شده توسط محرک پلاسمایی می‌دهد و با فاصله گرفتن از سطح نیروی تولید شده توسط محرک پلاسمایی به شدت کاهش می‌یابد. در شکل 17 دیده می‌شود که به دلیل کاهش قدرت گردابه‌ها که بخاطر کاهش عدد رینولدز رخ داده است، شاهد افزایش مقدار سرعت نزدیک مرز دیواره نسبت به پروفیل‌های شکل 16 هستیم. در نمودارهای 16 و 17 و 18 دیده می‌شود که در نزدیکی نقطه‌ی $x = -3/17$ به خاطر این که نقطه‌ی مرکز گردابه‌ی ساعت گرد است سرعت به صفر می‌رسد 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

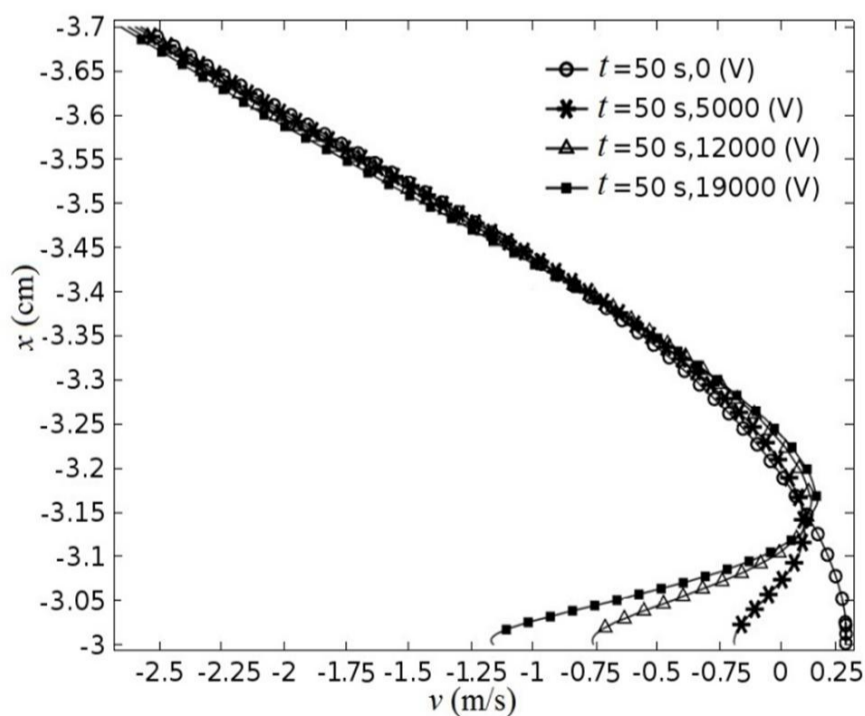


شکل 12 خطوط جریان در لوله و نقطه جدایش مورد نظر در رینولدز 6000



شکل 14 خطوط جریان در منطقه‌ی جدایش در رینولدز 4500

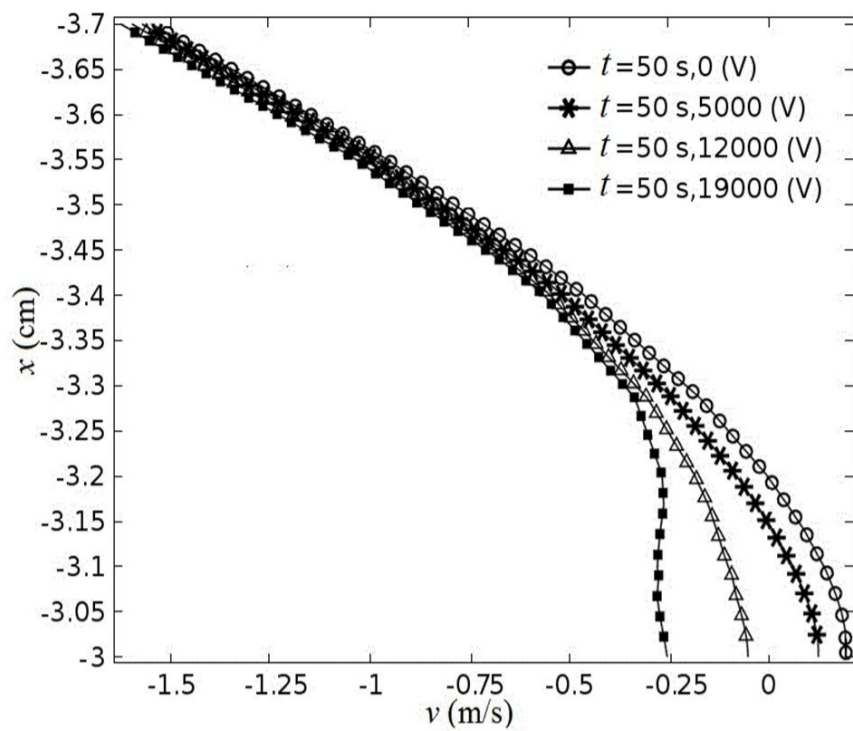
شکل 15 خطوط جریان در منطقه‌ی جدایش در رینولدز 3000

شکل 16 پروفیل مؤلفه‌ی سرعت در جهت y (در عدد رینولدز 6000 در نقطه‌ی $y = -1/22$ ناحیه‌ی بین دو الکتروود)

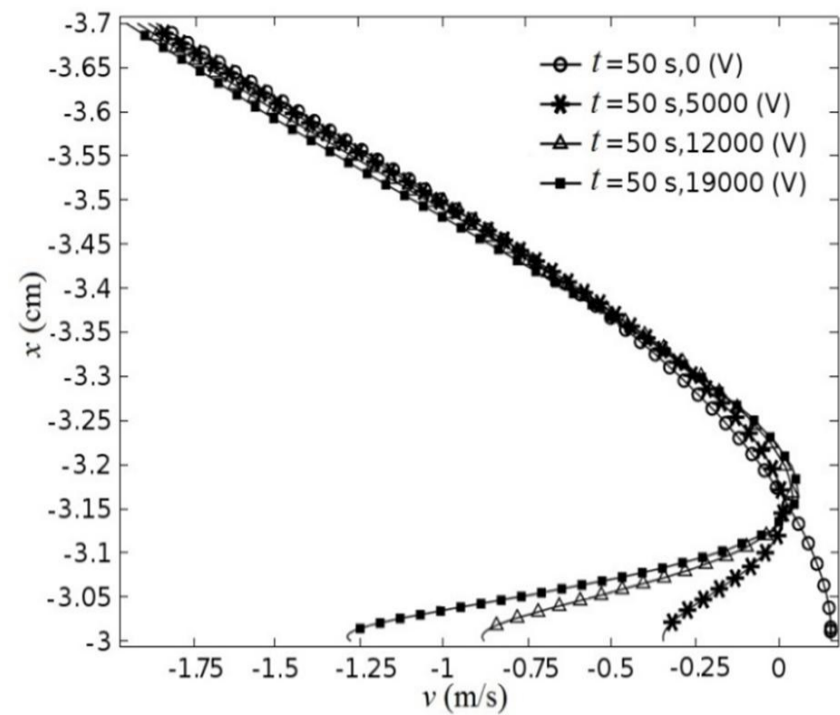
را شاهدیم و بعد از آن در فواصل 7- به بعد سه خط دما در ولتاژهای مختلف در هر کدام از سه شکل به یک مقدار که برای هر شکل متفاوت است همگرا می‌شوند. هنگامی که ولتاژ صفر است در حدود نقطه‌ی $y = -1/11$ ماکزیمم دما رخ می‌دهد ولی هنگامی که محرک روشن می‌شود این ماکزیمم دما به قدری کاهش می‌یابد که از یک مقدار ولتاژ خاص به بعد در آن نقطه مینیمم دمای سطح مشاهده می‌شود.

در شکل 22 دیده می‌شود از قسمت میانی الکتروود ولتاژدار تا قسمت انتهایی آن (در جهت منفی محور y) افزایش ولتاژ سبب می‌شود سرعت گردابه‌ی 1 (گردابه‌ی میانی) که در این ناحیه قرار دارد افزایش پیدا کند چون ناحیه‌ی بین دو الکتروود به واسطه میدان الکتریکی، سیال را از روبرو به سمت خود می‌کشد و به سمت پایین دست جریان پرتاب می‌کند و قسمت پایینی گردابه‌ی 1 در این ناحیه قرار دارد و جهت حرکت این قسمت از گردابه موافق با این نیروهای مکشی و پرتابی است در نتیجه با افزایش ولتاژ بر سرعت گردابه‌ی میانی افزوده می‌شود و هرچه سرعت افزایش پیدا کند دمای سطح کاهش بیشتری می‌یابد.

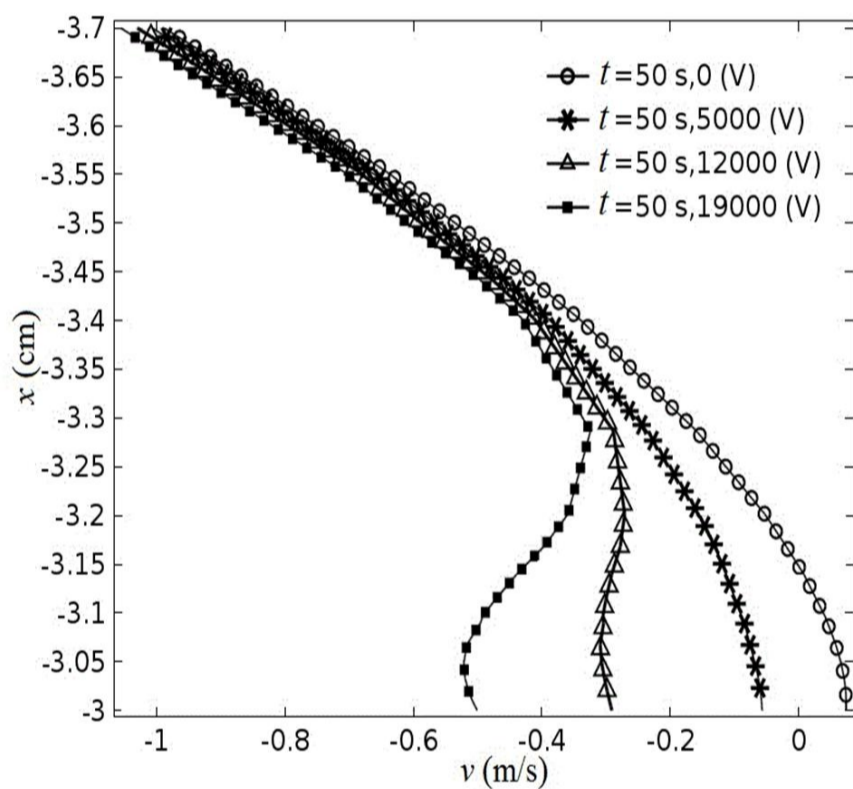
در شکل‌های 23 و 24 مشاهده می‌شود در ناحیه وسط تا انتهای الکتروود



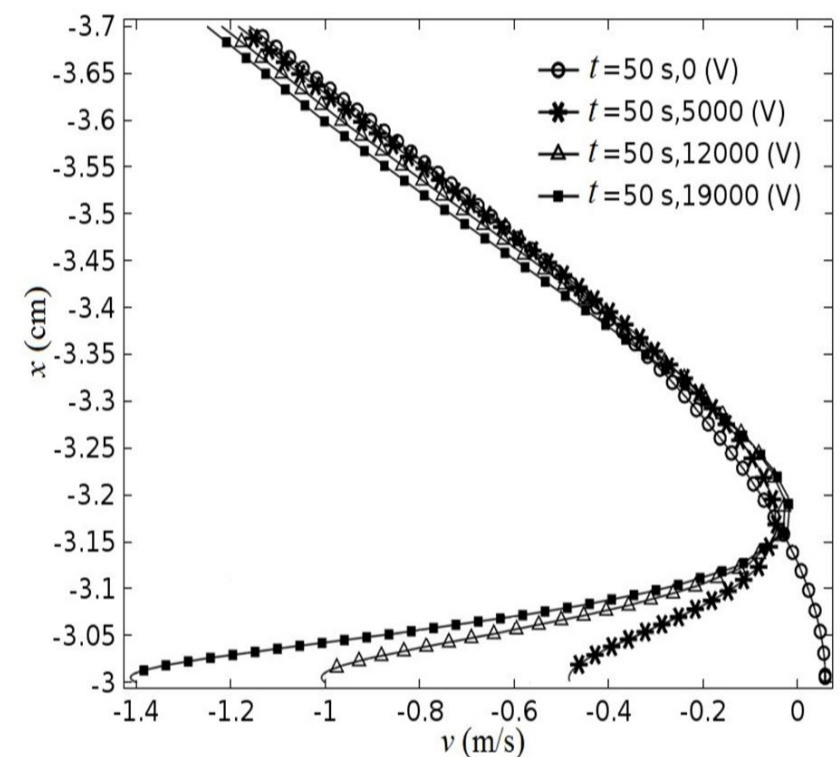
شکل 20 پروفیل مؤلفه‌ی سرعت در جهت y (v) در عدد رینولدز 4500، در نقطه‌ی $y = -1/9$ (ناحیه‌ی انتهایی الکترود متصل به زمین)



شکل 17 پروفیل مؤلفه‌ی سرعت در جهت y (v) در عدد رینولدز 4500، در نقطه‌ی $y = -1/22$ (ناحیه‌ی بین دو الکترود)



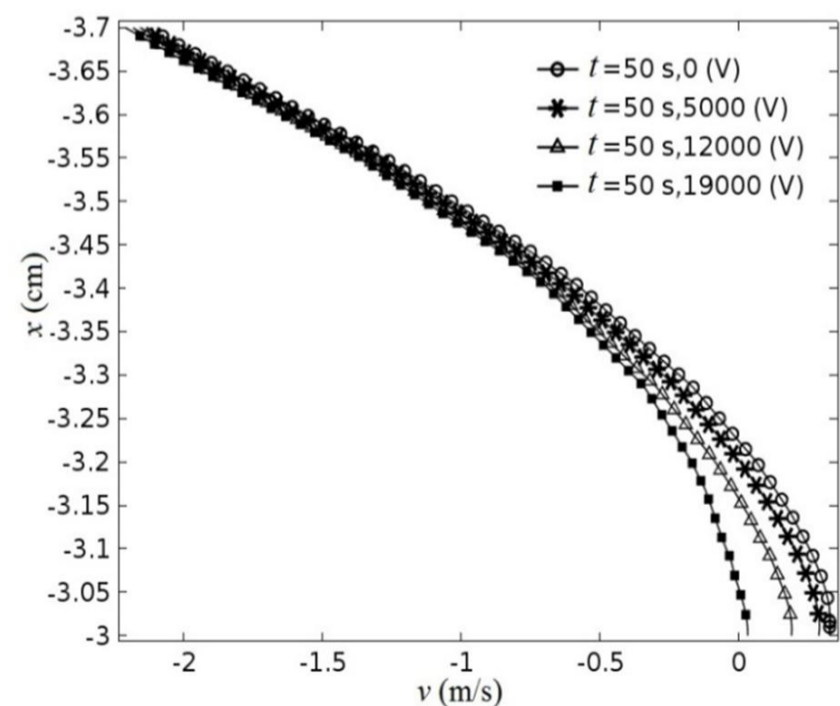
شکل 21 پروفیل مؤلفه‌ی سرعت در جهت y (v) در عدد رینولدز 3000، در نقطه‌ی $y = -1/9$ (ناحیه‌ی انتهایی الکترود متصل به زمین)



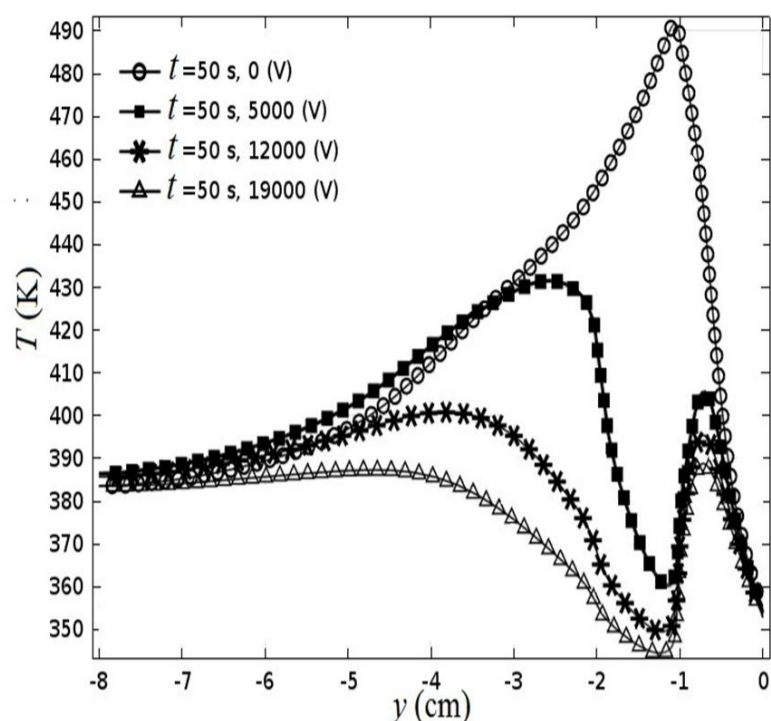
شکل 18 پروفیل مؤلفه‌ی سرعت در جهت y (v) در عدد رینولدز 3000، در نقطه‌ی $y = -1/22$ (ناحیه‌ی بین دو الکترود)

رینولدزهای 3000 و 4500 گردابه‌ی 1 (گردابه‌ی میانی) در ولتاژهای کم از بین می‌رود و در این بازه تغییرات رینولدز و ولتاژ که در شکل‌های 23 و 24 نشان داده شده است سرعت از یک مقدار کم در جهت مثبت تا یک مقدار کم در جهت منفی محور y تغییر می‌کند و بخاطر همین تغییرات زیادی در اندازه یا به عبارتی قدر مطلق سرعت مشاهده نمی‌شود، دمای سطح نیز تغییر چندانی نمی‌کند.

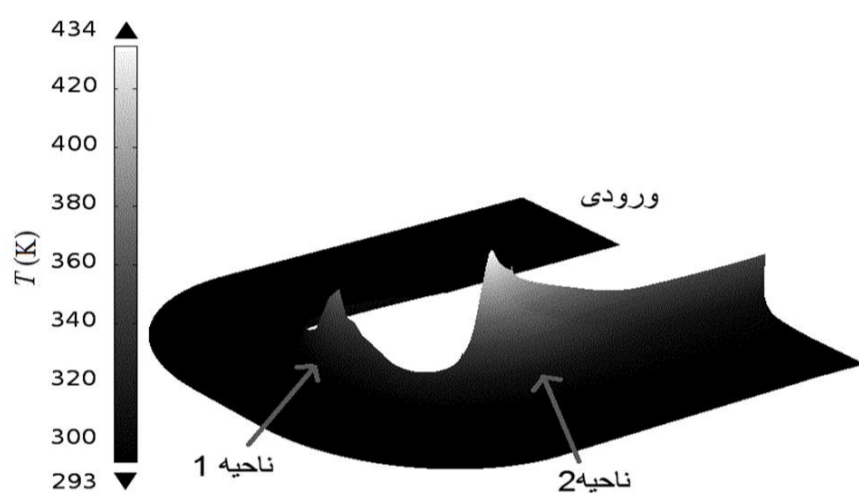
هنگامی که ولتاژ افزایش می‌یابد نیروی مکش بین دو الکترود علاوه بر اینکه به گردابه‌ی 1 سرعت می‌دهد باعث می‌شود که مرکز گردابه‌ی 1 به سمت ناحیه‌ی بین دو الکترود کشیده شود در نتیجه با افزایش ولتاژ به گردابه‌ای کوچکتر ولی قدرت زیادتر تبدیل می‌شود و در نهایت با کوچکتر شدن از بین می‌رود. در عدد رینولدز کوچکتر به دلیل اینکه قدرت گردابه‌ی 1 کمتر است و این موضوع همچنین باعث می‌شود مرکز گردابه‌ی 1 سریع‌تر به ناحیه‌ی بین دو الکترود کشیده شود موجب می‌شود که گردابه‌ی 1 در



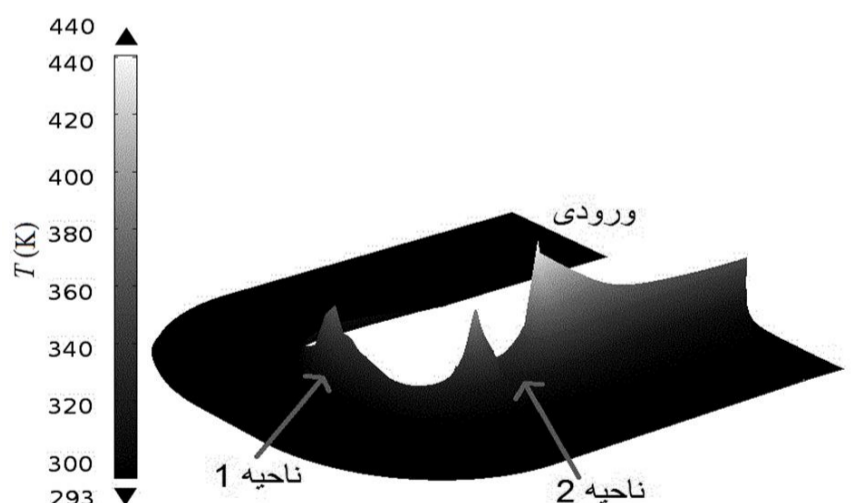
شکل 19 پروفیل مؤلفه‌ی سرعت در جهت y (v) در عدد رینولدز 6000، در نقطه‌ی $y = -1/9$ (ناحیه‌ی انتهایی الکترود متصل به زمین)



شکل 24 نمودار دمای سطح لوله در قسمت قرارگیری محرک، رینولدز 3000



شکل 25 نمودار سه بعدی دما روی لوله‌ی U شکل در حالت محرک خاموش



شکل 26 نمودار سه بعدی دما روی لوله‌ی U شکل در حالت محرک روشن

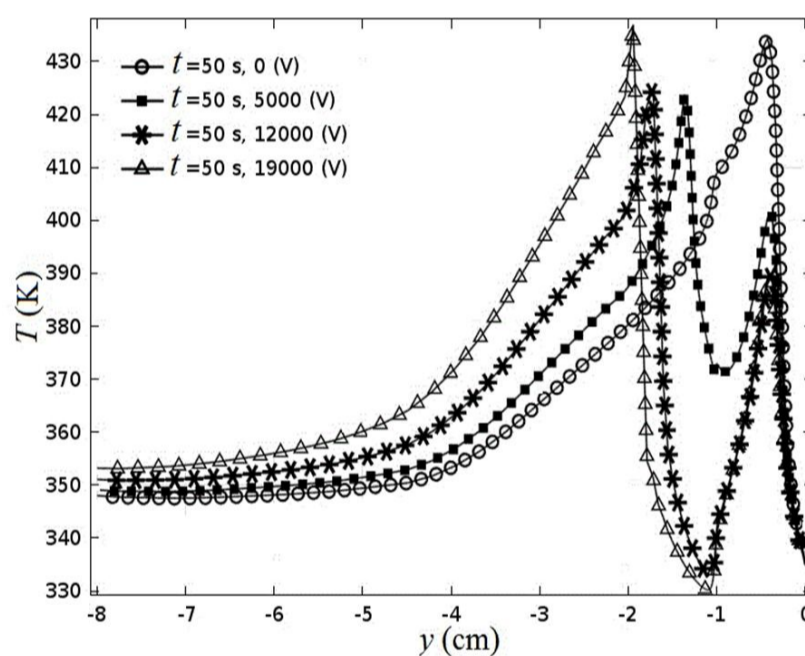
مشاهده می‌شود. هنگامی که محرک روشن می‌شود در ناحیه‌ی 2 کاهش دمای قابل توجهی رخ می‌دهد و یک ماکزیمم دمای در حالت خاموش در ناحیه‌ی 2 تبدیل به دو ماکزیمم دما با مقدار کمتر و یک مینیموم دما در این ناحیه می‌شود. اگر تعداد بیشتری محرک پلاسمایی در قسمت پایین دست ناحیه‌ی 2 قرار دهیم ماکزیمم دما به سمت خروجی 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، 28 و 29 نمودارهای پکلت روی دیواره‌ای که تغییرات دمایش بحث شد رسم شده است. پکلت یک عدد بدون بعد است که به بیان نفوذ گرمایی سیال می‌پردازد و دارای فرمول زیر است.

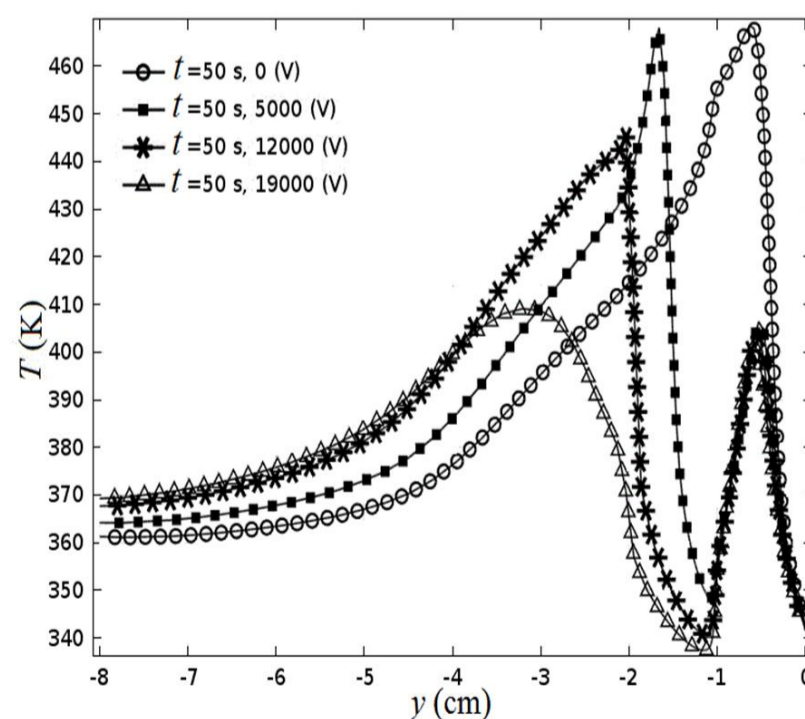
ولتاژهای پایین‌تری نبود شود. در نیمه‌ی ابتدایی الکتروود ولتاژدار مقدار دما با تغییر ولتاژ تغییر چشمگیری نمی‌کند زیرا در این ناحیه اندازه سرعت چه هنگامی که محرک خاموش بوده و یک گردابه وجود دارد و چه هنگامی که محرک روشن شده و گردابه‌ی کوچکی در آن ناحیه قرار دارد و یا در رینولدزهای کوچکتر که گردابه برطرف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

در شکل 22 در بازه‌ی (-2, -8) هر چه ولتاژ زیادتر می‌شود دمای سطح بیشتر می‌شود ولی در شکل 24 در ولتاژ 19 kV دمای سطح از همه کمتر شده است چون در شکل 24 گردابه‌ی 3 ناپوشده و افزایش ولتاژ موجب سرعت گرفتن سیال در جهت پایین دست 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 می‌شود.

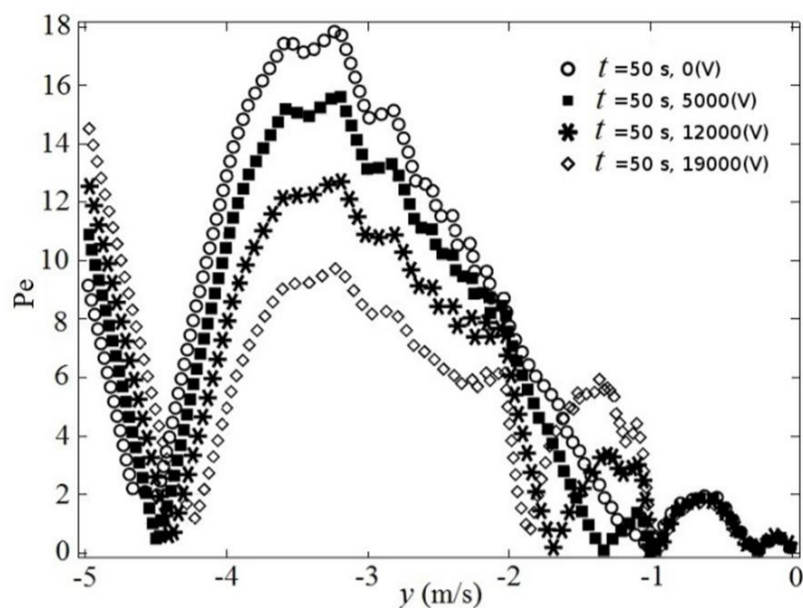
در شکل‌های 25 و 26 نمودارهای سه بعدی دما در حالت‌هایی که به ترتیب محرک خاموش و روشن است رسم شده‌اند دیده می‌شود که در ناحیه‌ی گلویی لوله (ناحیه 1) افزایش دما رخ می‌دهد که به دلیل جدایش اتفاق افتاده در این ناحیه است. در ناحیه‌ی قرارگیری محرک پلاسمایی (ناحیه 2) محدوده‌ی دما بالای گسترده‌تر و با ماکزیمم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



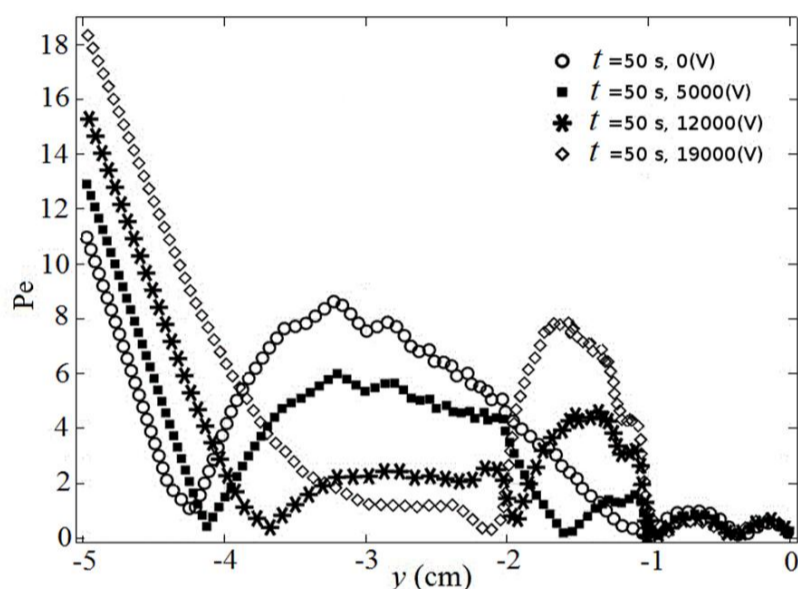
شکل 22 نمودار دمای سطح لوله در قسمت قرارگیری محرک، رینولدز 6000



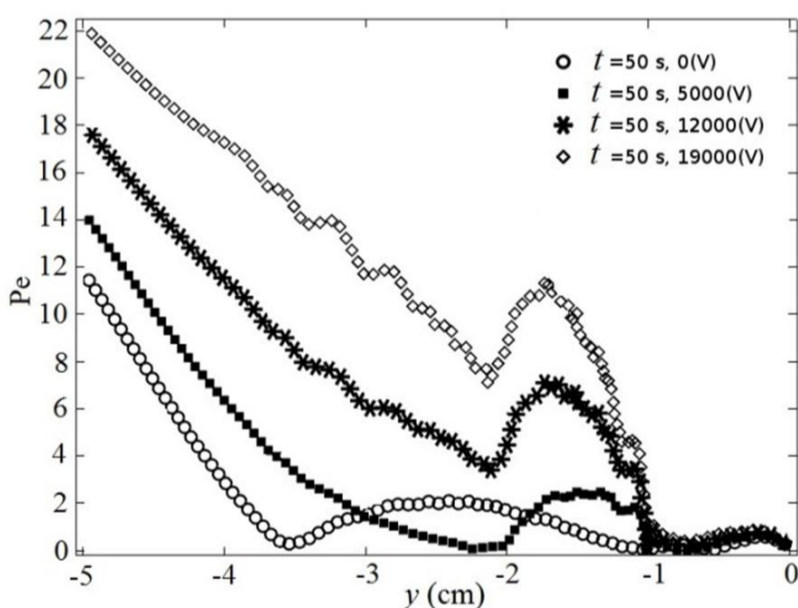
شکل 23 نمودار دمای سطح لوله در قسمت قرارگیری محرک، رینولدز 4500



شکل 27 نمودار عدد پکلت در رینولدز 6000



شکل 28 نمودار عدد پکلت در رینولدز 4500



شکل 29 نمودار عدد پکلت در رینولدز 3000

8- فهرست علائم

e	بار مقدماتی (c)
E	میدان الکتریکی (N/c)
\vec{f}	نیروی حجمی در واحد حجم (N)
k	ثابت بولتزمن
n_e	دانشیته‌ی الکترون‌ها (c/m^3)
n_i	دانشیته‌ی یون‌ها (c/m^3)
Pe	عدد پکلت

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{\rho V L C_p}{k} \quad (22)$$

که در آن L طول مشخصه، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، k ضریب هدایت و Re عدد رینولدز در لوله است. با توجه به معادله‌ی (22) هرچه سرعت افزایش می‌یابد نفوذ حرارت نیز افزایش می‌یابد. در شکل 27 دیده می‌شود مقدار عدد پکلت در قسمت میانی و لبه‌های الکتروود ولتاژدار به مقدار مینیمم می‌رسد چون در ابتدای الکتروود جریان اصلی به برآمدگی الکتروود در معرض هوا برخورد می‌کند و سرعتش به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند و در وسط الکتروود در معرض هوا به خاطر اینکه جدایش روی داده و گردابه از آن مکان شروع می‌شود سرعت به صفر نزدیک شده و همچنین در قسمت انتهایی الکتروود در معرض هوا به دلیل اینکه جریان برگشتی به برآمدگی الکتروود برخورد می‌کند سرعتش به مقدار زیادی کاسته می‌شود چون طبق فرمول کاهش سرعت موجب کاهش پکلت می‌شود مادر این سه نقطه شاهد مینیمم عدد پکلت هستیم. در شکل‌های 27، 28، 29 می‌بینید که در بازه‌ی (-1 و -2) روی سطح دی‌الکتریک با افزایش ولتاژ عدد پکلت افزایش یافته که 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 4500 و 6000 گردابه‌ی 1 از بین نرفته و از نقطه‌ی $y = -1$ شروع شده و تا $y = -2$ ادامه دارد و مینیمم پنجم در رینولدزهای 4500 و 6000 به خاطر وجود انتهای گردابه در نقطه‌ی $y = -4$ است. در شکل 29 این مینیمم پنجم هنگامی که ولتاژ اعمال می‌شود 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 می‌رود. در شکل‌های 27 و 28 در بازه‌ی (-2، -4) با افزایش ولتاژ نیروی حجمی در خلاف جهت حرکت جریان برگشتی افزایش می‌یابد و موجب کاهش سرعت و در نتیجه کاهش عدد پکلت می‌شود ولی در رینولدز 3000 چون در همان ولتاژهای کم گردابه‌ی سوم از بین می‌رود و فقط یک جریان با سرعت کم در جهت پایین دست جریان داریم که با افزایش ولتاژ نیروی حجمی بیشتری به آن القا می‌شود و در نتیجه سرعتش افزایش می‌یابد و عدد پکلت آن نیز افزایش پیدا می‌کند.

7- نتیجه گیری

محرک‌های پلاسمایی به خوبی قادرند تا جدایش و گردابه‌های ایجاد شده در لوله‌های LA 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 در هر رینولدز در ناحیه‌ی بعد الکتروود ولتاژدار رخ می‌دهد و الکتروودها باید به گونه‌ای قرار گیرند که ناحیه‌ی هدف برای کاهش دما یا برطرف کردن جدایش بعد از الکتروود در معرض هوا به خصوص در قسمت میانی دو الکتروود قرار گیرد. همان طور که دیده شد دمای سطح در فاصله‌ی بین دو الکتروود در حالتی که محرک خاموش است ماکزیمم مقدار خود را داراست در حالی که هنگام روشن شدن این ماکزیمم دما به حدی کاهش می‌یابد که به مینیمم دما تبدیل می‌شود و چون در بیشتر صنایع مشکل اصلی این است که دمای نقطه‌ای از سطح به شدت زیاد می‌شود در حالی که دمای نقاط دیگری در حد معمول است استفاده از محرک‌های پلاسمایی بسیار کاربردی است زیرا این محرک‌ها همان طور که مورد تحلیل قرار گرفت قادرند دمای ماکزیمم سطح را آن قدر کاهش دهند که حتی در مواردی شاهد مینیمم شدن دمای آن ناحیه باشیم.

- [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 filled-type 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.

T	دما بر حسب کلونین (K)
T_i	دمای یون (K)
V	ولتاژ الکتریکی (V)

علائم یونانی

ρ_c	چگالی بار (Coulomb/m ³)
ρ	چگالی (kgm-3)
μ	لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹)
ω	فرکانس (Hz)
ε	واحد اندازه‌گیری الکتریسیته (F)

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 of dielectric 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. 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 intertemperature field and velocity turbulent combustion CO₂ and air, *ICHMT*, pp. 1-7, 2014 (In Persian).