



Investigation of Aerodynamic and Heat Transfer Performance of Cylinders Using Plasma Actuators

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Tahani M.^{*1} PhD,
Kazemi M.¹ MSc,
Babaie Z.¹ MSc

How to cite this article

Tahani M, Kazemi M, Babaie Z. Investigation of Aerodynamic and Heat Transfer Performance of Cylinders Using Plasma Actuators. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(9): 2111-2120.

¹Aerospace Engineering Department, New Sciences & Technologies Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: New Sciences & Technologies Faculty, University of Tehran, North Kargar Street, Amirabad, Tehran, Iran. Post Code: 1439957131
Phone: -
Fax: +98 (21) 86093011
m.tahani@ut.ac.ir

Article History

Received: May 22, 2018

Accepted: January 29, 2019

ePublished: September 01, 2019

ABSTRACT

Today, one of the useful methods of flow control, especially external aerodynamics, is plasma DBD actuators. In this study, the effect of plasma DBD actuators on cylinders in tandem arrangement is investigated. The actuators are considered on upstream cylinder. The cylinders are placed in distance (L/D) relative to each other. Investigation is done at two Reynolds number (100 and 200) with two different conditions of applying actuators. Cases with $V_p-p=55\text{kv}$ and $V_p-p=1\text{kv}$ are selected from references. The results of the present study are validated against the previous available experimental and numerical data and close agreement is found. Finite volume method is applied to solve equation of motion. Plasma actuators caused downstream cylinder experience upper values of drag coefficient and Nusselt number in all cases of study. Also, the growth of drag coefficient and Nusselt number are decreased by rising the Reynolds number, so that increasing the Nusselt number is 2% more at cases with $Re=100$ compared to cases with $Re=200$.

Keywords Flow Control; Plasma Actuators; Bluff Body; Drag Coefficient; Nusselt Number

CITATION LINKS

[1] A review on active and passive flow control techniques [2] Flow control: Passive, active, and reactive flow management [3] The history of boundary layer control research in the United States of America [4] Fundamentals and applications of modern flow control [5] Drag reduction by dc corona discharge along an electrically conductive flat plate for small Reynolds number flow [6] Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma [7] Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control [8] Dielectric material degradation monitoring of dielectric barrier discharge plasma actuators [9] Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator [10] Towards in-flight applications? a review on dielectric barrier discharge-based boundary-layer control [11] Unsteady incompressible flows past two cylinders in tandem and staggered arrangements [12] Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements [13] Numerical simulation of flows around two circular cylinders by mesh-free least square-based finite difference methods [14] Numerical investigation of convective heat transfer in unsteady flow past two cylinders in tandem arrangements [15] Control of flow over a bluff body [16] Plasma flow control of cylinders in a tandem configuration [17] Bluff-body flow control via two types of dielectric barrier discharge plasma actuation [18] Direct numerical simulation of flow around a circular cylinder controlled using plasma actuators [19] Numerical investigation of tandem-cylinder noise reduction using plasma-based flow control [20] Simulations of flow separation control using plasma actuators [21] Numerical study for active flow control using dielectric barrier discharge actuators [22] Modeling of dielectric-barrier discharge actuator [23] Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers [24] Shedding patterns of the near-wake vortices behind a circular cylinder

بررسی عملکرد آیرودینامیکی و انتقال حرارت سیلندرها تحت اثر محرک‌های پلاسمایی

مجتبی طحانی * PhD

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مصطفی کاظمی MSc

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

زهرا بابائی MSc

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

امروزه یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترل جریان در حوزه آیرودینامیک به ویژه آیرودینامیک خارجی استفاده از محرک‌های پلاسمایی است. در این تحقیق تاثیر محرک‌های پلاسمایی بر دو سیلندر در آرایش پشت سر هم در حالتی که محرک‌ها روی سیلندر اول اعمال شده، بررسی شده است. سیلندرها در فواصل نسبی (L/D) مختلف از یکدیگر قرار داده شدند و تحقیقات در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ انجام گرفته و در دو شرایط متفاوت اعمال محرک‌ها انجام شده است. یکی از حالت‌ها دارای ولتاژ قله به قله ۵۵ کیلوولت و دیگری ۱ کیلوولت بوده است که این مقادیر با توجه به نتایجی که اعتبارسنجی با آنها انجام گرفته، انتخاب شده‌اند. نتایج حاصل از روش عددی با سایر نتایج عددی و تجربی صحه‌گذاری شد. حل معادلات جریان با استفاده از روش حجم محدود انجام گرفته است. اعمال محرک‌های پلاسمایی سبب شد که سیلندر دوم در تمامی حالت‌ها ضریب پسا و عدد ناسلت بیشتری را تجربه کند. همچنین تاثیر محرک‌های پلاسمایی بر روی افزایش ضریب پسا و عدد ناسلت با افزایش رینولدز کمتر شده به گونه‌ای که افزایش عدد ناسلت در بهترین حالت در رینولدز ۱۰۰ نزدیک به ۲٪ بیشتر از همین افزایش در رینولدز ۲۰۰ بوده است.

کلیدواژه‌ها: کنترل جریان، محرک‌های پلاسمایی، اجسام استوانه‌ای، ضریب پسا، عدد ناسلت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

*نویسنده مسئول: m.tahani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

کنترل جریان یکی از بخش‌های مهم آیرودینامیک است. اصلاح الگوی جریان، افزایش نیروی برآ، کاهش نیروی پسا از مهم‌ترین اهداف کنترل جریان محسوب می‌شوند. پیشرفت‌ها و توسعه روش‌های مورد استفاده در کنترل جریان در قرن گذشته نشان‌دهنده اهمیت آن است [1].

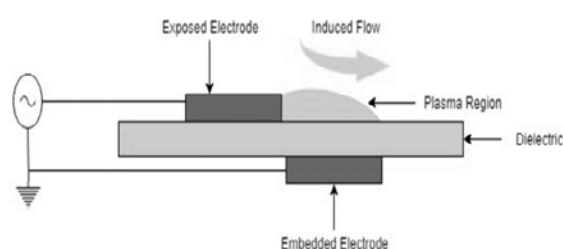
کنترل جریان تحت تاثیر قراردادن یک سیال به شکل فعال یا غیرفعال به منظور ایجاد تغییر مطلوب در آن است [2]. به بیانی دیگر کنترل جریان شامل هر فرآیندی است که سبب می‌شود رفتار سیال نسبت به طبیعتش متفاوت باشد [3].

ویلیامز و مک مینورکی کنترل جریان را از منظر تاریخی به دو قسمت "عصر تجربی" و "کنترل جریان مدرن" تقسیم نموده‌اند. از نظر آنها در عصر تجربی کنترل جریان به کمک مصرف انرژی قابل توجه حاصل می‌شد اما در عصر مدرن، هدف تغییرات بیشتر در ساختار سیال از طریق صرف کمترین انرژی است و این مهم به کمک استفاده از ناپایداری‌های سیال به عنوان محرک محقق می‌شود. به طور کلی می‌توان این‌طور بیان نمود که تفاوت اساسی میان کنترل جریان در عصر تجربی و مدرن میزان انرژی مصرفی برای ایجاد تغییرات یکسان است [4].

در یک دهه گذشته استفاده از محرک‌های پلاسمای دی‌بی‌دی به عنوان یکی از روش‌های کنترل جریان فعال، بسیار رایج شده است. در آخرین سال‌های قرن بیستم اولین استفاده‌ها از این

تکنولوژی برای کاهش ضریب پسای صفحه تخت بوده و سپس دی‌بی‌دی توسط راث توسعه یافت [5, 6]. این محرک‌ها به علت مزایای برجسته‌ای که داشتند از جمله عدم وجود بخش متحرک، وزن بسیار پایین، مدت زمان پاسخ بسیار کم در حالت ناپایا، توانایی نصب روی سطوح مختلف به سرعت در آیرودینامیک فراگیر شدند [7].

همان‌طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است محرک‌های دی‌بی‌دی عموماً از یک الکتروود بالایی و یک الکتروود زیرین تشکیل شده است. این دو الکتروود توسط ماده عایقی از هم جدا شده‌اند. ضریب ماده عایق استفاده شده برای ساخت محرک‌های دی‌بی‌دی و همچنین ضخامت آن در تشکیل پلازما نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. از رایج‌ترین مواد عایق مورد استفاده می‌توان به نوعی پلی‌ایمید با نام تجاری کاپتون و نوعی تفلون (TPFE) اشاره نمود [8] (شکل ۱).



شکل ۱) طرحواره اجزای دی‌بی‌دی

الکتروودهای مورد استفاده در محرک‌های دی‌بی‌دی اگر به وسیله جریان الکتریکی متناوبی که ولتاژ و شدت جریانی به اندازه کافی بالا دارد، تغذیه شوند، موجب یونیزه شدن ضخامت بسیار کوچکی از مولکول‌های هوا (معمولاً در حدود 1ppm) در نزدیکی الکتروودها می‌شود. در دیدگاه کلاسیک گاز یونیزه شده گونه‌ای از پلازما است به همین دلیل نیز نام پلازما بر این نوع از محرک‌ها اضافه شده است [9]. وجود میدان الکتریکی تشکیل شده توسط الکتروودها که وابسته به شکل الکتروودها است موجب وارد شدن نیروی حجمی به مولکول‌های هوا می‌شود.

کریگسنیس در یک مقاله مروری، کاربردها و نکات برجسته موجود در حوزه دی‌بی‌دی و کنترل لایه مرزی را بیان کرده است [10]. یک دسته از اجسام بسیار پرکاربرد در آیرودینامیک، اجسام استوانه‌ای هستند. سیلندرها نماینده این دسته از اجسام هستند که با توجه به حضور بسیار زیاد اجسام استوانه‌ای در طبیعت و صنایع، از اهمیت بالایی برخوردارند. برای شبیه‌سازی و آزمایش‌ها از این اجسام به عنوان نماینده‌ای از خودروها، بالگردها، بدنه هواپیما، توربین‌های بادی و ساختمان‌ها استفاده می‌شود. به طور خاص در زمانی که این اجسام به صورت پشت‌سرهم قرار می‌گیرند، تاثیر جریان‌های ثانویه‌ای که روی یکدیگر دارند و اهمیت آنها در هنگام حرکت خودروها پشت سر یکدیگر، آرایش پره‌های خنک‌کاری، سبب شده که به موضوع تحلیل جریان حول سیلندرها هنگامی که آرایشی خاص و پشت‌سرهم دارند توجه ویژه‌ای شود.

میتال و همکاران [11] با روش‌های حجم محدود جریان پشت دو سیلندر را در دو رینولدز ۱۰۰ و ۱۰۰۰ در آرایش دوتایی در فواصل (L/D) برابر با ۲/۵ و ۵/۵ بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد ماهیت جریان به شدت وابسته به فاصله سیلندرها و عدد رینولدز است و در تمامی حالت‌ها که سیلندر دوم در دنباله سیلندر اول قرار

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (۳)$$

انرژی:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۴)$$

که در این معادلات u و v مولفه‌های سرعت، p فشار، ρ چگالی، ν لزجت سینماتیکی، T دما و α ضریب پخشندگی حرارتی است. سرعت و دمای ورودی برابر با سرعت و دمای جریان آزاد است. گرادیان‌های سرعت و دما در خروجی صفر در نظر گرفته می‌شوند. در دیواره‌های بالا و پایین و دیواره سیلندر شرط عدم لغزش حاکم هست. در دیواره‌ها دمای جریان با دمای دیواره برابر فرض شده و دما روی دیواره سیلندر T_w است.

میدان محاسباتی همانند مطالعه‌ای^[۱۴] انتخاب شده که به همراه شرایط مرزی در شکل ۲ قابل مشاهده است.

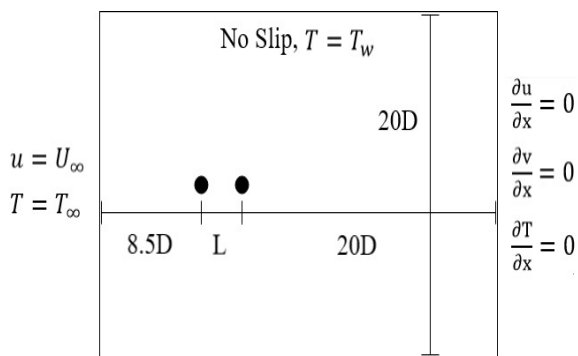
ضرایب پسا، برآ و عدد ناسلت محلی به ترتیب با روابط ۵، ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند.

$$C_l = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (۵)$$

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (۶)$$

$$Nu = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{hD}{k} d\theta \quad (۷)$$

که در این روابط، D قطر سیلندرها، F_x نیروی در جهت x ، F_y نیروی در جهت y ، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی است.



شکل ۲) میدان محاسباتی و شرایط مرز

شبیه‌سازی محرک‌های پلاسمایی به علت درگیر شدن معادلات ماکسول به معادلات ناویر استوکس بسیار پیچیده است. مدل‌های مختلفی برای این شبیه‌سازی ارایه شده که یکی از بهترین‌های آنها مدل سوزن است که در این مدل برای محاسبه اثر محرک‌ها به صورت تابع چشمه به معادلات مومنتوم اضافه می‌شود و اگر ضخامت دیبای کوچک و بار روی دیواره بزرگ نباشد، دو معادله مستقل یکی برای میدان الکتریکی خارجی در اثر اعمال ولتاژ بر الکتروود، معادله (۸) و دیگری برای پتانسیل در اثر ذرات باردار معادله (۹) می‌توان نوشت^[۲۰]:

$$\frac{\partial^2 (\epsilon_r \phi)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\epsilon_r \phi)}{\partial y^2} = 0 \quad (۸)$$

می‌گیرد نیروی ناپایای بزرگی را تجربه می‌کند. مگنیتی و همکاران^[۱۲] به روش المان محدود، همچنین دینگ و همکاران^[۱۳] به روش اختلاف محدود جریان بین دو سیلندر در آرایش پشت سرهم و کنار هم در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ شبیه‌سازی کردند و با هدف آشکارسازی جریان، کانتورهای گردابه را رسم نمودند. ماهیر و آلتک^[۱۴] در آرایش پشت سرهم و در فواصل مختلف دو سیلندر، در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ شبیه‌سازی کرده و انتقال حرارت جابه‌جایی روی آنها و تغییرات عدد ناسلت را بررسی کردند.

با توجه به اهمیت جریان حول این اجسام، کنترل جریان حول آنها همواره موضوع جذابی برای محققین بوده است. چوی و همکاران^[۱۵] در یک مقاله مروری به انواع روش‌های فعال و غیرفعال کنترل جریان حول اجسام استوانه‌ای پرداخته است. استفاده از محرک‌های پلاسمایی دی‌بی‌دی نیز برای کنترل جریان حول اجسام استوانه‌ای با توجه به مزایای بیان شده از مسائلی پرکاربرد است. کوزلو و توماس^[۱۶] با اعمال محرک‌های پلاسمایی روی سیلندر اول در آرایش پشت سرهم با هدف کاهش نویز از طریق کاهش تاثیر اغتشاشات ناپایای فشار در سیلندر پایین دست انجام دادند که در هر دو نوع محرک تاثیر ملایم دنباله در سیلندر پایین دست مشاهده شد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر^[۱۷] تاثیر محرک دی‌بی‌دی برای کنترل ریزش گردابه از سیلندر دایروی در رینولدز ۸۵۰۰۰ را به صورت تجربی بررسی کردند. ایگارش و همکاران^[۱۸] جریان حول یک سیلندر را به روش شبیه‌سازی عددی مستقیم و در رینولدز ۱۰۰۰ شبیه‌سازی کرده و تاثیر نیروی دوبعدی و سه‌بعدی بر دامنه نیرو و آرایش محرک‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آلتاویل و همکاران^[۱۹] با هدف کاهش نویز به روش گردابه‌های بزرگ کنترل جریان حول دو سیلندر پشت سرهم در رینولدز ۲۲۰۰۰ را شبیه‌سازی کرده و نتایج تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد.

به نظر می‌رسد که تاکنون پژوهشی پیرامون تاثیر محرک‌های پلاسمایی روی سیلندرها در آرایش پشت سرهم و در فواصل مختلف قرارگیری انجام نشده است. هدف اصلی در پژوهش پیش‌رو، استفاده از محرک‌های پلاسمایی روی سیلندرها در آرایش پشت سرهم است. به صورتی که اعمال محرک‌ها روی سیلندر اول صورت پذیرفته و تاثیراتش روی جریان حول سیلندر دوم بررسی می‌شود. این سیلندرها در فواصل نسبی (L/D) ۲، ۳، ۴، ۵، ۷ و ۱۰ از یکدیگر قرار داده شده تا تاثیر فاصله بین دو سیلندر روی جریان حول آنها بررسی شود. بررسی‌ها در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ به منظور اعتبارسنجی نتایج صورت گرفته و دو شرایط متفاوت اعمال محرک‌ها از منظر ولتاژ قله به قله و سایر مولفه‌های وابسته به آن مطالعه شده است. اعتبارسنجی حل عددی با مقالات مرجع و نتایج حاصل از آزمایش‌ها صورت گرفته و سپس تاثیر این محرک‌ها روی ضریب پسا و عدد ناسلت تحقیق شده است.

۲- معادلات حاکم بر جریان

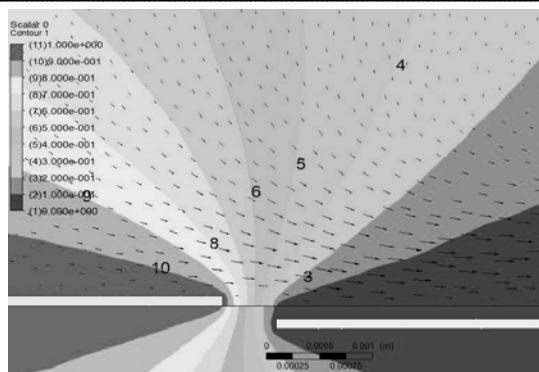
معادلات جریان تراکم‌ناپذیر، لزج و ناپایا که بر مساله دوبعدی فوق‌الذکر صادق است به صورت معادلات (۱-۴) بیان می‌شود:

پیوستگی:

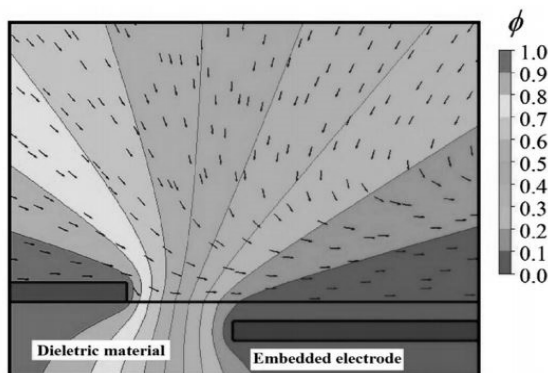
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

مومنتوم:

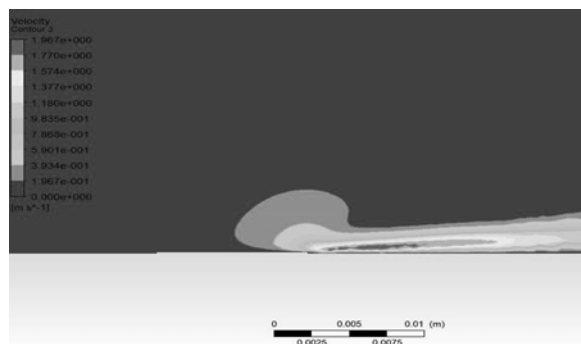
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (۲)$$



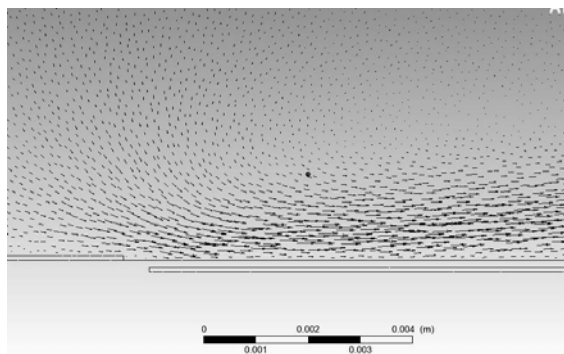
شکل ۳) کانتور تابع پتانسیل حول صفحه تخت با سرعت جریان صفر



شکل ۴) کانتور تابع پتانسیل حول صفحه تخت با سرعت جریان صفر [21]



شکل ۵) کانتور سرعت روی صفحه تخت در سرعت جریان صفر



شکل ۶) بردار سرعت روی صفحه تخت در سرعت جریان صفر

جدول ۱) مقادیر سرعت در موقعیت‌های مختلف

پژوهش	بیشینه سرعت (متر بر ثانیه)	درصد خطا
سوزن [20]	۰/۹۹۴۵۱	-
بوچمال [22]	۰/۹۲۵۸۲	۷/۴۲
حاضر	۰/۹۱۵۱۱۶۴	۷/۹۸

$$\frac{\partial^2(\epsilon_r \rho_c)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\epsilon_r \rho_c)}{\partial y^2} = \frac{\rho_c}{\lambda_D^2} \quad (9)$$

که در این معادلات، ϵ_r ضریب نفوذ دی الکتریک، λ_D طول دیبای، ϕ تابع پتانسیل و ρ_c تابع چگالی است. رابطه نیروی حجمی که به صورت چشمه به معادلات مومنوم اضافه می شود به شکل معادله (۱۰) قابل محاسبه است [20]:

$$f = \rho_c (-\nabla \phi) \quad (10)$$

در این دسته معادلات، تابع پتانسیل و تابع چگالی با مقادیر ϕ_{max} و ρ_{cmax} بی بعد شده اند. که مقدار بیشینه تابع پتانسیل نماینده ولتاژ قله به قله اعمالی به محرک های پلاسمایی است. مقدار تابع پتانسیل بی بعد شده به ترتیب در الکترو د بالایی و پایینی یک است. گرادیان تابع چگالی در الکترو د بالایی صفر در نظر گرفته شده و تابع چگالی در الکترو د پایینی از تابع گاوسی در معادله (۱۱ و ۱۲) پیروی می کند:

$$\rho_c = \rho_{cmax} G(x) \quad (11)$$

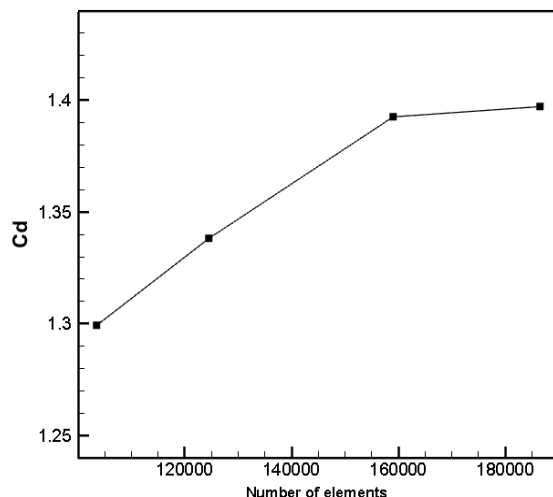
$$G(x) = \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (12)$$

برای محیط، گرادیان تابع پتانسیل و همچنین تابع چگالی صفر فرض می شود. برای مرز بین دی الکتریک و محیط، ضریب نفوذ به صورت میانگین ضریب نفوذ هوا و دی الکتریک بیان می شود.

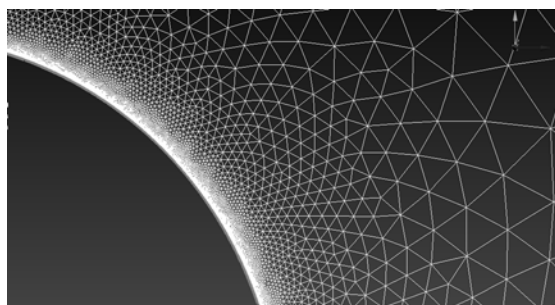
۳- اعتبارسنجی حل عددی

در ابتدا برای حصول از عملکرد محرک پلاسمایی حل محرک پلاسمایی روی صفحه تخت در سرعت صفر در شرایط حل مطالعه جی و همکاران [21] صورت می گیرد. نتایج به صورت کانتور و بردار مربوط به تابع پتانسیل در شکل ۳ نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می شود توزیع تابع پتانسیل بی بعد با کانتور در شکل ۴ مطالعه جی و همکاران [21] مشابه است. همچنین بردارهای سرعت در شکل ۵ نمایش داده شده و برای اطمینان مقادیر سرعت در موقعیت های مختلف با حل عددی مقایسه شده است (جدول ۱) از شکل ۶ به دست می آید جریان هوای ساکن حول محرک ها دچار جریان شده و به سمت محرک ها حرکت می کند. سپس مقایسه ضریب پسا حاصله در رینولدز ۱۰۰ برای یک سیلندر با مراجع مختلف انجام شد که در جدول ۲ شرح داده شده و نشان دهنده صحت حل عددی صورت گرفته از نظر شبیه سازی جریان حول سیلندر است.

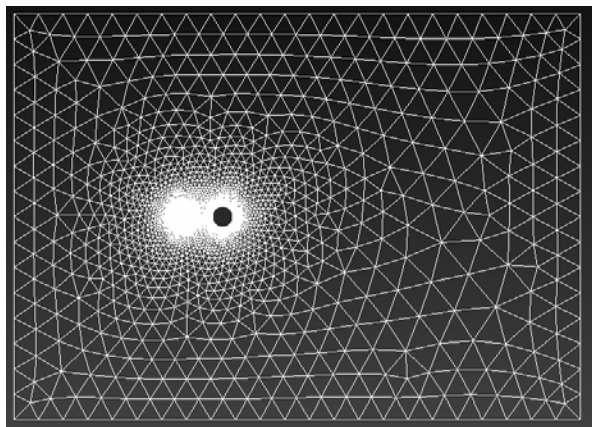
همچنین برای اطمینان از عملکرد محرک پلاسمایی شبیه سازی شده در جریان دارای سرعت حول سیلندر، با توجه به کارهای قبلی موجود، یک سیلندر در جریانی با رینولدز ۱۷۰۰۰ مشابه مطالعه کوزلو [13]، بررسی شده است. در جدول ۳ نتایج مربوط به سرعت جریان ناشی از محرک هایی پلاسمایی در فاصله طولی و عرضی مشخصی از مرکز سیلندر قرار داده شده است که مقدار خطای ۱۰/۵۵٪ دیده می شود. به نظر می رسد که عمل شبیه سازی به طور دقیق انجام نشده اما با توجه به رینولدز بالای این تحقیق و همچنین ماهیت شبیه سازی پلاسمای که پیچیدگی زیادی دارد، تطابق ایجاد شده، مطلوب به نظر می رسد. همچنین شایان ذکر است که طبق جدول ۱ نتایج بوچمال [22] که به عنوان مرجع برای تحقیقات بسیار زیادی استفاده شده است، میزان خطای بیش از ۷٪ با مدل سازی دیگر و نتایج تجربی دارد.



نمودار ۱) نمودار تغییرات ضریب پسا با تعداد المان برای بررسی استقلال از شبکه



شکل ۷) نمونه‌ای از شبکه‌بندی حول یک سیلندر



شکل ۸) نمونه‌ای از شبکه‌بندی برای کل میدان

جدول ۴) مشخصات محرک‌های پلاسمایی

مشخصات	R1	R2
عرض هر الکترود (متر)	۰/۱	۰/۱
ضخامت هر الکترود (متر)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
ضخامت دی الکتریک (متر)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
ضریب نفوذ دی الکتریک	۲/۷	۳/۷
طول دیبای	۰/۰۰۰۱۷	مطابق رابطه ۱۶
فاصله طولی الکترودها (متر)	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵
ρ_c تابع چگالی C/m^3	۰/۰۰۰۷۵	مطابق رابطه ۱۳
ولتاژ اعمالی (کیلوولت)	۱	۵۵

جدول ۲) ضریب پسا حول یک سیلندر در رینولدز ۱۰۰

مرجع	ضریب پسا	انحراف از میانگین نتایج موجود
منگینی [12]	۱/۳۷	۰/۰۵۰۸
دیپک [13]	۱/۳۵۶	۰/۰۳۶۸
تریپتون [23]	۱/۲۵	۰/۰۶۹۲
چانگ [24]	۱/۲۳	۰/۰۸۹۲
پژوهش حاضر	۱/۳۹	۰/۰۷۰۸

جدول ۳) مقادیر سرعت در فاصله‌ی مشخص از مرکز سیلندر

پژوهش	سرعت در موقعیت یکسان (متر بر ثانیه)	درصد خطا
کوزلو [16]	۱۱/۲۳۶	-
حاضر	۱۰/۰۵	۱۰/۵۵

۴- شبکه‌بندی

شبکه‌بندی انجام‌شده برای پژوهش حاضر با نرم‌افزار انسا ۱۵.۱ صورت گرفت و تلاش شد که یک شبکه مثلثی بی‌سازمان با کیفیت استخراج شود. همان‌طور که بیان شد اطلاعات میدان حل از مطالعه ماهیر و [14] و با توجه به نمودار استقلال از شبکه ضریب پسا یک سیلندر در نمودار ۱ که تعداد المان‌هایی که مطلوب هستند ۱۵۸۹۸۲ عدد به دست می‌آید. نمونه‌ای از شبکه‌بندی حول یک سیلندر تنها و میدان حل به‌ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده است.

۵- حل عددی

برای حل عددی مساله تعریف‌شده از یک کد تجاری برای حل معادلات حاکم بر جریان در شرایط مختلف با استفاده از گسسته‌سازی حجم حدود استفاده شد. حل معادلات ناوییر-استوکس و انرژی برای دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ در حالت آرام با گام زمانی ۰/۰۵ انجام شد. برای حل معادلات فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. از روش گسسته‌سازی صریح برای زمان و روش بالادست برای گسسته‌سازی مولفه‌های جابه‌جایی بهره برده شده است. مقدار مانده‌ها در حل معادلات تکراری 10^{-6} است.

مشخصات محرک‌های پلاسمایی استفاده‌شده که در بخش اعتبارسنجی بررسی شدند، در جدول ۴ ارایه شده و تحت عنوان کد یودی‌اف (UDF) به نرم‌افزار فلوئنت ۱۷.۱ اعمال شد. نحوه نصب محرک‌ها در شکل ۹ قابل مشاهده است. نحوه اعمال ولتاژ و پارامترهای محرک‌های پلاسمایی از پایان‌نامه بوچما [22] استخراج شد و متناسب با شرایط مساله تحت عنوان کد R1 و R2 تغییر داده شدند. مقادیری که در پایان‌نامه موجود نبود، با توجه به ولتاژ اعمالی از روابط (۱۳ و ۱۶) برگرفته از مطالعه جی و همکاران [21] استخراج شده‌اند. تمامی حل‌ها با توجه به شرط مانده‌های بیان شده همگرا شدند.

$$\rho_c = 0.02637V_{pp} - 0.1343 \quad (13)$$

$$\mu = 0.15V_{pp} + 0.9 \quad (14)$$

$$\sigma = 0.1V_{pp} - 0.2 \quad (15)$$

$$\lambda_D = 0.2(0.15 \times 10^{-3}V_{pp} - 0.000742) \quad (16)$$

در روابط بالا ρ_c غلظت بار الکتریکی، μ پارامتر موقعیت برای توزیع تابع گوسی و σ پارامتر اسکیل برای توزیع تابع گوسی است.

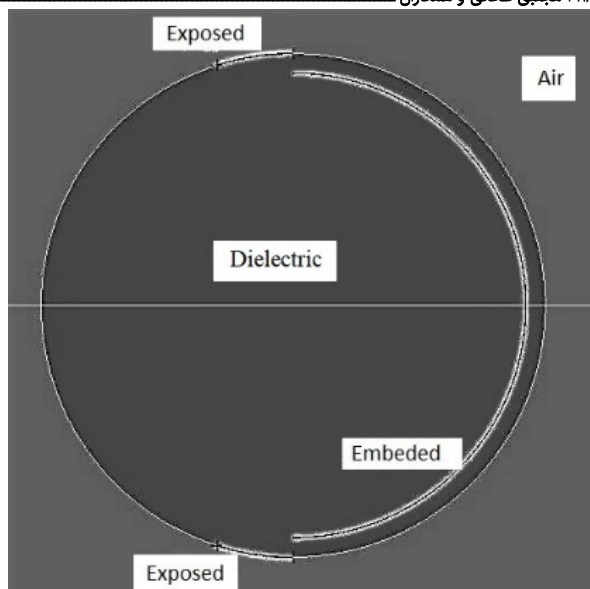
جدول ۵) تغییرات ضریب پسی سیلندر پایین دست در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰، در فواصل نسبی مختلف

L / D	حالت R0 در رینولدز ۱۰۰	حالت R0 در رینولدز ۲۰۰	حالت R1 در رینولدز ۱۰۰	حالت R1 در رینولدز ۲۰۰	حالت R2 در رینولدز ۱۰۰	حالت R2 در رینولدز ۲۰۰
۲	۰/۰۰۱۲	-۰/۲۱	۰/۰۸۵۰۶۵۵	۱۴/۳۵۶۷	۰/۷۶۵۴۶	۱۱/۶۲۸۷
۳	-۰/۰۴۸	-۰/۱۷	۰/۹۵۴۶۷	۱۶/۷۶۸۹	۰/۷۹۸۹۷	۱۰/۷۵۴۹
۴	۰/۷۶۴	۰/۵۵۸	۱/۲۳۱	۱۸/۸۶۷۸	۱/۱۳۹۸	۲۱/۸۹۱۲
۵	۰/۸۷۴	۰/۴۴۵	۱/۴۵۶۷	۱۸/۵۴۳۴	۱/۳۸۹۷	۲۲/۵۴
۷	۰/۶۸۲	۰/۴۴۲	۱/۵۶۷۸	۱۷/۸۹	۱/۵۱۸۹	۱۸/۲۷۴۵
۱۰	۰/۷۳۱	۰/۹	۱/۶۷۸	۱۵/۹۸۲۷	۱/۷۱۲۴	۱۶/۹۸۲۸

نمودار ۲- الف نمایانگر تغییرات ضریب پسا در رینولدز ۱۰۰ با اعمال محرک‌ها در دو حالت و در فواصل نسبی مختلف است. در حالتی که R2 به جریان اعمال شده با توجه به اینکه ولتاژ قله به قله ۵۵ کیلوولت است، جریان بسیار قدرتمندی اعمال می‌کند به گونه‌ای که بیشینه سرعت جریان چندین برابر سرعت جریان آزاد است و همین سبب شده که سیلندر پایین دست ضریب پسی بسیار بالایی را تجربه کند. در این حالت در فاصله نسبی ۴، بیشینه ضریب پسا حاصل شده در صورتی که در حالت بدون اعمال محرک‌ها بیشینه ضریب پسا در فاصله نسبی ۵ بوده است. برای علت این اتفاق می‌توان چنین شرح داد که افزایش مومنتوم برخوردی با سیلندر دوم ناشی از اعمال محرک‌ها بر سیلندر اول بسیار زیاد بوده است و سبب شده محل قرارگیری گردابه‌ها در دنباله سیلندر اول دچار تغییر شوند. در حالت R1 مقدار افزایش ضریب پسا نسبت به حالت R2 کمتر بوده است که با توجه به تفاوت این دو حالت در مقدار ولتاژ اعمالی برای محرک‌ها، منطقی است. نکته قابل توجه برای این حالت این موضوع است که نقطه بیشینه‌ای برای ضریب پسا وجود ندارد که برای طراحی و ساخت، نتیجه‌ای حائز اهمیت است.

در نمودار ۲- ب تغییرات ضریب پسا در رینولدز ۲۰۰ با اعمال محرک‌ها در دو حالت و در فواصل نسبی مختلف است. در حالتی که ولتاژ بالاتر اعمال شده افزایش ضریب پسا بسیار بیشتر از حالت R1 است. در این حالت اتفاق قابل توجه در فاصله نسبی ۳ رخ می‌دهد که مقدار ضریب پسا یک افت را نسبت به فاصله نسبی ۲ دارد. این اتفاق در مقدار ضریب پسا در حالت خام نیز رخ می‌دهد به گونه‌ای که حتی ضریب پسا منفی نیز می‌شود یعنی با اعمال محرک‌های پلاسمایی، رفتار ضریب پسا در این فواصل نسبی تغییری نکرده است تا فاصله نسبی ۱۰ که برخلاف حالت خام، مقدار ضریب پسا نسبت به فاصله نسبی ۷ افت می‌کند. این اتفاق را می‌توان با توزیع گردابه‌ها در فواصل مختلف دنباله سیلندر توضیح داد. همان‌طور که در نمودار قبلی قابل مشاهده بود، اعمال محرک‌ها آرایش قرارگیری گردابه‌ها در دنباله را تغییر می‌دهد. همچنین در فواصل ۴ و ۵ بیشینه‌هایی برای مقدار ضریب پسا دیده می‌شود که در حالت R1 این بیشینه‌ها وجود ندارند که اگر از منظر طراحی به آن نگاه شود، در این رینولدز نیز این حالت رفتار بهتری را دارد.

در جدول ۶ نتایج مربوط به تغییرات عدد ناسلت سیلندر پایین دست در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰، در فواصل نسبی مختلف قرار گرفته است. افزایش فاصله نسبی در ابتدا منجر به افزایش عدد ناسلت شده و بعد از فاصله نسبی ۴ تقریباً ثابت می‌شود. این امر نشان می‌دهد که قرارگیری سیلندر دوم در سیلندر اول به گونه‌ای است که برخوردی ناگهانی گردابه‌ها روی آن وجود ندارد که تغییرات شدید در عدد ناسلت ایجاد کند و پس از فاصله مشخصی در جریانی یکنواخت از دنباله گردابه‌ها غوطه‌ور است. شیب افزایش عدد ناسلت در هر دو عدد رینولدز پس از فاصله نسبی ۳ شدید



شکل ۹) محل قرارگیری الکترودها

۶- بحث و نتایج

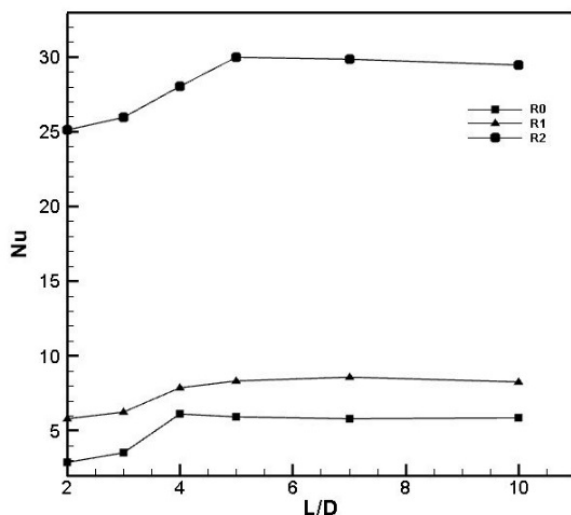
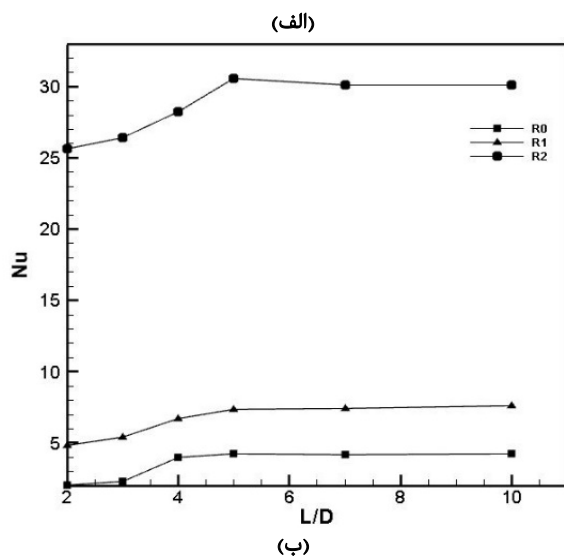
نتیجه‌های استخراج شده مربوط به ضرایب پسا و عدد ناسلت متعلق به سیلندر پایین دست ارایه شده است. نتایج با حالت سیلندرهای بدون محرک‌های پلاسمایی (R0) مقایسه شده و تحلیل‌هایی روی آن صورت گرفته است. نمودارهای مربوط به تغییرات ضریب پسا و عدد ناسلت در دو شرایط اعمال پلازما با توابع تعریف شده R1 و R2 در دو رینولدز مختلف رسم شده است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهند که اعمال محرک‌های پلاسمایی سبب افزایش ضریب پسا و عدد ناسلت سیلندر پایین دست می‌شود.

در جدول ۵ نتایج مربوط به تغییرات ضریب پسی سیلندر پایین دست در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰، در فواصل نسبی مختلف قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است در فواصل نسبی کمتر از ۳ ضرایب پسا مقادیر ناچیز و حتی منفی به خود گرفته‌اند که این موضوع با نتایج سایر محققان نیز تطابق دارد [14]. علت این امر را می‌توان از این منظر توضیح داد که سیلندر دوم به علت فاصله کم با سیلندر اول کاملاً در دنباله آن قرار دارد. در نتیجه جریانی با سرعت مشخص با آن برخورد نمی‌کند و در هوای اصطلاحاً مرده و جریان‌های گردابه‌ای غوطه‌ور است. از منفی شدن مقدار ضریب پسا در فواصلی می‌توان برداشت نمود که جریان‌های گردابه‌ای موجود در دنباله روی سیلندر دوم قرار دارند که در برخی حالت‌ها به سیلندر نیروی پیشران می‌دهند. رفتار تغییرات ضریب پسا با فواصل نسبی در دو عدد رینولدز، متفاوت است و نشان می‌دهد که این موضوع کاملاً وابسته به عدد رینولدز است. در رینولدز ۱۰۰ بیشینه ضریب پسا مربوط به فاصله نسبی ۵ است و در رینولدز ۲۰۰ ضریب پسی مربوط به فاصله نسبی ۱۰ بیشینه است هرچند در این حالت یک قله در فاصله نسبی ۴ نیز دیده می‌شود. علت این موضوعات به نظر می‌رسد که در نحوه تشکیل گردابه‌های مخصوص جریان پشت سیلندر باشد که فرکانس آنها در رینولدزهای مختلف متفاوت است. همین امر سبب شده که قراردادن سیلندر دوم در دنباله سیلندر اول، جریان کاملاً متفاوتی را در فواصل مختلف تولید کند. به طور کلی می‌توان چنین توضیح داد که در فواصلی که بیشینه مطلق یا نسبی ضریب پسا وجود دارد، سیلندر دوم در نقطه‌ای از دنباله سیلندر اول قرار گرفته که یک گردابه پادساعتگرد قرار دارد و سبب ایجاد یک نیروی پسا برای سیلندر دوم می‌شود.

عدد ناسلت است. همان‌طور که پیش از این ذکر شد شیب ملایم‌تر سبب می‌شود که در طراحی‌هایی که مد نظر است تا L/D متغیر باشد، گستره تغییرات به‌گونه‌ای باشد که آسیب کمتری به سازه وارد شود.

جدول ۶ تغییرات عدد ناسلت سیلندر پایین‌دست در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰، در فواصل نسبی مختلف

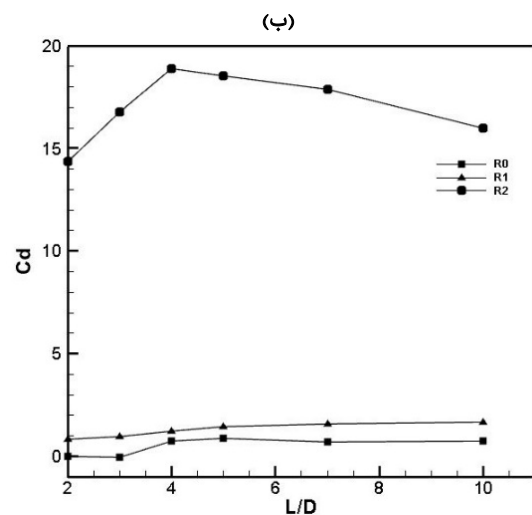
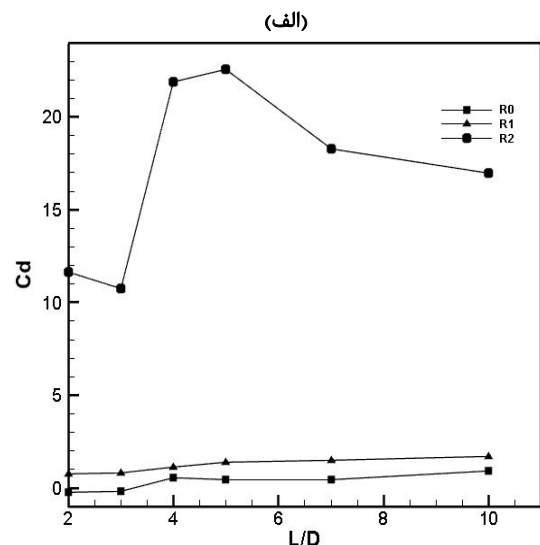
L / D	حالت R0 در رینولدز ۲۰۰	حالت R0 در رینولدز ۱۰۰	حالت R1 در رینولدز ۲۰۰	حالت R1 در رینولدز ۱۰۰	حالت R2 در رینولدز ۲۰۰	حالت R2 در رینولدز ۱۰۰
۲	۲/۰۳	۲/۸۸	۴/۸۳۲	۴/۸۳۲	۲۵/۱۲۹	۲۵/۱۲۹
۳	۲/۲۹۳	۳/۵۴	۵/۳۹۷	۵/۳۹۷	۲۵/۹۷۴	۲۵/۹۷۴
۴	۴/۰۲	۶/۱۵	۶/۷۴۳	۶/۷۴۳	۲۸/۰۳۱	۲۸/۰۳۱
۵	۴/۲۸	۵/۹۶	۷/۳۸۱	۷/۳۸۱	۲۹/۹۸۲	۲۹/۹۸۲
۷	۴/۲۱	۵/۸۳	۷/۴۳۸	۷/۴۳۸	۲۹/۸۳۱	۲۹/۸۳۱
۱۰	۴/۲۷	۵/۸۴	۷/۵۹۱	۷/۵۹۱	۲۹/۴۳۷	۲۹/۴۳۷



نمودار ۲ عدد ناسلت برای فواصل نسبی مختلف، (الف) در رینولدز ۱۰۰، (ب) در رینولدز ۲۰۰

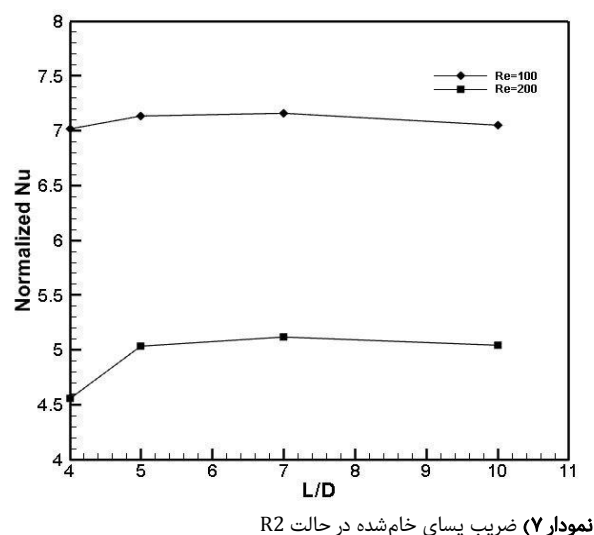
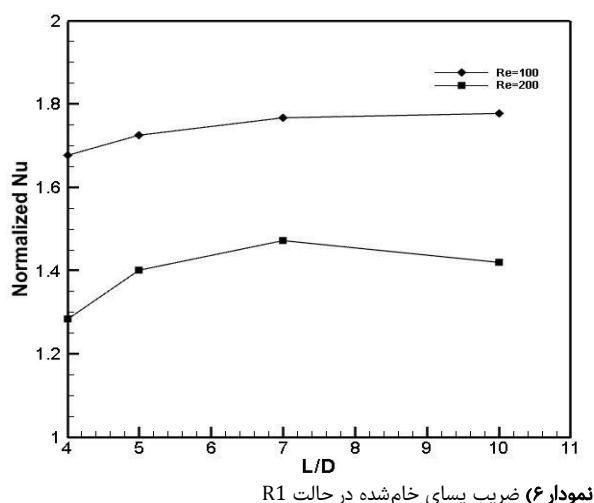
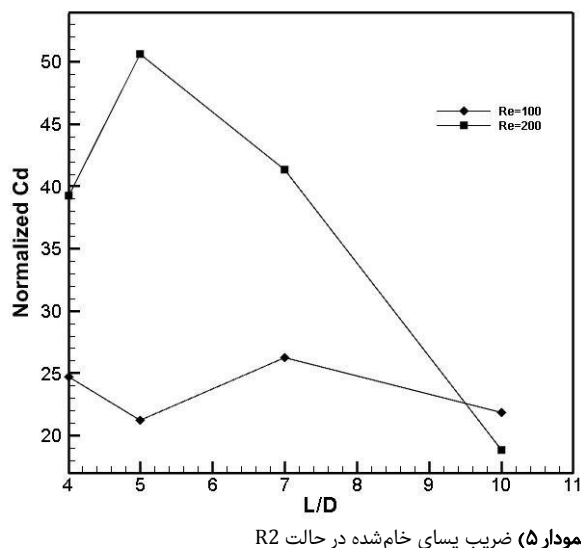
برای بررسی تأثیرات عدد رینولدز، مقدار ضریب پسا و عدد ناسلت هر موقعیت در حالت اعمال پلازما به مقدار همین اعداد در حالت خام تقسیم شده است. مقدار حاصله، عدد است که مفهوم میزان تغییرات در اثر افزودن پلازما را نشان می‌دهد. از این مفهوم برای

است. به‌گونه‌ای که در رینولدز ۱۰۰ مقدار شیب ۱.۷۲۷ و در رینولدز ۲۰۰ این مقدار ۲/۶۱ است.



نمودار ۳ ضریب پسا برای فواصل نسبی مختلف، (الف) در رینولدز ۱۰۰، (ب) در رینولدز ۲۰۰

نمودار ۳- الف نشان‌دهنده تغییرات عدد ناسلت در رینولدز ۱۰۰ با اعمال محرک‌ها در فواصل نسبی مختلف و در دو حالت R1 و R2 است. اعمال محرک‌ها سبب شده که سیلندر دوم عدد ناسلت بیشتری را داشته باشد. در حالت R2 روند افزایش عدد ناسلت تا فاصله نسبی ۴ و سپس ثابت‌بودن آن حفظ شده با این تفاوت که شیب افزایش ناسلت از فاصله نسبی ۳ به ۴ بیشتر شده است. (۱/۷۸۵) یعنی در این حالت مقدار شیب ۳/۳۶٪ افزایش یافته است. این افزایش یکی از معایب اعمال محرک‌ها است زیرا بهتر است که تغییرات ناگهانی در مقادیر آیرودینامیکی وجود نداشته باشد. در حالت R1 روند افزایشی تا فاصله نسبی ۵ ادامه دارد و پس از آن مقدار ثابت می‌شود. همین امر سبب شده که شیب افزایش کمتر باشد و حالت مطمئن‌تری را از این منظر داشته باشد. در نمودار ۳- ب تغییرات عدد ناسلت در رینولدز ۲۰۰ و فواصل نسبی مختلف برای حالت‌های اعمال محرک‌ها و بدون اعمال محرک‌ها رسم شده است. روند تأثیر فاصله نسبی روی مقادیر عدد ناسلت همانند رفتار در رینولدز ۱۰۰ است و نکته قابل توجه شیب آرام افزایش ناسلت در فاصله نسبی ۴ تا ۵ و سپس ثابت‌شدن مقدار

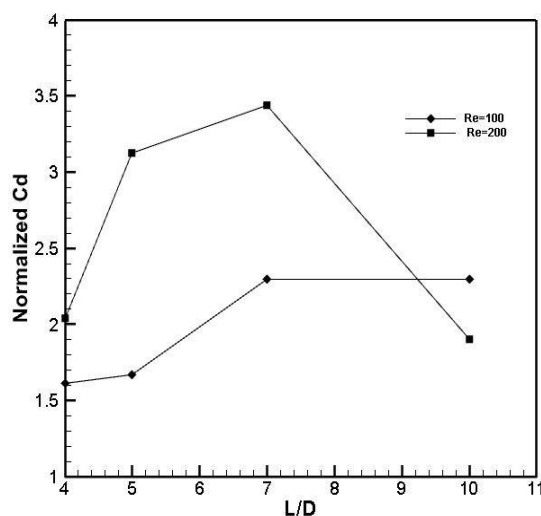


۷- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر محرک های پلاسمایی روی سیلندرها در حالت آرایش پشت سرهم بوده است به گونه ای که محرک ها روی سیلندر اول اعمال شده و نتیجه اش روی سیلندر

نشان دادن تاثیر افزایش عدد رینولدز جریان روی پارامترهای مورد بحث در فواصل نسبی مختلف بهره گرفته شده است. نمودار ۴ نمایانگر ضریب پسای خام شده در حالت R1 و در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ است. تاثیر فواصل نسبی در رینولدزهای مختلف، متفاوت است. البته تا پیش از فاصله نسبی ۷، در هر دو رینولدز روند افزایشی برای ضریب پسای خام شده دیده می شود. به طور کلی مطلوب است که تغییرات کمتر بوده تا طراحی برای دامنه کاری وسیع تری صورت پذیرد. در رینولدز ۱۰۰ یک افت ناگهانی در فواصل نسبی بالاتر از ۷ دیده می شود که با روندی خطی تا دورترین فاصله ادامه دارد. علت این امر می توان چنین تفسیر شود که با توجه به کمتری مقدار عدد رینولدز، مقدار مومنتوم جریان نیز کمتر شده است، در نتیجه تاثیر محرک های پلاسمایی که با مومنتوم ثابت کار می کنند، بیشتر بوده است. همچنین کمتری مقدار مومنتوم این توانایی را از جریان آزاد سلب کرده تا به گردابه های تشکیل شده ناشی از سیلندر اول غلبه کرده و در نتیجه سیلندر دوم کاهش ضریب پسا را به مرور حس می کند. این موضوع در نمودار ۵ که نشان دهنده تغییرات ضریب پسای خام شده در حالت R2 است نیز به خوبی دیده می شود. در این حالت با توجه به قدرتمندتر بودن پلاسمای اعمالی، از فاصله نسبی کمتری افت ضریب پسا در رینولدز ۱۰۰ مشاهده می شود که تاییدی بر توضیحات مربوط به شکل قبلی است.

در نمودار ۶ مقدار عدد ناسلت خام شده در حالت R1 و در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ نمایان است. با توجه به این موضوع که روش کنترل جریان استفاده شده اصولاً کاربرد آیرودنامیکی دارد، پیچیدگی های ایجاد شده ناشی از آن بر انتقال حرارت کمتر است. روند تغییرات ناسلت با ضریب پسا در همین حالت برای رینولدز ۲۰۰ قابل مقایسه بوده و رفتارها یکسان است. اما در رینولدز ۱۰۰ افت ناگهانی دیده نشده و رفتاری تقریباً ثابت در عدد ناسلت خام شده دیده می شود. میزان ثابت بودن عدد ناسلت با افزایش فاصله نسبی در هر دو حالت R1 و R2 دیده می شود که نمودار ۷ نیز نمایانگر این موضوع است. در واقع از رفتار عدد ناسلت می توان چنین استنباط نمود که محرک هایی پلاسمایی در هر دو حالت و در فواصل نسبی مختلف، گردابه ها یا پدیده هایی خاصی که روی انتقال حرارت سیلندرها تاثیرگذار باشد ایجاد نکرده اند. تنها می توان بیان نمود که با افزایش عدد رینولدز تاثیر محرک ها کمتر شده است.



نمودار ۴) ضریب پسای خام شده در حالت R1

V_{PP}	ولتاژ قله به قله (kv)
Re	عدد رینولدز
C_l	ضریب لیفت
C_d	ضریب درگ
Nu	عدد ناسلت
∇	عملگر گرادینان ($1/m$)

منابع

- 1- Joshi SN, Gujarathi YS. A review on active and passive flow control techniques. International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering. 2016;3(4):1-6.
- 2- Gad-el-Hak M. Flow control: Passive, active, and reactive flow management. Cambridge UK: Cambridge University Press; 2000.
- 3- Flatt J. The history of boundary layer control research in the United States of America. In: Lachmann GV. Boundary layer and flow control. 1st Volume. Oxford: Pergamon Press; 1961. pp. 122-143.
- 4- Joslin RD, Miller DN. Fundamentals and applications of modern flow control. Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2009.
- 5- El-Khabiry S, Colver GM. Drag reduction by dc corona discharge along an electrically conductive flat plate for small Reynolds number flow. Physics of Fluids. 1997;9(3):587.
- 6- Roth J, Sherman D, Wilkinson S. Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma. 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 12-15 January 1998, Reno, NV, USA. Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1998.
- 7- Corke TC, Enloe CL, Wilkinson SP. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. Annual review of fluid mechanics. vol. 2010;42(1):505-529.
- 8- Hanson RE, Houser NM, Lavoie P. Dielectric material degradation monitoring of dielectric barrier discharge plasma actuators. Journal of Applied Physics. 2014;115(4):043301.
- 9- Patel MP, Ng TT, Vasudevan S, Corke TC, Post M, Mc Laughlin TE, et al. Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator. Journal of Aircraft. 2008;45(1):223-236.
- 10- Kriegseis J, Simon B, Grundmann S. Towards in-flight applications? a review on dielectric barrier discharge-based boundary-layer control. Applied Mechanics Reviews. 2016;68(2):020802.
- 11- Mittal S, Kumar V, Raghuvanshi A. Unsteady incompressible flows past two cylinders in tandem and staggered arrangements. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 1997;25(11):1315-1344.
- 12- Meneghini JR, Saltara F, Siqueira CLR, Ferrari Jr JA. Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements. Journal of Fluids and Structures. 2001;15(2):327-350.
- 13- Ding H, Shu C, Yeo KS, Xu D. Numerical simulation of flows around two circular cylinders by mesh-free least square-based finite difference methods. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2007;53(2):305-332.
- 14- Mahir N, Altaç Z. Numerical investigation of convective heat transfer in unsteady flow past two cylinders in tandem arrangements. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2008;29(5):1309-1318.

پایین‌دست بررسی شود. بررسی در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ صورت گرفت و همچنین از دو شرایط متفاوت اعمال محرک‌ها استفاده شد. به‌طور کلی هنگامی که سیلندری در پشت سیلندر دیگری در جریان قرار می‌گیرد به‌علت اینکه در دنباله سیلندر اول است، دارای ضریب پسا و عدد ناسلت کمتری از حالت تنها خواهد بود چون جریان کمتری را حس می‌کند. اما نتایج نشان دادند، در زمانی که از محرک‌های پلاسمایی استفاده می‌شود به‌علت اینکه جریان سیلندر جلویی مجدداً به سطح متصل شده و جدایش‌های جریان کنترل می‌شوند، در واقع سیلندر پایین‌دست، جریان اعمالی جدیدی را حس می‌کند که دیگر مربوط به ناحیه دنباله نیست. همچنین نتایج نمایان کردند که افزایش قدرت پلاسمای اعمالی لزوماً نتیجه مطلوب را حاصل نمی‌کند. با وجود اینکه افزایش ضریب پسای ناشی از اعمال محرک‌ها در حالتی که پلاسما قوی‌تر بود، بیشتر بوده است اما تغییرات شدید در ضرایب حاصله دیده شد. به‌عنوان مثال در رینولدز ۲۰۰، در حالت R1 ضریب پسا تقریباً شیب ثابتی دارد در حالی که برای حالت R2 از فاصله نسبی ۳ به ۴، بیش از ۱۰۰٪ افزایش دیده می‌شود و مجدداً از فاصله نسبی ۵ تا ۷ ضریب پسا بیش از ۲۰٪ افت می‌کند. با توجه به ملاحظات سازه‌ای ثابت و بعضاً غیرقابل تغییر سازه‌های مهندسی، بهتر است که تغییرات شدید در ضرایب آیرودینامیکی وجود نداشته باشد تا گستره فعالیت اجسام طراحی‌شده بیشتر شود. همچنین رینولدزهای آزمایش‌شده نشان دادند که استفاده از پلاسمایی با قدرت ثابت در رینولدزهای مختلف نمی‌تواند تصمیمی صحیح باشد و باید کنترل جریان را اصطلاحاً هوشمند کرد تا با استفاده از پارامترهای جریان، مومنتوم اعمالی را تغییر دهد. در مجموع اعمال محرک‌های پلاسمایی سبب می‌شود که سیلندر دوم ضریب پسا و عدد ناسلت بیشتری را تجربه کند که کاربرد این موضوع در خنک‌کاری پره‌ها و مزرعه‌های توربین‌های بادی پسا- مبنای بسیار قابل توجه خواهد بود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تا کنون در نشریه‌ی دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه‌ی دیگری ارسال نشده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی در این تحقیق وجود ندارد و حقوق همه‌ی افراد در نظر گرفته شده است.

سهم نویسندگان: مجتبی طحانی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۴٪)؛ مصطفی کاظمی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۳۳٪)؛

زهرا بابائی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۳۳٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

۸- پی‌نوشت

فهرست علائم

P	فشار (پاسکال)
u, v	مولفه‌های سرعت
D	قطر سیلندر (متر)
θ	زاویه
ν	ویسکوزیته سینماتیکی
ρ	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)
T	دما (کلوین)
ϵ_r	نفوذپذیری نسبی ($\frac{C}{Nm^2}$)
ϕ	تابع پتانسیل
ρ_c	غلظت بار الکتریکی ($\frac{C}{m^3}$)
λ_D	طول دیبای (متر)

control using plasma actuators. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada. Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2006.

21- Ji Sh, Zhang B, Li J, Wang G. Numerical study for active flow control using dielectric barrier discharge actuators. *Journal of Aerospace Engineering*. 2017;30(5):04017050.

22- Bouchmal A. Modeling of dielectric-barrier discharge actuator: Implementation, validation and generalization of an electrostatic model [Dissertation]. Delft: Delft University of Technology; 2011.

23- Tritton DJ. Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. 1959;6(4):547-567.

24- Sa JY, Chang KS. Shedding patterns of the near-wake vortices behind a circular cylinder. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 1991;12(5):463-474.

15- Choi H, Jeon WP, Kim J. Control of flow over a bluff body. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2008;40(1):113-139.

16- Kozlov AV, Thomas FO. Plasma flow control of cylinders in a tandem configuration. *AIAA Journal*. 2011;49(10):2183-2193.

17- Kozlov AV, Thomas FO. Bluff-body flow control via two types of dielectric barrier discharge plasma actuation. *AIAA Journal*. 2011;49(9):1919-1931.

18- Igarashi T, Naito H, Fukagata K. Direct numerical simulation of flow around a circular cylinder controlled using plasma actuators. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014;2014:591807.

19- Eltaweel A, Wang M, Kim D, Thomas FO, Kozlov AV. Numerical investigation of tandem-cylinder noise reduction using plasma-based flow control. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014;756:422-451.

20- Suzen Y, Huang G. Simulations of flow separation