# Archive of SID



#### ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9):2111-2120

# 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

## A B S T R A C T

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 Vp-p=55kv and Vp-p=1kv 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

#### 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.

#### CITATION LINKS

<sup>1</sup>Aerospace 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 [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 inflight 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 tandemcylinder 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

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommunity 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

# بررسی عملکرد آیرودینامیکی و انتقال حرارت سیلندرها تحت اثر محرکهای پلاسمایی

## مجتبی طحانی<sup>•</sup> 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

#### چکیدہ

امروزه یکی از پرکاربردترین روشهای کنترل جریان در حوزهی 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 اعمالشده، بررسی شده است. سیلندرها در فواصل نسبی (L/D) مختلف از یکدیگر قرار داده شدند و تحقیقات در دو رینولدز ۱۰۰ و از حالتها گرفته و در دو شرایط متفاوت اعمال محرکها انجام شده است. یکی از حالتها دارای ولتاژ قلهبه 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 اعمال محرکهای پلاسمایی سبب شد که سیلندر دوم در تمامی حالتها ضریب پسا و عدد ناسلت بیشتری را تجربه کند. همچنین تأثیر 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 آئرودینامیک است. اصلاح الگوی جریان، افزایش نیروی برآ، کاهش نیروی پسا از مهمترین اهداف کنترل جریان محسوب میشوند. پیشرفتها و توسعه روشهای مورداستفاده در کنترل جریان در قرن گذشته نشاندهنده اهمیت آن است<sup>[1]</sup>.

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

ویلیامز و مک مینوزکی 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 بهعنوان محرک محقق میشود. بهطور کلی میتوان اینطور بیان نمود که تفاوت اساسی میان کنترل جریان در عصر تجربی و مدرن میزان انرژی مصرفی برای ایجاد تغییرات یکسان است<sup>[4]</sup>.

در یک دهه گذشته استفاده از محرکهای پلاسمای دیبیدی بهعنوان 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<sup>[5, 6]</sup>. این محرکها بهعلت مزایای برجستهای که داشتند از جمله عدم وجود بخش متحرک، وزن بسیارپایین، مدتزمان پاسخ بسیارکم در حالت ناپایا، توانایی نصب روی سطوح مختلف بهسرعت در آئرودینامیک فراگیر شدند[7].

همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است محرکهای دیبیدی عموماً از یک الکترود بالایی و یک الکترود زیرین تشکیل شده است. این دو الکترود توسط ماده عایقی از هم جدا شدهاند. ضریب ماده عایق استفاده شده برای ساخت محرکهای دیبیدی و همچنین ضخامت آن در تشکیل پلاسما نقش بسیار مهمی را ایفا میکند. از رایج ترین مواد عایق مورد استفاده می توان به نوعی پلی ایمید با نام تجاری کاپتون و نوعی تفلون (TPFE) اشاره نمود<sup>[8]</sup> (شکل ۱).



**شکل ۱)** طرحواره اجزای دیبیدی

الکترودهای مورد استفاده در محرکهای دیبیدی اگر بهوسیله 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 الکترودها میشود. در دیدگاه کلاسیک گاز یونیزه شده گونه ای از پلاسما است به همین دلیل نیز نام پلاسما بر این نوع از محرکها اضافه شده است<sup>[9]</sup>. وجود میدان الکتریکی تشکیل شده توسط الکترودها که وابسته به شکل الکترودها است موجب وارد شدن نیروی حجمی به مولکولهای هوا می شود.

کریگسنیس در یک مقاله مروری، کاربردها و نکات برجسته موجود در حوزه دیبیدی و کنترل لایه مرزی را بیان کرده است<sup>[10]</sup>. یک دسته از اجسام بسیار پرکاربرد در آئرودینامیک، اجسام استوانهای هستند. سیلندرها نماینده این دسته از اجسام هستند که با توجه به حضور بسیارزیاد اجسام استوانهای در طبیعت و صنایع، از اهمیت بالایی برخوردارند. برای شبیهسازی و آزمایشها از این اجسام بهعنوان نمایندهای از خودروها، بالگردها، بدنه هواپیما، توربینهای بادی و ساختمانها استفاده میشود. بهطور خاص در زمانی که این اجسام بهصورت پشتسرهم قرار میگیرند، تاثیر جریانهای ثانویهای که روی یکدیگر دارند و اهمیت آنها در هنگام شده که به موضوع تحلیل جریان حول سیلندرها هنگامی که آرایشی خاص و پشتسرهم دارند توجه ویژهای شود.

میتال و همکاران<sup>[11]</sup> 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 بهشدت وابسته به فاصله سیلندرها و عدد رینولدز است و در تمامی حالتها که سیلندر دوم در دنباله سیلندر اول قرار

میگیرد نیروی ناپایای بزرگی را تجربه میکند. *منگینی* و همکاران<sup>[12]</sup> به روش المان محدود، همچنین *دینگ* و همکاران<sup>[13]</sup> به روش اختلاف محدود جریان بین دو سیلندر در آرایش پشتسرهم و کنار هم در دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ شبیهسازی کردند و با هدف آشکارسازی جریان، کانتورهای گردابه را رسم نمودند. *ماهیر* و *آرایک*<sup>[14]</sup> در آرایش پشتسرهم 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<sup>[15]</sup> در یک مقاله مروری به انواع روشهای فعال و غيرفعال كنترل جريان حول اجسام استوانهاى يرداخته است. استفاده از محرکهای پلاسمای دیبیدی نیز برای کنترل جریان حول اجسام استوانهای با توجه به مزایای بیان شده از مسائلی یرکاربرد است. کوزلو و توماس<sup>[16]</sup> با اعمال محرکهای یلاسمایی روی سیلندر اول در آرایش پشتسرهم با هدف کاهش نویز از طریق کاهش تاثیر اغتشاشات ناپایای فشار در سیلندر پاییندست انجام دادند که در هر دو نوع محرک تاثیر ملایم دنباله در سیلندر یاییندست مشاهده شد. همچنین در مطالعهای دیگر<sup>[17]</sup> تاثیر محرک دیبیدی برای کنترل ریزش گردابه از سیلندر دایروی در رینولدز ۸۵۰۰۰ را بهصورت تجربی بررسی کردند. *ایگاراشی* و همکاران<sup>[18]</sup> 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. *التاویل* و همکاران<sup>[19]</sup> با هدف کاهش نویز به روش گردابههای بزرگ کنترل جریان حول دو سیلندر پشتسرهم 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 پشتسرهم و در فواصل مختلف قرارگیری انجام نشده است. هدف اصلی در پژوهش پیشرو، پشتسرهم است. بهصورتی 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، ۲ و ۱۰ از یکدیگر قرار داده شده تا تاثیر فاصله بین دو سیلندر روی جریان حول آنها بررسی شود. بررسیها در دو رینولدز ۱۰۰ و۲۰۰ بهمنظور اعتبارسنجی نتایج صورتگرفته و دو شرایط متفاوت اعمال محرکها از منظر ولتاژ قلهبهقله 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

# ۲- معادلات حاکم بر جریان

معادلات جریان تراکمناپذیر، لزج و ناپایا که بر مساله دوبعدی فوقالذکر صادق است بهصورت معادلات (۱–۴) بیان میشود: پیوستگی:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

مومنتوم:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{t}} + u\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + v\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + v(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \tag{Y}$$

Volume 19, Issue 9, September 2019 www.SID.ir

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{t}} + u \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} + v \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{(4)}$$

انرژی:

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

که در این معادلات u و v مولفههای سرعت، q فشار، q چگالی، vلزجت سینماتیکی، T دما و  $\alpha$  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 است.

میدان محاسباتی همانند مطالعهای<sup>[14]</sup> انتخابشده که به همراه شرایط مرزی در شکل ۲ قابلمشاهده است.

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

$$C_l = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho D U_{\infty}^2} \tag{(a)}$$

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho D U_{\infty}^2} \tag{8}$$

$$Nu = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{hD}{k} d\theta \tag{Y}$$

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



**شکل ۲)** میدان محاسباتی و شرایط مرز

شبیهسازی محرکهای پلاسمایی بهعلت درگیر شدن معادلات ماکسول به معادلات ناویر استوکس بسیار پیچیده است. مدلهای مختلفی برای این شبیهسازی ارایهشده که یکی از بهترینهای آنها مدل سوزن است که در این مدل برای محاسبه اثر محرکها بهصورت 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 الکترود، معادله (۸) و دیگری برای پتانسیل در اثر ذرات باردار معادله (۹) میتوان نوشت<sup>[02]</sup>:

$$\frac{\partial^2(\varepsilon_r\phi)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\varepsilon_r\phi)}{\partial y^2} = 0 \tag{(A)}$$

**Modares Mechanical Engineering** 

۲۱۱۴ مجتبی طحانی و همکاران ــ

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

که در این معادلات،  $\mathcal{E}_r$  ضریب نفوذ دیالکتریک،  $\lambda_D$  طول دیبای،  $\phi$  تابع پتانسیل و  $\rho_c$  تابع چگالی است. رابطه نیروی حجمی که بهصورت چشمه به معادلات مومنتوم اضافه میشود به شکل معادله (۱۰) قابل محاسبه است $^{[20]}$ :

$$f = \rho_{\mathcal{C}}(-\nabla \phi) \tag{1}$$

 $\phi_{max}$  در این دسته معادلات، تابع پتانسیل و تابع چگالی با مقادیر  $\phi_{max}$  و  $\rho_{Cmax}$  بیبعد شدهاند. که مقدار بیشینه تابع پتانسیل نماینده ولتاژ قله به قله اعمالی به محرکهای پلاسمایی است. مقدار تابع پتانسیل بیبعدشده بهترتیب در الکترود بالایی و پایینی یک است. گرادیان تابع چگالی در الکترود بالایی صفر در نظر گرفته شده و تابع چگالی در الکترود بالایی مفاد (۱۱ و ۱۲) پیروی میکند:

$$\rho_{c} = \rho_{c_{max}} G(x) \tag{11}$$

$$G(x) = \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{1Y}$$

برای محیط، گرادیان تابع پتانسیل و همچنین تابع چگالی صفر فرض میشود. برای مرز بین دیالکتریک و محیط، ضریب نفوذ بهصورت میانگین ضریب نفوذ هوا و دیالکتریک بیان میشود.

# 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<sup>[12]</sup> صورت میگیرد. نتایج بهصورت کانتور و بردار هربوط به تابع پتانسیل در شکل ۳ نشان داده شده است و همانطور که مشاهده میشود توزیع تابع پتانسیل بیبعد با کانتور در شکل ۴ مطالعه جی و همکاران<sup>[12]</sup> مشابه است. همچنین بردارهای سرعت در شکل ۵ نمایش دادهشده و برای اطمینان مقادیر سرعت در موقعیتهای مختلف با حل عددی مقایسه شده است (جدول ۱) از شکل ۶ به دست میآید جریان هوای ساکن حول محرکها دچار جریانشده و به سمت محرکها حرکت میکند. سپس مقایسه ضریب پسا حاصله در رینولدز ۱۰۰ برای یک سیلندر با مراجع مختلف انجام شد که در جدول ۲ شرح داده شده و نشاندهنده صحت حل عددی صورتگرفته از نظر شبیهسازی جریان حول سیلندر است.

همچنین برای اطمینان از عملکرد محرک پلاسمایی شبیهسازی شده در جریان دارای سرعت حول سیلندر، با توجه به کارهای قبلی موجود، یک سیلندر در جریانی با رینولدز ۱۲۰۰۰ مشابه مطالعه *کوزلو*<sup>[13]</sup>، بررسی شده است. در جدول ۳ نتایج مربوط به سرعت جریان ناشی از محرکهایی پلاسمایی در فاصله طولی و عرضی مشخصی از مرکز سیلندر قرار داده شده است که مقدار خطای مشخصی از مرکز سیلندر قرار داده شده است که مقدار خطای دقیق انجام نشده اما با توجه به رینولدز بالای این تحقیق و همچنین ماهیت شبیهسازی پلاسما که پیچیدگی زیادی دارد، تطابق ایجادشده، مطلوب به نظر میرسد. همچنین شایان ذکر است که طبق جدول ۱ نتایج *بوچمال*<sup>[22]</sup> که بهعنوان مرجع برای تحقیقات بسیار زیادی استفاده شده است، میزان خطای بیش از ۷% با مدلسازی دیگر و نتایج تجربی دارد.



**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

مختلف	یتھای	در موقع	سرعت ا	مقادير	ل ۱)	جدوا

پژوهش	<b>بیشینه سرعت</b> (متر بر ثانیه)	درصد خطا
<i>سوزن</i> <sup>[20]</sup>	•/99FQI	-
ب <i>وچمال</i> <sup>[22]</sup>	·/9YDAY	٧/۴٢
حاضر	·/9121184	۷/۹۸

<b>جدول ۲)</b> ضریب پ	ا حول یک سیلندر د	در رینولدز ۱۰۰
مرجع	ضريب پسا	انحراف از میانگین نتایج موجود
منگینی[12]	١/٣٧	•/•۵•٨
<b>دینگ</b> <sup>[13]</sup>	۱/۳۵۶	۰/ <b>۰</b> ۳۶۸
تريتون <sup>[23]</sup>	1/۲۵	•/•۶٩٢
<i>چانگ</i> <sup>[24]</sup>	۱/۲۳	•/• <b>\</b> ٩٢
یژوهش حاضر	١/٣٩	•/•¥•٨

جدول ۳) مقادیر سرعت در فاصلهی مشخص از مرکز سیلندر

درصد خطا	<b>سرعت در موقعیت یکسان</b> (متر بر ثانیه)	پژوهش
-	11/۲۳۶	<i>كوزلو</i> <sup>[16]</sup>
1./00	۱۰/۰۵	حاضر

# ۴– شبکهبندی

شبکهبندی انجامشده برای پژوهش حاضر با نرمافزار انسا ۱۵.۱ صورت گرفت و تلاش شد که یک شبکه مثلثی بی سازمان با کیفیت استخراج شود. همان طور که بیان شد اطلاعات میدان حل از مطالعه *ماهیر* و *آلتاس*<sup>[14]</sup> و با توجه به نمودار استقلال از شبکه ضریب پسای یک سیلندر در نمودار ۱ که تعداد المان هایی که مطلوب هستند ۱۵۸۹۸۲ عدد به دست میآید. نمونه ای از شبکهبندی حول یک سیلندر تنها و میدان حل به ترتیب در شکل های 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 ناویراستوکس و انرژی برای دو رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ در حالت آرام با گام زمانی ۵۰/۰ 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 <sup>1</sup>۰۰ است.

مشخصات محرکهای پلاسمایی استفاده شده که در بخش اعتبارسنجی بررسی شدند، در جدول ۴ ارایه شده و تحت عنوان کد یودیاف (UDF) به نرم افزار فلوئنت ۱۷۰۱ اعمال شد. نحوه نصب محرکها در شکل ۹ قابل مشاهده است. نحوه اعمال ولتاژ و پارامترهای محرکهای پلاسمایی از پایان نامه بوچمال<sup>[22]</sup> استخراج شد و متناسب با شرایط مساله تحت عنوان کد R1 و R2 تغییر داده شدند. مقادیری که در پایان نامه موجود نبود، با توجه به ولتاژ اعمالی از روابط (۱۳ و ۱۶) برگرفته از مطالعه جی و همکاران<sup>[12]</sup> استخراج شدهاند. تمامی حلها با توجه به شرط ماندههای بیان شده همگرا شدند.

$$\rho_c = 0.02637 V_{PP} - 0.1343 \tag{(17)}$$

$$u = 0.15V_{PP} + 0.9 \tag{14}$$

$$\sigma = 0.1 V_{PP} - 0.2 \tag{1a}$$

$$\lambda_D = 0.2(0.15 \times 10^{-3} V_{PP} - 0.000742) \tag{19}$$

در روابط بالا  $ho_c$  غلظت بار الکتریکی،  $\mu$  پارامتر موقعیت برای توزیع تابع گوسی و  $\sigma$  پاراتر اسکیل برای توزیع تابع گوسی است.

بررسی عملکرد آیرودینامیکی و انتقال حرارت سیلندرها تحت اثر محرکهای پلاسمایی ۲۱۱۵



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



**شکل ۲)** نمونهای از شبکهبندی حول یک سیلندر



**شکل ۸)** نمونهای از شبکهبندی برای کل میدان

<b>جدول ۲)</b> مشخصات مخرفهای پلاسمایی			
مشخصات	R1	R2	
<b>عرض هر الكترود</b> (متر)	•/١	•/1	
<b>ضخامت هر الكترود</b> (متر)	•/•••١	•/•••1	
<b>ضخامت دیالکتریک</b> (متر)	•/•••١	•/•••1	
ضريب نفوذ دىالكتريک	۲/۷	٣/٧	
طول دیبای	•/•••1٧	مطابق رابطه ١٦	
<b>فاصله طولى الكترودها</b> (متر)	•/•••0	•/•••0	
6			

مطابق رابطه ۱۳	•/•••Y0	$^{\mathcal{C}}/_{m^3}$ تابع چگالی $ ho_{0}$
00	١	التاژ اعمالی (کیلوولت)



**شکل ۹)** محل قرارگیری الکترودها

# ۶– بحث و نتایج

نتیجههای استخراجشده مربوط به ضرایب یسا و عدد ناسلت متعلق به سیلندر پاییندست ارایه شده است. نتایج با حالت سیلندرها بدون محرکهای پلاسمایی (R0) مقایسه شده و تحلیلهایی روی آن صورت گرفته است. نمودارهای مربوط به تغییرات ضریب یسا و عدد ناسلت در دو شرایط اعمال پلاسما با توابع تعریف شده R1 و R2 در دو رینولدز مختلف رسم شده است. بهطور کلی نتایج نشان میدهند که اعمال محرکهای پلاسمایی سبب افزایش ضریب پسا و عدد ناسلت سیلندر پاییندست می شود.

در جدول ۵ نتایج مربوط به تغییرات ضریب پسای سیلندر پاییندست در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰، در فواصل نسبی مختلف قرار گرفته است. همان طور که مشخص است در فواصل نسبی کمتر از ۳ ضرایب پسا مقادیر ناچیز و حتی منفی به خود گرفتهاند که این موضوع با نتايج ساير محققان نيز تطابق دارد[14]. علت اين امر را میتوان از این منظر توضیح داد که سیلندر دوم بهعلت 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 منفیشدن مقدار ضریب یسا 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 پسای مربوط به فاصله نسبی ۱۰ بیشینه است هرچند در این حالت یک قله در فاصله نسبی ۴ نیز دیده می شود. علت این موضوعات به نظر میرسد که در نحوه تشکیل گردابههای مخصوص جریان پشت سیلندر باشد که فرکانس آنها در رینولدزهای مختلف متقاوت است. همین امر سبب شده که قراردادن سیلندر دوم در دنباله سیلندر اول، جریان کاملاً متفاوتی را در فواصل مختلف تولید کند. بهطور 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 یادساعتگرد قرار دارد و سبب ایجاد یک نیروی پسا برای سیلندر دوم میشود.

Archive of SID جدول ۵) تغییرات ضریب پسای سیلندر پاییندست در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰، در فواصل نسب مختلف

حالت R2	حالت R1	حالت R2	حالت R1	حالت R0	حالت R0	L
در رینولدز ۲۰۰	در رینولدز ۲۰۰	در رینولدز ۱۰۰	در رینولدز ۱۰۰	در رینولدز ۲۰۰	در رینولدز ۱۰۰	/ D
11/7787	+/77027	12/2077	•/•٨0•٦00	-•/71	•/•••1٢	۲
1./7029	•/४٩٨٩٧	17/7789	+/90ETV	_•/\Y	-•/•EA	٣
41/2012	١/١٣٩٨	۸۷۲۸/۸۱	1/221	•/00A	•/٧٦٤	٤
44/02	١/٣٨٩٧	12/0232	1/2077	•/220	•/٨٧٤	٥
18/2220	1/0189	۱۷/۸۹	1/0778	•/227	•/٦٨٢	Y
17/9728	1/7172	10/9222	۱/٦٧٨	٠/٩	•/٣٣١	1.

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 ۵۵کیلوولت است، جریان بسیار قدرتمندی اعمال میکند بهگونهای که بیشینه سرعت جریان چندین برابر سرعت جریان آزاد است و همین سبب شدہ که سیلندر پاییندست ضریب پسای بسیار بالایی را تجربه کند. در این حالت در فاصله نسبی ۴، بیشینه ضریب پسا حاصلشده در صورتی که در حالت بدون اعمال محرکها بیشینه ضريب يسا در فاصله نسبي ۵ بوده است. براي علت اين اتفاق میتوان چنین شرح داد که افزایش مومنتوم برخوردی با سیلندر دوم ناشی از اعمال محرکها بر سیلندر اول بسیارزیاد 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 بسیاربیشتر از حالت R1 است. در این حالت اتفاق قابل توجه در فاصله نسبی ۳ رخ میدهد که مقدار ضریب یسا یک افت را نسبت به فاصله نسبی ۲ دارد. این اتفاق در مقدار ضریب یسا در حالت خام نیز رخ میدهد بهگونهای 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 پاییندست 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 تقریبا ثابت میشود. این امر نشان میدهد که قرارگیری سیلندر دوم در سیلندر اول بهگونهای است که برخوردهای 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

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



**نمودار ۲)** 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 می شود. 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 تاثیر فاصله نسبی روی مقادیر عدد ناسلت همانند رفتار در رینولدز ۱۰۰ است و نکته قابل توجه شیب آرام افزایش ناسلت در فاصلهنسبی ۴ تا ۵ و سپس ثابتشدن مقدار

> Volume 19, Issue 9, September 2019 www.SID.ir

ـ بررسی مملکرد آیرودینامیکی و انتقال حرارت سیلندرها تحت از محرکهای پلاستایی Arc My عدد ناسلت است. همان طور که پیش از این ذکر شد شیب ملایم تر سبب می شود که در طراحی هایی که مد نظر است تا L/D متغیر باشد، گستره تغییرات به گونه ای باشد که آسیب کمتری به سازه وارد شود.

**جدول ٦**) تغییرات عدد ناسلت سیلندر پاییندست در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰، در فواصل نسبی مختلف

						-
حالت R2	حالت R1	حالت R2	حالت R1	حالت R0	حالت R0	L
در رینولدز ۲۰	در رینولدز ۲۰	در رینولدز ۱۰۰	در رینولدز ۱۰۰	در رینولدز ۲۰۰۰	در رینولدز ۱۰۰	/ D
1.44	1 **	1++	1++	1++	144	-
40/129	0/132	40/749	٤/٨٣٢	۲/۸۸	۲/۰۳	۲
40/972	٦/٢٧٨	47/849	0/394	٣/٥٤	4/493	٣
22/061	٧/٨٩٢	48/412	٦/٧٤٣	٦/١٥	٤/•٢	٤
41/984	٨/٣٤٥	٣٠/٥٤٣	٧/٣٨١	0/97	٤/٢٨	٥
22/261	٨/٥٨١	۳•/۱۲۹	٧/٤٣٨	0/17	٤/٢١	Y
49/EWV	٨/٢٨٩	٣٠/٠٩١	٧/٥٩١	٥/٨٤	٤/٢٧	۱.



**نمودار ۳)** عدد ناسلت برای فواصل نسبی مختلف ، (الف) در رینولدز ۱۰۰، (ب) در رینولدز ۲۰۰

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

**Modares Mechanical Engineering** 

# ۲۱۱۸ مجتبی طحانی و همکاران ــ

نشاندادن تاثیر افزایش عدد رینولدز جریان روی پارامترهای مورد بحث در فواصل نسبی مختلف بهره گرفته شده است.

نمودار ۴ نمایانگر ضریب یسای خامشده در حالت R1 و در دو رینولدز ۱۰۰و ۲۰۰ است. تاثیر فواصل نسبی در رینولدزهای مختلف، متفاوت است. البته تا پیش از فاصله نسبی ۲، در هر دو رینولدز روند افزایشی برای ضریب پسای خامشده دیده میشود. بهطور کلی مطلوب است که تغییرات کمتر بوده تا طراحی برای دامنه کاری وسیعتری 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 میتوان چنین تفسیر شود که با توجه به كمتربودن مقدار عدد رينولدز، مقدار مومنتوم جريان نيز كمتر شده است، در نتیجه تاثیر محرکهای پلاسمایی که با مومنتوم ثابت کار مىكنند، بيشتر بوده است. همچنين كمتربودن مقدار مومنتوم اين توانایی را از جریان آزاد سلب کرده تا به گردابههای تشکیل شده ناشی از سیلندر اول غلبه کرده و در نتیجه سیلندر دوم کاهش ضریب پسا را به مرور حس میکند. این موضوع در نمودار ۵ که نشاندهنده تغییرات ضریب یسای خامشده در حالت R2 است نیز بهخوبی دیده می شود. در این حالت با توجه به قدرتمندتربودن 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، پیچیدگیهای ایجاد شده ناشی از آن بر انتقال حرارت کمتر است. روند تغییرات ناسلت با ضریب پسا در همین حالت برای رینولدز ۲۰۰ قابل مقایسه ناسلت با ضریب پسا در همین حالت برای رینولدز ۲۰۰ افت ناگهانی دیده 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 خام شده دیده می شود. R1 و R2 دیده می شود که نمودار ۲ نیز نمایانگر این موضوع است. در واقع از رفتار عدد ناسلت می توان چنین استنباط نمود که مرکهایی پلاسمایی در هر دو حالت و در فواصل نسبی مختلف، گردابه ها یا پدیده هایی خاصی که روی انتقال حرارت سیلندرها تاثیرگذار باشد ایجاد نکردهاند. تنها می توان بیان نمود که با افزایش عدد رینولدز تاثیر محرکها کمتر شده است.



نمودار ۴) ضریب پسای خام شده در حالت R1

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس *www.SID.ir* 



# ۷- نتیجهگیری

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر محرکهای پلاسمایی روی سیلندرها در حالت آرایش پشتسرهم بوده است بهگونهای که محرکها روی سیلندر اول اعمالشده و نتیجهاش روی سیلندر

# - بررسی عملکرد آیرودینامیکی و انتقال حرارت سیلندرها تحت اثر محرکهای پلاسمایی ۲۰۱۹

ولتاژ قله به قله (kv)	$V_{PP}$
عدد رينولدز	Re
ضريب ليفت	$C_l$
ضریب درگ	$C_d$
عدد ناسلت	Nu
عملگر گرادیان (1/m)	$\nabla$

# 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. 1<sup>st</sup> 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. 36<sup>th</sup> 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 dischargebased 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- Mahír 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.

یاییندست 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 محركهاى يلاسمايي استفاده مىشود بهعلت اينكه جريان سيلندر جلوبی مجدداً به سطح متصل شده و جدایشهای جریان کنترل می شوند، در واقع سیلندر پایین دست، جریان اعمالی جدیدی را حس میکند که دیگر مربوط به ناحیه دنباله نیست. همچنین نتایج نمایان کردند که افزایش قدرت یلاسمای اعمالی لزوماً نتیجه مطلوب را حاصل نمیکند. با وجود اینکه افزایش ضریب یسای ناشه، از اعمال محرکها در حالتی که یلاسما 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 می شود و مجدداً از فاصله نسبی ۵ تا ۷ ضریب یسا 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 طراحی شده بیشتر شود. همچنین رینولدزهای آزمایش شده 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 یرهها و مزرعههای توربینهای بادی یسا- مبنا بسیار قابل توجه خواهد بود.

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

**تاییدیهاخلاقی:** 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 (۳۴۵)؛ 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 علايم
فشار (پاسکال)	Р
مولفههای سرعت	u v
قطر سیلندر (متر)	D
زاويه	$\theta$
ويسكوزيته سينماتيكى	ν
چگالی ( <u>kg</u> )	ρ
دما (کلوین)	Т
$(\frac{C}{Nm^2})$ نفوذپذیری نسبی (	$\mathcal{E}_r$
تابع پتانسیل	$\phi$
$(rac{C}{m^3})$ غلظت بار الکتریکی (	$ ho_{C}$
طول دیبای (متر)	$\lambda_D$

Volume 19, Issue 9, September 2019 www.SID.ir

Archive of SID 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 Journal of Aerospace Engineering. actuators. 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