

## مقایسه عملگرهای پلاسمای تکی و جت ترکیبی خطی برای کنترل جریان اطراف استوانه\*

(یادداشت پژوهشی)

علیرضا گرامی<sup>(۱)</sup> سیدمجید ملک جعفریان<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی جریان دوبعدی حول یک استوانه مدور و تأثیر استفاده از انواع عملگرهای پلاسمای جهت کنترل جریان اطراف آن مورد بررسی قرار گرفته است. عملگرهای مورد استفاده، شامل عملگر پلاسمای تکی و عملگر جت ترکیبی پلاسمای خطی می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی عددی این عملگرها، از مدل خطی شده نیرو استفاده گردیده است. در کار حاضر، دو موضوع دقت مدل در تحلیل رفتار عملگرهای پلاسمای و تأثیر محل قرارگیری این عملگرها بر نقطه جدایش و حذف گردابه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عملگرها با استفاده از مدل خطی شده نیرو (در عین سادگی) در جدایش جریان به لحاظ کیفی به صورت موفق عمل می‌کند. استفاده از عملگرهای پلاسمای تکی در زوایای  $\pm 45^\circ$  و  $\pm 90^\circ$  درجه بهترین وضعیت قرارگیری عملگرها می‌باشد. در صورتی که توان مصرفی کمتر عملگرها (به علت تعداد کمتر) و در عین حال، بیشترین تأثیر روی جریان مد نظر باشد، محل قرارگیری عملگرها در زوایای  $\pm 90^\circ$  درجه توصیه می‌شود. استفاده از عملگر جت ترکیبی پلاسمای خطی در زوایای  $\pm 45^\circ$  در این مسئله به خصوص، به دلیل تأثیر کمتر روی جریان و همچنین توان مصرفی بالاتر، توصیه نمی‌شود.

**واژه‌های کلیدی** کنترل جریان، عملگرهای پلاسمای، عملگرهای L-PSJ، مدل خطی شده نیرو، استوانه مدور.

### Comparison of Single and L-PSJ DBD Plasma Actuators for Flow Control around a Cylinder

A. Gerami M. Malek Jafarian

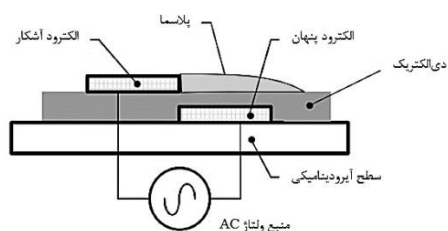
**Abstract** In the present study, 2D numerical simulation of flow around a circular cylinder and the effect of plasma actuators to control the flow around it have been investigated. Plasma actuators which have been used include single plasma actuator and Linear Plasma Synthetic Jet Actuator (L-PSJA). In order to numerically simulate the actuators, the linearized force model has been used. In the present work, accuracy of the linearized force model to analysis the plasma actuators behavior and the effect of their position on the point of separation and elimination of the vortices have been investigated. The results show that the simulation of actuators operates qualitatively successful in flow separation using linearized force model (despite of its simplicity). Using of single plasma actuators at angle of  $\pm 45^\circ$  and  $\pm 90^\circ$  degree is the best position of the plasma actuators. The position of the actuators at angel of  $\pm 90^\circ$  degree is recommended, if the lower power consumption of the plasma and at the same time the most influence on the flow is to be considered. Using L-PSJ actuators at angel of  $\pm 45^\circ$  degree is not recommended, due to low influence on the flow and higher power consumption.

**Key Words** Flow control, Plasma actuators, L-PSJ actuators, Linearized force model, Circular cylinder.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۹/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۸/۲۱ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i2.60952

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند mmjafarian@birjand.ac.ir



شکل ۱ طرحواره عملگر پلاسمای تکی

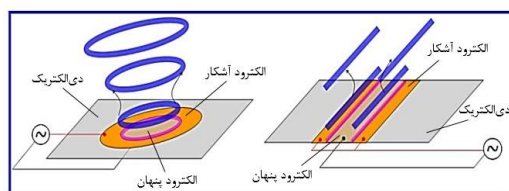
## مقدمه

در سال‌های گذشته روش‌های کنترل فعال جریان در حوزه‌های مختلف، یکی از موضوعات مورد علاقه محققان بوده است. یکی از این روش‌ها، استفاده از عملگر پلاسمای تخلیه الکتریکی با مانع دی الکتریک می‌باشد. این وسیله تأثیر زیادی در بهبود عملکرد حالت‌های جریان دارد. تخلیه الکتریکی با مانع دی الکتریک، یا به صورت ساده‌تر تخلیه با مانع، بیشتر از یک قرن است که شناخته شده است. نخستین تحقیقات آزمایشگاهی در این مورد، در سال ۱۸۵۷ توسط زیمنس [1] و به منظور تولید ازن گزارش شده است. در اواخر دهه ۹۰ میلادی شکل جدیدی از این ابزار، با نام عملگر پلاسمای معرفی گردید. بر اساس نحوه آرایش و شکل الکتروودها، عملگرهای پلاسمای دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- عملگر پلاسمای تکی و ۲- عملگر جت ترکیبی پلاسمای.

عملگر پلاسمای نشان داده شده در شکل (۱) یک وسیله نسبتاً ساده، شامل دو الکتروود است که به وسیله یک ماده دی الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند. معمولاً الکتروودها از نوارهای مسی، و دی الکتریک از لایه نازک کیتون ساخته می‌شوند. هنگامی که یک ولتاژ جریان متناوب با فرکانس بالا از الکتروودها عبور کند، هوا در این ناحیه با پتانسیل الکتریکی بالا یونیزه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، این ناحیه در بالای الکتروود نهان و نزدیک به لبه الکتروود آشکار قرار دارد. هوای یونیزه شده یا پلاسمای در حضور یک گرادیان میدان الکتریکی، نیروی حجمی را در هوای محیط ایجاد می‌کند، که جهت آن از الکتروود آشکار و موازی با سطح دی الکتریک می‌باشد. نیروی ایجاد شده توانایی کنترل جریان را در گستره وسیعی از کاربردهای آیرودینامیکی دارد [2].

به منظور یونیزه شدن هوا با استفاده از عملگرهای پلاسمای به ولتاژ متناوب بالایی بین ۵ تا ۲۰ کیلو ولت و فرکانس کاری بین ۳ تا ۱۵ کیلو هرتز نیاز است [3]. به دلیل بالا بودن فرکانس کاری، عملگرهای پلاسمای می‌توانند به عنوان یک وسیله «شبه پایدار» در نظر گرفته شوند، زیرا این فرکانس به اندازه کافی بیشتر از فرکانس واکنش جریان می‌باشد. با وجود این که عملگرهای پلاسمای برای کار، نیاز به ولتاژ بالایی دارند اما ابزارهای نسبتاً کم مصرفی می‌باشند (بین ۶ تا ۱۳۰ وات بر متر به ازای هر سیکل کاری عملگر) [2].

عملگر جت ترکیبی پلاسمای از لحاظ کارکرد فیزیکی، کاملاً شبیه به عملگرهای پلاسمای مرسوم (تکی) می‌باشد. تفاوت اساسی این عملگرها با نوع تکی در نحوه آرایش و پیکربندی الکتروودها بوده که باعث می‌شود جریان ایجاد شده ناشی از آنها به صورت یک جت رو به بالا باشد. مفهوم عملگرهای جت ترکیبی پلاسمای در اصل به وسیله ساتاناکریشن و یعقوب در سال ۲۰۰۶ توسعه یافته است [4]. آنها دو نوع عملگر با نام‌های جت ترکیبی خطی و حلقوی (A-PSJA و L-PSJA) را ارائه دادند که در شکل (۲) نشان داده شده است [5].



(ب)

(الف)

شکل ۲ طرحواره عملگر جت ترکیبی پلاسمای.

(الف خطی ب حلقوی)

خطی فرض شده و ناحیه تشکیل پلازما محدود به ناحیه مثلثی کنار الکتروود نهان می‌باشد. مفهوم مدل‌سازی عملگر پلازما به‌عنوان یک مدل الکتریکی (مدار تجمعی)، در ابتدا به‌وسیله انلو و همکاران در سال ۲۰۰۴ ارائه شد. سوزان و همکاران [9] در سال ۲۰۰۵، مدل عددی دیگری برای عملگرهای پلازما ارائه کردند. در این روش از معادلات ماکسول و قانون گوس برای مدل‌سازی میدان پتانسیل الکتریکی استفاده شد. در سال ۲۰۰۶ ارلوف و همکاران [10] مدل مدار الکتریکی انلو را گسترش داده و ضرایب آن را بهبود بخشیدند؛ در این مدل، ماده‌ی الکتریک و مولکول‌های هوا به‌صورت مجموعه‌ای از خازن و مقاومت در نظر گرفته می‌شوند.

از جمله کاربردهای عملگر پلازما، می‌توان به این موارد اشاره کرد: کاهش پسا و افزایش نیروی برآبر روی ایرفویل [11,12,13,14,15]، کاهش سر و صدای ناشی از گردابه‌های ایجاد شده بر اثر چرخش پره‌های کمپرسور و فن [16]، بهبود کیفیت احتراق و انتقال حرارت داخل محفظه احتراق توربین گاز [17]، افزایش عملکرد توربین‌های بادی [18,19] و کنترل جریان اطراف استوانه [20-25].

مزایای کنترل جریان بر روی استوانه شامل کاهش لرزش، صدا و پسا و افزایش برآ، اختلاط و انتقال حرارت می‌باشد. بررسی‌های نویسندگان در زمینه کنترل جریان حول استوانه با استفاده از عملگرهای پلازما نشان می‌دهد که کارهای انجام گرفته در این زمینه عمدتاً به‌صورت آزمایشگاهی می‌باشد که در ادامه به چند مورد اشاره می‌گردد. سانتاناکریشن و همکاران [5] کاربرد عملگرهای پلازما را در کنترل جریان با اعداد رینولدز پایین، بر روی صفحه صاف و استوانه مدور مورد بررسی قرار دادند. توماس و همکاران [20] استفاده از عملگرهای پلازما جهت کنترل جدایش جریان و گردابه‌های ایجاد شده بر روی استوانه مدور را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این کار، تأثیر استفاده

عملگر L-PSJA شامل دو الکتروود آشکار، یک یا دو الکتروود پنهان به‌همراه دی‌الکتریک می‌باشد؛ درحالی‌که عملگر A-PSJA شامل یک الکتروود آشکار حلقوی، الکتروود پنهان و یک ورقه دی‌الکتریک می‌باشد [6]. در هر دو نوع عملگر، الکتروود آشکار در کنار الکتروود پنهان به‌همراه یک فاصله کوچک یا بدون فاصله قرار گرفته است [4].

عملگرهای پلازما مزایای زیادی نسبت به سایر ابزارهای کنترل جریان دارند. از ویژگی‌های این نوع عملگرها می‌توان به نداشتن قطعات متحرک، عدم تأثیر بر جریان به‌علت ضخامت اندک الکتروود آشکار، قابلیت پاسخگویی سریع و تأخیر زمانی اندک، سادگی ساختار، مصرف کم انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، تعمیر و تکمیل آن‌ها اشاره نمود [7].

عملگرهای القایی پلازما را می‌توان با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی شبیه‌سازی نمود. از آنجایی که تحقیقات آزمایشگاهی بر روی عملگرهای پلازما مستلزم صرف وقت و هزینه‌های بالا می‌باشد، به‌همین دلیل محققان بر آن شدند تا با استفاده از روش‌های عددی، پدیده فیزیکی حاکم بر این نوع عملگرها را مدل‌سازی کنند. مدل‌ها را می‌توان در دو گروه کلی تقسیم‌بندی کرد. ۱- مدل‌های ساده‌شده (پدیدار شناختی) و ۲- مدل‌های اصول مینا. مدل‌های ساده‌شده، شامل مدل‌های الکترواستاتیک، مدار تجمعی، خطی شده نیرو و جریان پتانسیل می‌باشد. مدل‌های اصول مینا نیز شامل مدل جنبشی، مدل سیال و مدل هیبرید است. به دلیل سادگی و سرعت بالای حل و درعین حال دقت قابل قبول مدل‌های ساده‌شده، بیشتر تحقیقات عددی انجام شده بر روی عملگرهای پلازما مربوط به این مدل‌ها می‌باشد.

در سال ۲۰۰۲ شی و همکاران [8] با استفاده از نتایج یک آزمایش تجربی توانستند یک روش عددی برای مدل‌سازی عملگر پلاسمای تکی به‌دست آورند که در آن خطوط میدان پتانسیل الکتریکی به‌صورت

گرفته شده است. به دلیل این که پلاسمای تشکیل شده در عملگرهای دی‌الکتریک، از نوع سرد بوده و تأثیر چندانی روی میدان دما ندارد، بنابراین در تمامی حالت‌های مورد بررسی، از حل معادله انرژی صرف نظر شده است.

**معادله پیوستگی.** معادله بقای جرم یا پیوستگی، برای جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

**معادلات ممتوم.** معادلات ممتوم در یک دستگاه مرجع ساکن (لخت) برای جریان تراکم‌ناپذیر و ناپایا به صورت زیر توصیف می‌شوند:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + F_{p_i} \quad (2)$$

$F_{p_i}$  در رابطه فوق همان نیروی حجمی ایجاد شده به وسیله عملگر پلازما بوده که توسط یکی از روش‌های مدل‌سازی، محاسبه و به معادلات ممتوم افزوده می‌شود.

**معادلات اغتشاش.** مدل اغتشاشی  $k - \epsilon$  یکی از رایج‌ترین مدل‌های مورد استفاده در CFD در شبیه‌سازی مسائل رژیم جریان مغشوش می‌باشد. این مدل شامل معادلات انتقال برای انرژی جنبشی مغشوش ( $k$ ) و نرخ اتلاف آن ( $\epsilon$ ) است. پایداری، اقتصادی بودن و دقت قابل قبول برای محدوده وسیعی از جریان‌های مغشوش، این مدل را برای شبیه‌سازی مسائل سیالاتی صرف و مسائل انتقال حرارتی مناسب می‌سازد.

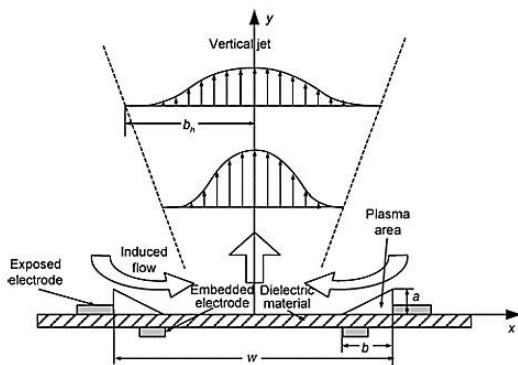
از این عملگرها در کاهش صدا هنگام فرود هواپیماهای تجاری بوده است. سوسا و همکاران [21] کاهش ضریب پسا روی استوانه را با استفاده از سه عملگر پلاسمای تکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملگرها می‌توانند ضریب پسا را تا حدود ۲۵ درصد کاهش دهند. طباطبائیان و همکاران [22] تأثیر وجود عملگرهای پلازما و آرایش آن‌ها به منظور کنترل جریان حول استوانه را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این آزمایش الکترودها به منبع ولتاژ بالای DC متصل شده‌اند. کوپیف و همکاران [23] به مطالعه تأثیر عملگرهای فرکانس بالا روی صدای اطراف سیلندر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملگرهای پلازما توانایی کاهش صدای گردابه‌های اطراف سیلندر را در طیف وسیعی از سرعت‌های معمول کاربردهای آیروستاتیک دارد. اما از معدود کارهای عددی می‌توان به کارهای کیم و وانگ [24] و اسکات و همکاران [25] اشاره کرد. در کارهای فوق به ترتیب از عملگرهای پلاسمای تکی و L-PSJ به کمک مدل سوزان و هوانگ جهت کنترل جریان حول استوانه استفاده شده است.

هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی عددی جریان اطراف استوانه و بررسی تأثیر استفاده از عملگرهای پلازما (شامل تکی و L-PSJ) برای کنترل جریان و حذف گردابه‌های ایجادشده در پشت استوانه با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت می‌باشد. برای این منظور، نیروی حجمی ناشی از عملگر پلازما با استفاده از مدل خطی شده نیروی شبیه‌سازی گردیده و از طریق کد UDF به عنوان جمله چشمه به معادلات ممتوم در فلونت افزوده می‌شود.

### معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان، شامل معادلات بقای جرم (پیوستگی)، بقای ممتوم و معادلات اغتشاش می‌باشند. این معادلات، دو بعدی، تراکم‌ناپذیر و ناپایا در نظر

پارامتر  $E_0$  در رابطه فوق، قدرت شکست میدان الکتریکی و مقادیر  $a$  و  $b$  به ترتیب ارتفاع و عرض ناحیه تشکیل پلازما (شکل ۳-ب) می‌باشند. روابط حاکم بر مدل خطی شده نیرو، برای عملگر جت ترکیبی پلاسمای خطی، همانند عملگر پلاسمای تکی می‌باشد. با این تفاوت که در این نوع عملگر فرض می‌شود که نیروی الکتریکی ناشی از تشکیل پلازما، در دو ناحیه مثلثی شکل عمل می‌کند (شکل ۴).



شکل ۴ طرح‌واره عملگر L-PSJ و میدان جریان ناشی از آن

با توجه به شکل فوق، میدان الکتریکی ناشی از پلازما در ناحیه سمت چپ، می‌تواند به صورت رابطه زیر نوشته شود:

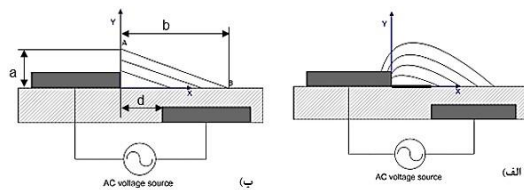
$$|\vec{E}|_L = E_L(x, y) = E_0 - k_1(x + 0.5w) - k_2y \quad (۷)$$

به طور مشابه، میدان الکتریکی در ناحیه سمت راست را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$|\vec{E}|_R = E_R(x, y) = E_0 + k_1(x - 0.5w) - k_2y \quad (۸)$$

که  $w$  فاصله بین لبه‌های بیرونی نواحی پلاسمای ایجاد شده می‌باشد.

مدل خطی شده نیرو. یکی از اولین مدل‌های پیشنهادی عملگر پلازما، مدل خطی شده نیرو می‌باشد که در سال ۲۰۰۲ توسط شی و همکاران [8] پیشنهاد شد. در این مدل میدان الکتریکی به صورت خطوط موازی با هم فرض شده و ناحیه تشکیل پلازما محدود به ناحیه مثلثی در کنار الکتروود آشکار می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳ الف) عملگر پلازما با حدود واقعی شکل خطوط میدان الکتریکی ب) عملگر پلازما با شکل خطی شده میدان الکتریکی

میدان الکتریکی  $E$ ، از لحاظ ریاضی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$|\vec{E}| = E_0 - k_1x - k_2y \quad (۳)$$

در رابطه بالا،  $E_0$  میدان الکتریکی در ناحیه تیره‌رنگ شکل (۳) بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_0 = \frac{V}{d} \quad (۴)$$

که  $V$  دامنه ولتاژ AC اعمال شده، و  $d$  فاصله بین دو الکتروود در راستای  $x$  است. مقادیر  $k_1$  و  $k_2$  ثابت‌های هندسی هستند که نشان‌دهنده شیب شدت میدان الکتریکی در راستای دو جهت عمود بر هم یعنی  $x$  و  $y$  می‌باشند و می‌توان آن‌ها را به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود.

$$k_1 = \frac{E_0 - E_b}{b} \quad (۵)$$

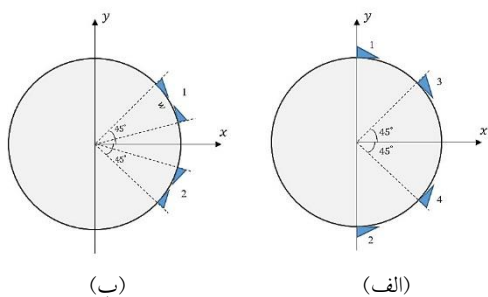
$$k_2 = \frac{E_0 - E_b}{a} \quad (۶)$$

خطی شده نیرو به منظور کنترل جریان روی استوانه ارائه نشده است. برای این منظور چهار حالت کلی انتخاب گردیده که در جدول (۱) به آن اشاره می‌شود.

جدول ۱ حالت‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی عملگرهای پلاسما برای کنترل جریان اطراف استوانه

محل قرارگیری عملگرها	نوع عملگرها	تعداد عملگرها	
$\pm 90^\circ$ و $\pm 45^\circ$	تکی	۴	حالت اول
$\pm 90^\circ$	تکی	۲	حالت دوم
$\pm 45^\circ$	تکی	۲	حالت سوم
$\pm 45^\circ$	L-PSJ	۲	حالت چهارم

شکل (۶- الف)، نواحی پلاسمای تشکیل شده توسط عملگرها (عملگر تکی) در حالت‌های اول، دوم و سوم از جدول (۱) را که شامل چهار ناحیه مثلثی در زوایای  $\pm 45^\circ$  و  $\pm 90^\circ$  با عرض و ارتفاع به ترتیب  $a=1/5$  mm و  $b=3$  mm می‌باشد، نشان می‌دهد. این نواحی توسط کد نوشته شده در برنامه UDF، روی استوانه قرار می‌گیرند. در حالت چهارم (شکل ۶- ب) که از عملگر L-PSJ برای کنترل جریان استفاده شده، عرض و ارتفاع نواحی مثلثی شکل، برابر با سه حالت اول در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله بین لبه‌های بیرونی نواحی پلاسما برابر با  $b=12$  mm و  $w=4$  می‌باشد.



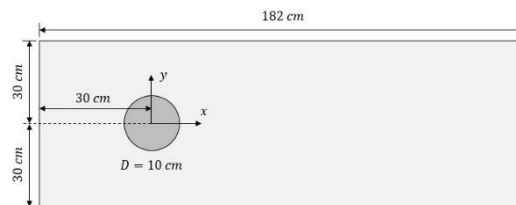
شکل ۶ محل قرارگیری عملگرهای پلاسما روی استوانه  
الف) حالت‌های اول دوم و سوم ب) حالت چهارم

در نهایت می‌توان نیروی حجمی حاصل از پلاسما را با استفاده از روابط (۳ تا ۸) به صورت زیر محاسبه نمود. اثر نیروی حجمی ناشی از پلاسما می‌تواند به عنوان یک جمله چشمه به معادلات ناویر-استوکس افزوده شود.

$$\vec{F}_{p,x,y} = \nu \alpha \rho_c e_c \Delta t \vec{E}_{x,y} \delta \quad (9)$$

### هندسه مسئله و شبکه محاسباتی

فضای نمونه مورد استفاده در این شبیه‌سازی، مطابق با ابعاد تونل آزمایشگاهی مورد استفاده در مرجع [20] یک ناحیه مستطیلی با ابعاد  $182 \times 60$  سانتی‌متر بوده که استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر در فاصله ۳۰ سانتی‌متر از مرز ورودی درون این ناحیه قرار گرفته است (شکل ۵).



شکل ۵ ابعاد دامنه محاسباتی و محل قرارگیری استوانه در دامنه حل

شبیه‌سازی عملگرها با استفاده از مدل خطی شده نیرو، در حالت عملگر دائمی (همیشه روشن) انجام گرفته و نتایج حاضر با داده‌های تجربی کار توماس و همکاران [20] مقایسه گردیده است. در مرجع [20] تأثیر استفاده از عملگرهای پلاسما روی استوانه (محور چرخ‌های هواپیما) به منظور کاهش صدا به هنگام فرود هواپیماهای تجاری مورد بررسی قرار گرفته است. موضوعات مورد بررسی در کار حاضر شامل تأثیر محل قرارگیری عملگرها و نحوه آرایش الکترودها بر نقطه جدایش و حذف گردابه‌ها می‌باشد. بر طبق اطلاعات نویسندگان مقاله، تاکنون شبیه‌سازی عددی عملگرهای پلاسما (تکی و L-PSJ) با استفاده از مدل

رینولدز (بر اساس قطر استوانه) برابر با ۳۳۰۰۰ می‌باشد. حل گر مورد استفاده از نوع فشار-مبنا و الگوریتم PISO برای اصلاح رابطه بین فشار و سرعت به خدمت گرفته شده است. جملات معادلات ممتوم، انرژی جنبشی اغتشاشات (k) و نرخ اتلاف مخصوص (E) با استفاده از طرح مرتبه دوم بالادست، گسسته‌سازی شده‌اند. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و ممتوم از مرتبه  $10^{-6}$ ، گام زمانی مناسب برای حل میدان جریان ۰/۰۰۵ ثانیه و بیشینه تعداد تکرارها به ازای هر گام زمانی، ۴۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ پارامترهای ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی عملگرهای پلاسمای با استفاده از مدل خطی شده نیرو در حالت‌های

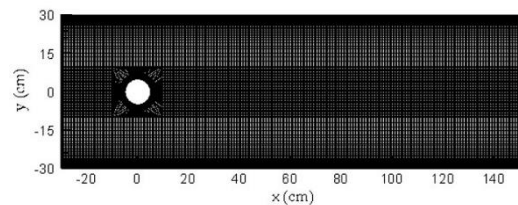
اول تا چهارم

$d$ (mm)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$E_b$ (V/m)	$\nu$ (KHz)	$V_{in}$ (V)
۰/۲۵	۳	$3 \times 10^6$	۱۰	۱۱/۵

### نتایج

در این بخش، به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان حول استوانه و نقش عملگرهای پلاسمای در کنترل جریان اطراف آن پرداخته می‌شود. به همین منظور در ابتدا، نتایج وضعیت پلاسمای خاموش و حالت اول با داده‌های مرجع [20] مورد مقایسه قرار گرفته (اعتبارسنجی نتایج) و سپس نتایج برای سایر حالت‌ها ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که نتایج مربوط به حالت‌های دوم، سوم و چهارم در مرجع [20] وجود ندارد و برای اولین بار در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین توجه شود که نتایج مربوط به توزیع نمایه‌های سرعت افقی ( $u$ ) در تمامی حالت‌ها، به صورت متوسط‌گیری شده زمانی و در موقعیت‌های  $x/D=2$  و  $x/D=4$  (اندازه‌گیری شده از پشت استوانه)، گزارش شده است.

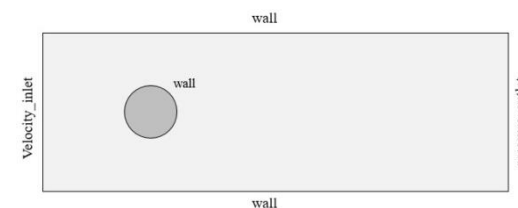
شبکه‌بندی فضای نمونه برای تمامی حالت‌های ذکر شده به صورت غیریکنواخت و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Meshing انجام گرفته است (شکل ۷). همچنین برای به دست آوردن حل منطقی در لایه مرزی و ناحیه پلاسمای (سطح استوانه)، تمرکز سلول‌ها در ناحیه نزدیک به دیواره‌های بالا و پایین و سطح روی استوانه افزایش یافته به طوری که  $y^+$  روی سطح کمتر از پنج باشد.



شکل ۷ شبکه‌بندی فضای نمونه

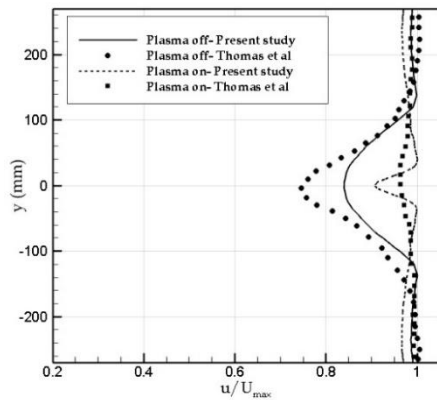
### شرایط مرزی و تنظیمات عددی

حل میدان پلاسمای و محاسبه نیرو با استفاده از مدل خطی شده نیرو، نیاز به شرط مرزی ندارد و شرایط مرزی تنها برای حل میدان جریان استفاده می‌شود. این شرایط مرزی نیز در تمامی حالت‌های ذکر شده در جدول (۱) مشابه بوده که در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸ شرایط مرزی برای حل میدان جریان روی استوانه در انسیس فلونت

پارامترهای ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی عملگرهای پلاسمای در جدول (۲) آورده شده است. توجه شود که در مرز ورودی، جریان توسعه یافته فرض شده است. سرعت جریان ورودی ۴ m/s و عدد



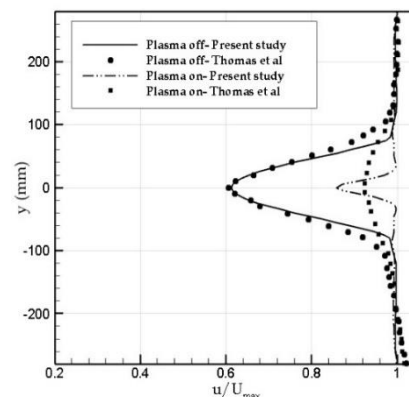
(ب)

شکل ۹ مقایسه نمایه‌های سرعت متوسط برای وضعیت پلاسما خاموش و روشن در حالت اول. الف)  $x/D=2$  ب)  $x/D=4$

توزیع میدان سرعت در یک زمان خاص از حل و متوسط‌گیری شده آن در یک دوره زمانی (برای وضعیت پلاسما خاموش و چهار حالت مورد بررسی) در شکل‌های (۱۰ تا ۱۴) ارائه شده است. در وضعیت پلاسما خاموش، طول ناحیه جدایش به حدود ۲ برابر شعاع استوانه می‌رسد و گردابه‌های ایجاد شده در پشت استوانه به خوبی قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۱۰). در حالتی که هر چهار عملگر پلاسما روشن هستند (حالت اول) به علت تزریق ممتوم از لایه‌های بالایی جریان به لایه مرزی توسط عملگرها، گردابه‌های ایجاد شده در پشت استوانه حذف شده و ناحیه جدایش محدود به ناحیه بسیار کوچک در پشت آن گردیده است (شکل ۱۱). در حالت دوم که عملگرهای پلاسما واقع در زوایای  $\pm 90^\circ$  روشن هستند (شکل ۱۲)، طول و پهنای ناحیه جدایش و همچنین اندازه گردابه‌ها، نسبت به حالت پلاسما خاموش (شکل ۱۰)، کوچکتر شده است. علاوه بر این جدایش جریان نیز به تأخیر افتاده است. در حالت سوم استفاده از عملگرها در زوایای  $\pm 45^\circ$  تأثیر چندان زیادی روی گردابه‌ها و ناحیه جدایش نداشته است (شکل ۱۳). استفاده از دو عملگر L-PSJ در زوایای  $\pm 45^\circ$  (حالت چهارم) منجر به کاهش اندک طول ناحیه جدایش شده است (شکل ۱۴).

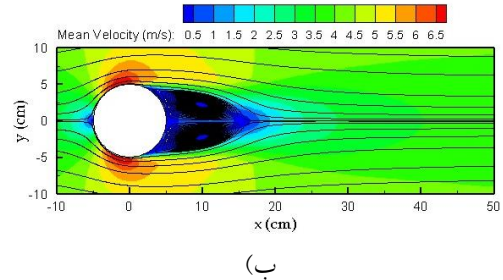
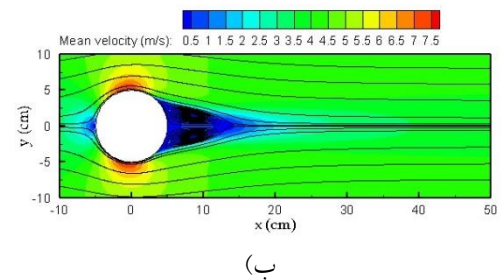
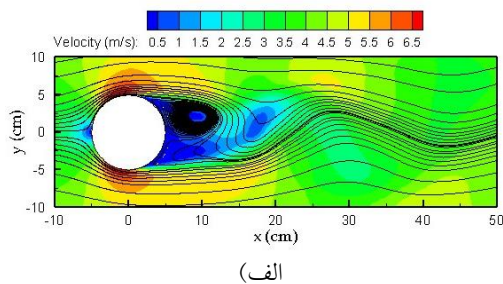
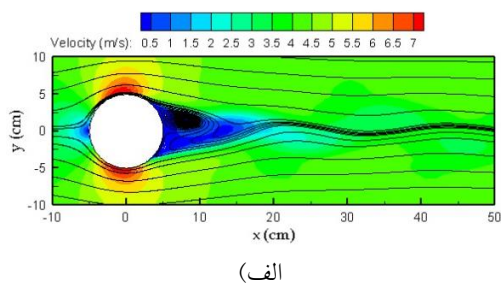
در کنار نقش عملگرهای پلاسما در کنترل جریان، میزان مصرف انرژی آن‌ها نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. مصرف انرژی، رابطه مستقیمی با پارامترهای ورودی نظیر ولتاژ و تعداد عملگرها دارد. از آنجایی که در تحقیق حاضر، پارامترهای ورودی برای تمامی عملگرهای پلاسما یکسان در نظر گرفته شده، بنابراین مصرف انرژی وابسته به تعداد عملگرهای مورد استفاده است. از این رو طراحی همزمان با کنترل جریان باید مصرف انرژی عملگر را نیز مد نظر قرار دهد.

در شکل (۹)، نتایج شبیه‌سازی حاضر با کار توماس و همکاران [20] مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که در حالت پلاسما خاموش، نتایج مطابقت نسبتاً خوبی با مرجع [20] دارند. درحالتی که تمامی عملگرهای پلاسما روشن هستند (حالت اول از جدول ۱)، نتایج به لحاظ کیفی به نتایج تجربی نزدیک شده است، اما از لحاظ کمی این نتایج با مقادیر تجربی متفاوت است. باین وجود مشاهده می‌شود که نیروی حاصل از عملگرهای پلاسما توانسته سرعت جریان در پشت استوانه را تا حد زیادی نسبت به حالت پلاسما خاموش افزایش دهد و از برگشت جریان جلوگیری کند. تفاوت نتایج کار حاضر با داده‌های تجربی می‌تواند به دلیل ساده‌سازی‌های انجام گرفته در مدل خطی شده نیرو و پیچیدگی‌های جریان در پشت استوانه باشد.



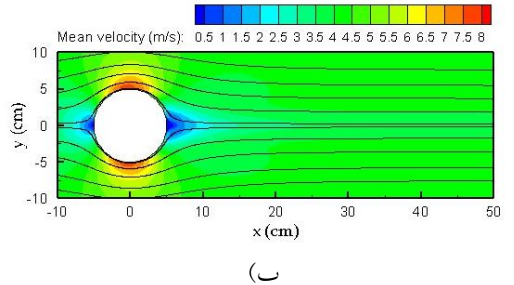
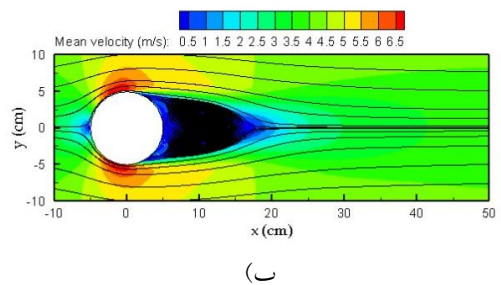
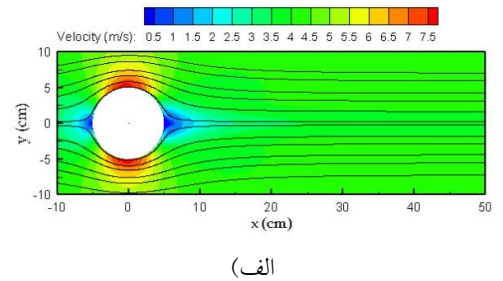
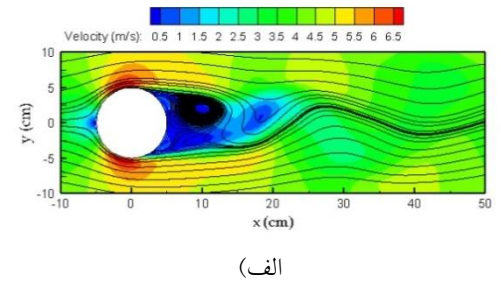
(الف)





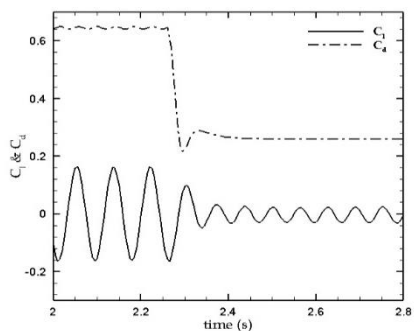
شکل ۱۰ میدان سرعت و خطوط جریان در حالت پلازما خاموش. (الف) در زمان  $t=1/885$  s (ب) متوسط‌گیری شده در یک تناوب کامل

شکل ۱۱ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت دوم. (الف) در زمان  $t=2/875$  s (ب) متوسط‌گیری شده در یک تناوب کامل



شکل ۱۲ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت سوم. (الف) در زمان  $t=2/895$  s (ب) متوسط‌گیری شده در یک تناوب کامل

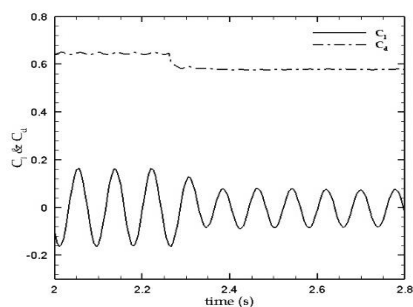
شکل ۱۳ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت اول. (الف) در زمان  $t=2/895$  s (ب) متوسط‌گیری شده در یک تناوب کامل



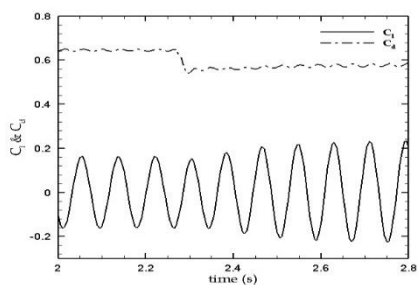
شکل ۱۶ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت دوم

در حالت دوم پس از فعال‌سازی پلازما، به دلیل کوچک‌تر شدن ناحیه جدایش، دامنه نوسانات از مقدار  $\pm 0.16$  به حدود  $\pm 0.2$  کاهش و فرکانس آن افزایش می‌یابد. در این وضعیت، ضریب پسا جریان، به علت وجود گردابه‌ها در پشت استوانه، افت کمتری را نسبت به حالت اول تجربه می‌کند (شکل ۱۶).

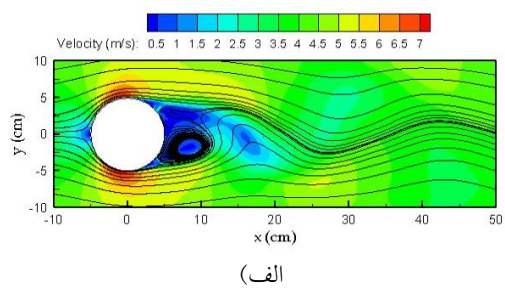
در حالت سوم به دلیل این‌که عملگرهای پلازما تأثیر کمی روی ناحیه جدایش داشته، دامنه نوسانات ضریب برآ حدوداً نصف می‌شود. همچنین دیده می‌شود که ضریب پسا به مقدار کمی کاهش می‌یابد (شکل ۱۷).



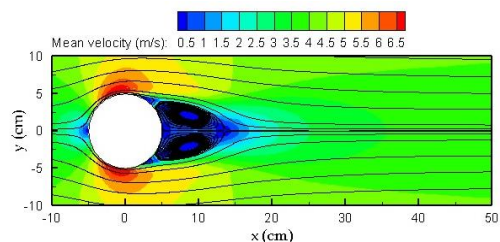
شکل ۱۷ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت سوم



شکل ۱۸ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت چهارم



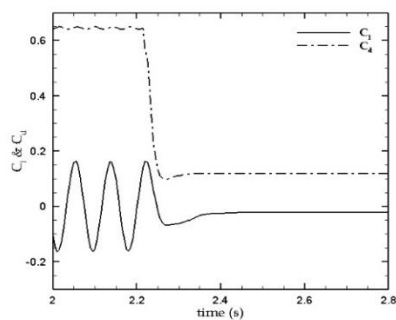
(الف)



(ب)

شکل ۱۴ میدان سرعت و خطوط جریان برای حالت چهارم (الف) در زمان  $t=3/33$  S (ب) متوسط‌گیری‌شده در یک تناوب کامل

نتایج مربوط به تغییرات ضرایب برآ و پسا برای حالت‌های اول تا چهارم در شکل‌های (۱۵ تا ۱۸) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۵ نمایه‌های ضریب برآ و پسا برای حالت اول

در حالت اول پس از فعال‌سازی عملگرها و تأثیر آن‌ها روی جریان، به دلیل حذف گردابه‌ها و ناحیه جدایش، ضریب برآ از حالت نوسانی خارج شده و ثابت می‌شود. در این حالت مقدار ضریب پسا نیز به شدت افت کرده و از حدود  $0.65$  به  $0.1$  می‌رسد (شکل ۱۵).

- استفاده از عملگرهای پلازما در حالتی که دو عملگر تکی در موقعیت‌های ۹۰ و ۴۵ (حالت اول) درجه در بالا و پایین ناحیه پشتی سیلندر قرار گیرد، به علت حذف گردابه‌های ایجادشده و کاهش ضریب پسا، بهترین وضعیت قرارگیری عملگرها می‌باشد.
- در صورتی که توان مصرفی کمتر عملگرها و درعین حال بیشترین تأثیر روی جریان مدنظر باشد، محل قرارگیری عملگرها در حالت دوم (دو عملگر پلاسمای تکی در زوایای  $\pm 90^\circ$  درجه) توصیه می‌شود. در این وضعیت گردابه‌ها تا حد زیادی حذف شده و جدایش جریان به تأخیر می‌افتد که کاهش پسا را به دنبال دارد.
- وضعیت قرارگیری عملگرهای پلازما در حالت سوم (دو عملگر تکی در زوایای  $\pm 45^\circ$  درجه)، تأثیری چندانی روی ناحیه جدایش و ضریب پسا ندارد.
- استفاده از عملگرهای L-PSJ (حالت چهارم) در زوایای  $\pm 45^\circ$  در این مسئله به خصوص، به دلیل تأثیر کمتر روی جریان و همچنین توان مصرفی بالاتر، توصیه نمی‌شود.

### فهرست علائم

$\vec{F}_B$	نیروی حاصل از عملگر پلازما در واحد حجم، ( $N/m^3$ )
$\vec{E}$	میدان الکتریکی، ( $N/C$ ) یا ( $V/m$ )
$E_b$	قدرت شکست میدان الکتریکی، ( $V/m$ )
$F_p$	نیروی حجمی ناشی از پلازما در واحد حجم، ( $N/m^3$ )
$k_1, k_2$	ثابت‌های هندسی، ( $V/m$ )
$u_i$	سرعت در راستای $x$ ، ( $m/s$ )
$u'_i$	سرعت جریان مغشوش، ( $m/s$ )
$x_i$	جهت مختصاتی، ( $m$ )

پس از فعال‌سازی عملگرهای L-PSJ در حالت چهارم، دامنه نوسانات جریان در پشت استوانه، نسبت به حالت بدون عملگر، افزایش می‌یابد. درعین حال به دلیل کوچکتر شدن ناحیه جدایش، ضریب پسا مقدار اندکی افت پیدا کرده و حالت نوسانی با دامنه کوچک خود را حفظ می‌کند (شکل ۱۸).

نتایج فوق (میدان‌های سرعت و ضرایب برآ و پسا) نشان می‌دهند که موقعیت قرارگیری عملگرهای پلازما و نوع آن، تأثیر زیادی روی ناحیه جدایش و گردابه‌های ایجادشده در پشت استوانه می‌گذارد.

باتوجه به آنچه که قبلاً اشاره شد، مقایسه نمایه‌های ضرایب برآ و پسا برای هر کدام از حالت‌ها، نشان می‌دهد که بهترین محل قرارگیری عملگرهای پلازما به لحاظ کنترل جریان و همچنین مصرف کمتر انرژی، استفاده از دو عملگر در زوایای  $\pm 45^\circ$  (حالت دوم) می‌باشد.

### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی جریان دوبعدی حول یک استوانه مدور و تأثیر استفاده از عملگرهای پلازما (شامل تکی و L-PSJ) برای کنترل جریان در پشت استوانه مورد بررسی قرار گرفت. عملگرهای پلازما با استفاده از مدل خطی شده نیرو شبیه‌سازی گردید و نتایج حاصل با داده‌های تجربی مرجع [20] مورد مقایسه قرار گرفت. سپس تأثیر محل قرارگیری این عملگرها بر نقطه جدایش و حذف گردابه‌ها در چهار حالت مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج به دست آمده عبارتست از:

- اعتبارسنجی و مقایسه نتایج تحقیق حاضر با داده‌های مرجع [20] نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عملگرها در جدایش جریان با استفاده از مدل خطی شده نیرو (در عین سادگی) به لحاظ کیفی به صورت موفق عمل کرده است.

$\rho$ چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$\Delta t$ زمان تشکیل پلاسما، (s)
زیر نویس ها	P فشار استاتیک، (Pa)
b شکست	V دامنه ولتاژ، (V)
i, j شماره‌نده	a, b عرض و ارتفاع ناحیه تشکیل
t مغشوش	پلاسما، (m)
	d فاصله افقی بین دو الکتروود، (m)
واژه‌نامه	$e_c$ بار اولیه، $1.6 \times 10^{-19}$ C، (C)
Dielectric barrier discharge plasma actuator	k انرژی جنبشی مغشوش، ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
عملگر پلاسما تخلیه	علائم یونانی
الکتريکی با مانع دی‌الکتريک	$\mu_t$ لزجت مغشوش، (kg/m.s)
Single plasma actuator	$\rho_c$ چگالی بار الکترون، $1 \times 10^{11} / \text{cm}^3$
عملگر پلاسما تکی	( $1/\text{m}^3$ )
Linear Plasma Synthetic Jet Actuator (L-PSJA).	$\alpha$ فاکتور محاسبه بازخورد، (بی‌بعد)
پلاسما	$\delta$ تابع دلتای کرونیکر، (بی‌بعد)
Flow control	$\mu$ لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
کنترل جریان	$\nu$ فرکانس ولتاژ اعمالی، (1/s) یا (Hz)
Linearized force model	مدل خطی شده نیرو

## مراجع

- Siemens, W., "Annual Review of Physical Chemistry", 102, 66, (1857).
- West, T.K. and Hosder, S., "Numerical investigation of plasma actuator configurations for flow separation control at multiple angles of attack", *International Journal of Flow Control*, Vol. 5, pp. 25-46, (2013).
- Orlov, D.M., "Modelling and simulation of single dielectric barrier discharge plasma actuators", PhD dissertation, University of Notre Dame, (2006).
- Santhanakrishnan, A. and Jacob, J.D., "On plasma synthetic jet actuators", *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, No. 0317, Reno, N.V., (Jan. 9-12, 2006).
- Santhanakrishnan, A., Jacob, J.D. and Suzen, Y.B., "Flow control using plasma actuators and linear/annular plasma synthetic jet actuators", *3rd AIAA Flow Control Conference*, No. 3033, San Francisco, (Jun. 5-6, 2006).
- Santhanakrishnan, A., Reasor, D. and LeBeau, R., "Unstructured numerical simulation of experimental linear plasma actuator synthetic jet flows", *AIAA Paper*, No. 541, Reno, N.V., (Jan. 7-10, 2008).
- سلماسی، عاطفه، شادآرام، عبدالله، میرزایی، مسعود، شمس طالقانی، آرش "بررسی عددی و تجربی اثر یک عملگر پلاسمايي بر کارایی ایرفویل NLF0414 در زوایای حمله پس از واماندگی"، "مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۲، صص ۱۱۶-۱۰۴، (۱۳۹۱).
- Shyy, W., Jayaraman, B. and Andersson, A., "Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics", *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 11, pp. 6434-6443, (2002).

9. Suzen, Y., Huang, P., Jacob, J. and Ashpis, D., "Numerical simulations of plasma based flow control applications", *AIAA paper*, 35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, No. 4633, Toronto, Ontario, (June 6-9, 2005).
10. Orlov, D., Corke, T. and Patel, M., "Electric Circuit Model for Aerodynamic Plasma Actuator ", *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, No. 1206, Reno, Nevada, (9 - 12 January 2006).
11. Abdollahzadeh, M., Páscoa, J. and Oliveira, P., "Numerical modelling of boundary layer control using dielectric barrier discharge", *MEFTE IV National Conference on Fluid Mechanics, Thermodynamics and Energy*, Lisbon, LNEC, (May 28 -29, 2012).
12. Khoshkhou, R. and Jahangirian, A., "Flow separation control over airfoils using DBD plasma body force", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. 1-13, (2014).
13. Zhang, P.F., Liu, A.B. and Wang, J.J., "Aerodynamic Modification of NACA 0012 Airfoil by Trailing-Edge Plasma Gurney Flap", *AIAA Journal*, Vol. 47, pp. 2467-2474, (2009).
14. MahboubiDoust, A., Ramiar, A. and Dardel, M., "Numerical investigation of plasma actuated and non-actuated Gurney flaps on aerodynamic characteristics of a plunging airfoil", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 230, pp. 1423-1437, (2016).
۱۵. میرزایی، سعید و پسندیده فرد، محمود، "شبیه سازی عددی چند ساختار از عملگرهای پلازما و ارزیابی عملکرد آن ها بر روی ایرفویل های NACA 0012 و NACA 0015"، نشریه مهندسی هوانوردی، دوره ۱۶ شماره ۱، صص ۹۴-۷۵، (۱۳۹۳).
16. Lemire, S.B. and Vo, H.D., "Reduction of Fan and Compressor Wake Defect Using Plasma Actuation for Tonal Noise Reduction", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 133, No. 011017, (2011).
۱۷. ابراهیمی فردویی، اسماعیل، مراد، محمد رضا و پاینده، محمد، "مدل سازی عددی اثر عملگر پلازما بر میدان دما و سرعت احتراق آشفته متان و هوا"، دومین همایش ملی انتقال حرارت و جرم ایران، (۱۳۹۳).
18. Greenblatt, D., Schulman, M. and Ben-Harav, A., "Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators", *Renewable Energy*, Vol. 37, pp. 345-354, (2012).
۱۹. ابراهیمی، عباس، موحدی، محمد رضا، "اثر عملگر کنترل جریان پلازما در بهبود عملکرد آیرودینامیکی روتور توربین باد مگاواتی"، دوره ۱۶، شماره ۱۲، صص ۵۱۷-۵۰۹، (۱۳۹۵).
20. Thomas, F.O., Kozlov, A. and Corke, T.C., "Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction", *AIAA Journal*, Vol. 46, pp. 1921-1931, (2008).
21. Sosa, R., D'Adamo, J. and Artana, G., "Circular cylinder drag reduction by three-electrode plasma actuators", *Journal of Physics*, Vol. 166, No. 012015, (2009).
22. Tabatabaeian, S., Mirzaei, M., Sadighzadeh, A., Damideh, V. and Shadaram, A., "Experimental investigation of the effects of various plasma actuator configurations on lift and drag coefficients of a circular cylinder including the effects of electrodes", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 25, pp. 311-324, (2012).
23. Kopiev, V.F., Belyaev, I.V., Zaytsev, M.Yu., Kazansky, P.N., Kopiev, V.A. and Moralev, I.A., "Noise control of a flow around a cylinder using high-frequency dielectric barrier discharge plasma actuators", *Acoustical Physics*, Vol. 61, pp. 178-180, (2015).
24. Kim, D. and Wang, M., "Large-eddy simulation of flow over a circular cylinder with plasma-based control", *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, No. 1080, Orlando, Florida, (5 - 8 January 2009).
25. Skote, M., Ibrahim, I.H. and Lewis, R., "Utilizing the L-PSJA for controlling cylindrical wake flow", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 26, No. 5, (2016).

