



## بررسی عددی عوامل موثر بر کارایی محرک‌های پلاسمایی پایا و ناپایا بر روی جریان هوای عبوری از روی صفحه تخت

مجتبی احمدپور رودسری<sup>1</sup>، حمید پرهیزکار<sup>2\*</sup>، غلامحسین پوریوسفی<sup>3</sup>، عباس طربی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-1774، hparhiz@mut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 شهریور 1396

پذیرش: 09 آذر 1396

ارائه در سایت: 15 دی 1396

کلید واژگان:

محرک پلاسما

روش فعال کنترل جریان

لایه مرزی

سیکل وظیفه

### چکیده

توانایی کنترل جریان، یکی از نیازهای اساسی در علم مکانیک سیالات است که پیوسته توسط محققین دنبال می‌شود. یکی از روش‌های نوین در این حیطه، استفاده از عملگرهای پلاسمایی است که به وسیله‌ی تزریق ممتوم به لایه مرزی، سبب تأخیر در وقوع پدیده جدایش می‌شود. هدف از این بررسی، کمک به بهینه‌سازی پرامترهای الکتریکی به منظور دستیابی به گردابه‌های تولیدی قوی‌تر و به دنبال آن باد یونی موثرتر، ایجاد شده توسط محرک‌های پلاسمایی تخلیه سد دی الکتریکی پایا و ناپایا (موج ورودی به این محرک دارای رفتار غیردائمی می‌باشد) بر روی جریان هوای عبوری از روی یک صفحه تخت می‌باشد. برای این منظور، صفحه تخت مذکور تحت جریان هوای عبوری با سرعت 5 m/s شبیه‌سازی گردید. پروفیل‌های سرعت متوسط باد یونی القایی نشان داد که در هر دو محرک پایا و ناپایا، با افزایش فرکانس و ولتاژ اعمالی به محرک، سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد و به سطح نزدیک‌تر می‌گردد. همچنین در محرک ناپایا با افزایش سیکل وظیفه قدرت گردابه‌های تولید شده توسط محرک‌های پلاسمایی افزایش می‌یابد. در ادامه با بررسی‌های انجام شده بر روی سرعت باد یونی القایی در موقعیت‌های مختلف بر روی صفحه (در بالا دست و پایین دست محرک)، مشاهده گردید که مقدار ماکزیمم سرعت متوسط جریان در پایین دست محرک و در نزدیکی سطح اتفاق می‌افتد.

## Numerical investigation of factors affecting in the steady and unsteady plasma actuators performance on the airflow through the flat plate

Mojtaba Ahmadpour Roudsari<sup>1</sup>, Hamid Parhizkar<sup>1\*</sup>, Gholam Hossein Pouryoussefi<sup>2</sup>, Abas Tarabi<sup>1</sup>

1-Aerospace Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2-Aerospace Department, Khajeh Nasir Toosi University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, hparhiz@mut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 September 2017

Accepted 30 November 2017

Available Online 05 January 2018

#### Keywords:

Plasma Actuator

Active Flow Control Method

Boundary Layer

Duty Cycle

### ABSTRACT

The ability to control the flow, is one of the basic needs of Fluid Mechanics that constantly pursued by researchers. One of the new methods in this area, is using Dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators that by injecting momentum into the boundary layer, causing a delay in the phenomenon separation. The main object in this work was to help to optimize the electrical parameters to obtain stranger vortex and more effective ionic wind created by steady and unsteady plasma actuators on the air through the flat plate. For this reason, simulation is done for a flat plate with the compressible 5 m/s velocity airflow. The time averaged velocity profiles of the ionic wind show that averaged velocity come more and the position of the maximum velocity come near the surface by increasing the excitation voltage and frequency. The power, of the vortices that are shed form the unsteady actuator, increases by increasing duty cycle percentage. Our results on the ionic wind velocity on different position on the flat plate indicate that the maximum averaged velocity occurs in downstream of plasma actuator.

### 1- مقدمه

جریان در نزدیکی سطح جسم، مومنتوم کافی برای غلبه بر گرادیان فشار معکوس و تلفات لزجت در طول مسیر جریان را نداشته باشد. بنابراین کنترل جدایش معمولاً به طریقی انجام می‌گیرد که مقدار مومنتوم جریان در لایه مرزی را افزایش دهیم [1].

روش‌های کنترل لایه مرزی را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد:

1- روش‌های غیرفعال 2- روش‌های فعال 3- روش‌های ترکیبی.

کنترل جریان یکی از مسائل اساسی در علم آیرودینامیک می‌باشد که از دیرباز مورد توجه و علاقه محققین این حوزه قرار گرفته است. اثرات مهمی که کنترل جریان بر روی بال به وجود می‌آورد شامل کاهش نیروی پسا، افزایش نیروی برآ و افزایش زاویه واماندگی بال، از طریق به تعویق انداختن جدایش جریان می‌باشد. به طور کلی، جدایش جریان زمانی اتفاق می‌افتد که

### Please cite this article using:

M. Ahmadpour Roudsari, H. Parhizkar, GH. H. Pouryoussefi, A. Tarabi, Numerical investigation of factors affecting in the steady and unsteady plasma actuators performance on the airflow through the flat plate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 111-121, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

میدان جریان سیال تولید کرد. همچنین این امر باعث کاهش قابل ملاحظه اندازه و ابعاد این نوع محرک‌ها شده و امکان نصب آنها را در محیط‌هایی کوچکتر و حتی دقیقاً در محل موردنظر، فراهم می‌آورد.

محرک‌های پلاسمای بی‌دی یکی از روش‌های نوین کنترل فعال جریان آیرودینامیکی هستند و بیش از یک دهه است که از آنها استفاده می‌شود. این محرک کاربردهای بسیاری در کنترل جدایش در لبه حمله ایرفویل [14,13]، کنترل واماندگی دینامیکی ایرفویل [15]، کنترل جریان در اجسام دارای انحنا (بلاف بادی) [17,16]، کنترل جریان لایه مرزی [19,18]، کاربردهای افزایش برآ [20] و کنترل جریان در توربوماشین‌ها [22,21]، دارد.

از جمله مزایای استفاده از این محرک‌ها در حوزه حمل و نقل هوایی، می‌توان به (1) توانایی و قدرت عالی این محرک‌ها جهت کنترل جریان (کنترل جدایش و نویزهای آیرودینامیکی)، (2) پاسخ دینامیکی عالی و در نتیجه کنترل سریع جریان روی وسایل پرنده، (3) توان مصرفی الکتریکی نسبتاً پایین، (4) نصب آسان بر روی هر نوع سطوح آیرودینامیکی و سادگی و سهولت کار کردن با آنها (انطباق کامل با سطح موردنظر و عدم تأثیرگذاری بر هندسه مسأله)، (5) عدم نیاز به برداشتن محرک در مواقعی که نیاز به استفاده از آن نمی‌باشد، و (6) داشتن قابلیت اطمینان بالا به دلیل نداشتن قسمت‌های متحرک، اشاره کرد [23].

بعلاوه این تحقیقات بیان می‌کنند که به راحتی می‌توان محرک‌های پلاسمایی بی‌دی را در نسل فعلی هواپیماهای تجاری و همچنین گستره وسیعی از پهبادها به کاربرد و به سیستم‌های آنها متصل<sup>2</sup> نمود.

محرک‌های پلاسمایی بی‌دی معمولاً از دو الکترود صفحه‌ای (مانند نوار آلومینیوم یا مس) تشکیل شده‌اند که توسط یک منبع تغذیه الکتریکی جریان متناوب از نوع ولتاژ بالای فرکانس حامل بالا، تحریک می‌شوند. یکی از این الکترودها در معرض هوا قرار دارد و الکترود دیگر درون ماده دی‌الکتریک جاسازی می‌شود.

به عبارت دیگر این دو الکترود توسط یک لایه دی‌الکتریک از هم جدا می‌گردند. هنگامی که محرک‌های بی‌دی با ولتاژ و فرکانس بالا تغذیه و تحریک می‌شوند، یک هاله نورانی برافروخته به رنگ آبی و بنفش (که در روشنایی اتاق مشاهده می‌شود)، بر روی سطح محرک (بر فراز الکترود پوشیده) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده فرآیند یونیزاسیون هوا و تشکیل رژیم پلاسمای می‌باشد.

به این نوع از رژیم تخلیه پلاسمای، رژیم تخلیه برافروختگی می‌گویند. تشکیل پلاسمای در نهایت باعث اعمال یک نیروی حجمی مؤثر بر ذرات خنثی هوای محیط اطراف محرک (میدان جریان سیال) می‌شود [24,23]. طرح‌واره‌ای از محرک‌های پلاسمایی نوع تخلیه مانع دی‌الکتریک (میدان جریان سیال) در "شکل 1"، نشان داده شده است.

منابع تغذیه الکتریکی که در محرک‌های پلاسمایی بی‌دی استفاده می‌شوند، معمولاً برای عملکرد در دو حالت تحریک پایا و تحریک ناپایا طراحی و ساخته می‌شوند. در حالت تحریک ناپایا، دو متغیر اضافی جدید به نام‌های (1) فرکانس تحریک (فرکانس ناپایایی) و (2) نسبت سیکل وظیفه، برای سینگال الکتریکی خروجی منبع تغذیه تعریف می‌شود. سینگال خروجی منبع تغذیه در محرک‌های پایا، همواره و دائماً در حالت روشن<sup>3</sup> باقی می‌ماند که به آن سینگال موج حامل می‌گویند. در حالی که در محرک‌های ناپایا، در

در روش کنترل فعال جریان، انرژی خارجی در ورودی سیستم می‌تواند به شکل حرارت، لیزر، اشعه الکترونی، ریز موج‌ها، انرژی آکوستیک و پلاسمای باشد. در این روش این امکان وجود دارد که هرگاه نیاز باشد سیستم کنترل جریان را خاموش و هر وقت که بخواهیم سیستم را روشن نماییم.

از این‌رو روش کنترل فعال جریان انعطاف و قابلیت بیشتری نسبت به روش کنترل غیرفعال جریان دارد.

در سالیان اخیر از محرک‌های پلاسمایی بی‌دی به‌طور مؤثری جهت کنترل فعال جریان استفاده شده است. در محرک‌های پلاسمایی، تخلیه پلاسمای عاملی است که میزان مومنتوم ذرات را در مناطق مورد نیاز افزایش می‌دهد. این محرک‌ها مولکول‌های هوا را یونیزه کرده و در طی فرآیند برخورد ذرات باردار در حال حرکت با ذرات خنثی هوا، یک مومنتوم محلی (مومنتم القایی پلاسمای) به جریان اضافه می‌کنند و باعث تولید یک جریان القایی در سیال به نام باد یونی می‌شوند.

پلاسمای گاز شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود ارائه می‌دهند. برای اولین بار لانگمیر در سال 1928 عبارت پلاسمای را برای توصیف حالت یونیزه حاصل از تخلیه الکتریکی در گازها به کار گرفت. امروزه از پلاسمای در ادوات نیمه هادی، تولید لیزر و تولید انرژی الکتریکی، دستگاه‌های جوش کاری و برش کاری و بسیاری دیگر از کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود [2].

ملیک و همکارانش از نیروی جت حاصل از یک تخلیه توسط جریان مستقیم به‌منظور ایجاد یک ناحیه پلاسمای در نهایت کاهش نیروی پسا بر روی صفحات تخت استفاده کردند. پس از آنها افراد مختلفی از عمل تخلیه الکتریکی به منظور تولید بردار نیروی حجمی و کنترل جدایش لایه مرزی جریان و افزایش نیروی برابر روی اجسام مختلف استفاده کردند [4].

فرت و همکارانش به بررسی تأثیر استفاده از عملگر پلاسمایی بر جریان عبوری از روی ایرفویل‌ها پرداختند. آنها در زمینه‌هایی چون تأثیرات هندسه، جنس الکترودها، ولتاژ ورودی، فرکانس و پارامترهای دیگر عملگر پلاسمایی تحقیقات زیادی انجام داده‌اند [5].

سین و همکارانش پدیده جدایش جریان را توسط عملگرهای پلاسمایی بر روی یک صفحه تخت دارای زاویه حمله به‌صورت عددی بررسی کردند. آنها در این تحقیق از مدل خود پایدار عملگر پلاسمایی برای یافتن میدان نیروی الکتریکی و اعمال آن به معادلات مومنتوم استفاده کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که اعمال نیروی حجمی حاصل از عملگر به سیال سبب افزایش مومنتوم در نزدیکی دیواره و از بین رفتن حباب‌های ریز داخل جریان می‌شود [6].

به‌طور کلی، محرک‌های پلاسمایی سرد را می‌توان به سه گروه عمده تقسیم کرد: (1) ابزارهای باد کرنا که با منبع تغذیه پلاسمای جریان مستقیم کار می‌کنند [7-8]، (2) ابزارهای تخلیه مانع دی‌الکتریک یا همان محرک‌های پلاسمایی<sup>1</sup> بی‌دی که با منبع تغذیه پلاسمای جریان متناوب کار می‌کنند [9-10] و (3) ابزارهای ورقه پلاسمای [11,12]. در محرک‌های پلاسمایی بی‌دی به دلیل این‌که فاصله میان الکترودها با یک ماده عایق، که مقاومت الکتریکی آن نسبت به تخلیه الکتریکی زیاد است (یک لایه دی‌الکتریک مانند پلیکسی گلس یا کپتون و...)، پوشیده شده است، می‌توان از الکترودهایی با فاصله بسیار کمتر استفاده نمود و در نتیجه شدت میدان الکتریکی و همزمان نرخ یونیزاسیون مولکول‌های هوا، افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان پلاسمایی با قدرت بیشتر جهت تأثیرگذاری بهتر بر

<sup>2</sup> Retrofit  
<sup>3</sup> Plasma on

<sup>1</sup> Dielectric barrier discharge

بخشی از یک زمان مشخص، سیگنال موج حامل روشن و در بخشی دیگر که قابل کنترل است، خاموش می‌شود.<sup>1</sup> مدت زمان اعمال سیگنال به محرک را با  $T_{\text{signal}}$  و دوره تناوب یک موج پالس (تحریک ناپایا)، شامل دو بخش روشن و خاموش سیگنال را با  $T_{\text{control}}$  نشان می‌دهند [25] (شکل 2). نسبت این دو زمان، سیکل وظیفه  $\beta$  است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = (T_{\text{signal}}/T_{\text{control}}) \times 100 \quad (1)$$

$$f_{\text{excitation}} = 1/T_{\text{control}} \quad (2)$$

به طور کلی، مکانیزم‌های الکتروهیدرودینامیک می‌توانند حرکت‌هایی برای افزایش آهنگ انتقال جرم از سیستم‌های تک فازه یا دو فازه به وجود آورند. نیروهای مؤثر شناخته شده در این مکانیزم‌ها عبارتند از: نیروی الکترو استاتیک کولمب، نیروی دی الکتروفوریتیک و نیروی الکترواستریکشن [26]. در محرک‌های پلاسمایی دی بی دی، به دلیل ماهیت متناوب جریان الکتریکی ناشی از منبع تغذیه، نیروی حجمی پلازما (ناشی از اعمال نیروی استاتیک) نیز متناوب است.

بر اساس فرمولاسیونی که توسط ارلوو و همکارانش [28,27] ارائه شده است، جهت نیروی حجمی همواره از الکتروود در معرض به سمت الکتروود پوشیده شده می‌باشد. این نتیجه به علت فرض‌هایی است که در فرمولاسیون این مدل وجود دارد. بویژه "شبه-پایا"<sup>2</sup> که در آن، مقیاس زمانی حرکت الکترون و یون بسیار کوچکتر از تناوب می‌باشد. البته این موضوع برای الکترون‌ها صحیح است ولی در مورد یون‌ها، این موضوع مبحثی است که هنوز هم به عنوان یک سؤال در میان محققان مطرح می‌باشد.

بر اساس پیشنهاد فونت و همکارانش [30,29] در نیم سیکل اول که الکترون‌ها از الکتروود در معرض رانده می‌شوند و یون‌های مثبت به سمت این الکتروود جذب می‌شوند، مومنتم خالص صفر نیست، بلکه به دلیل غلبه یون‌ها،

نیروی حجمی اعمالی در یک سیکل، به سمت الکتروود پوشیده می‌باشد. فرضیه پیشنهاد شده توسط فونت و همکارانش را می‌توان فرضیه "کشش-رانش"<sup>3</sup> و فرضیه پیشنهاد شده توسط ارلوو و همکارانش را فرضیه "رانش-رانش"<sup>4</sup> نامید. مبنای نظری اعمال نیروی حجمی در دو نیم سیکل، برای دو فرضیه فوق، به صورت طرح واره‌ای در "شکل 3" نشان داده شده است. آزمایش‌هایی که توسط فونت و همکارانش [30]، با عکس‌برداری (اندازه‌گیری ال دی وی) از مؤلفه‌های سرعت محرک پلازما در سیکل جریان متناوب انجام شده اند، نشان می‌دهند که در طول یک سیکل، مؤلفه مماسی سرعت بین یک مقدار مثبت بزرگ و یک مقدار مثبت کوچک نوسان می‌کند، ولی هیچگاه منفی نمی‌شود. این موضوع فرضیه رانش-رانش ارلوو و همکارانش را تأیید می‌کند.

مطابق با فرضیه رانش-رانش، اگرچه در نیم سیکل اول و نیم سیکل دوم، علامت الکتروودها و همچنین جهت الکترون‌های آزاد تغییر می‌کند و عوض می‌شود، ولی همواره جهت نیروی حجمی اعمالی، از سمت الکتروود در معرض به سمت الکتروود پوشیده خواهد بود. به بیان دیگر، این نیرو همواره به سمت پایین دست محرک پلاسمایی وارد می‌شود و مقدار آن از رابطه (3) محاسبه می‌گردد [31]. در این رابطه، بردار نیروی حجمی  $F_B$ ، تأثیر آیرودینامیکی محرک پلاسمایی بر روی میدان جریان سیال است (مومنتم القایی پلازما) که در معادله ناویر-استوکس وارد می‌شود.

$$F_B = \rho_c E \quad (3)$$

با توجه به روابط ارائه شده توسط ارلوو و کروک [32] برای مدل‌سازی نیروی حجمی ناشی از تخلیه پلازما ( $F_B$ )، که مطابق فرضیه "رانش-رانش" ارلوو و همکاران [30-28] می‌باشد، معادلات حاکم بر میدان جریان سیال (حالت تراکم‌ناپذیر) با حضور محرک پلاسمایی دی بی دی به شرح زیر است:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (4)$$

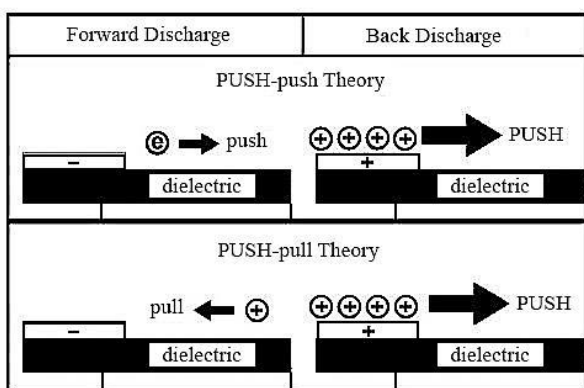


Fig. 3 The body force base is applied in two half-cycles, push-push hypothesis and push-pull hypothesis [30]

شکل 3 مبنای اعمال نیروی حجمی در دو نیم سیکل، برای فرضیه "رانش-رانش" و فرضیه "کشش-رانش" [30]

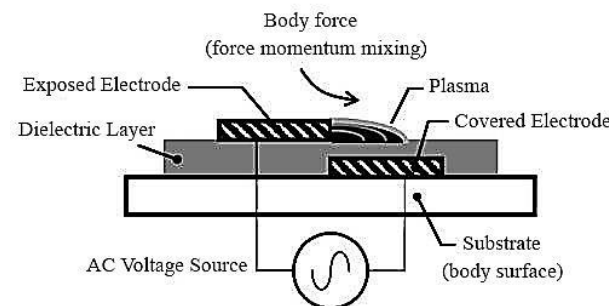


Fig. 1 A schematic of a (DBD) plasma actuator [15]  
شکل 1 طرح واره‌ای از یک محرک پلاسمای (دی بی دی) [15]

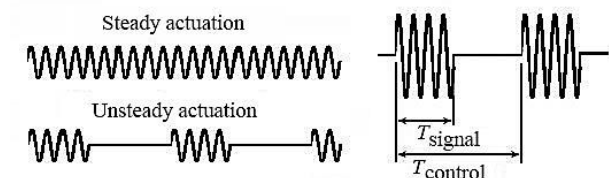


Fig. 2 The difference electrical signal between steady and unsteady actuators [25]

شکل 2 تفاوت سیگنال الکتریکی در محرک‌های پایا و ناپایا [25]

<sup>3</sup> Push-Pull  
<sup>4</sup> Push-Push

<sup>1</sup> Plasma off  
<sup>2</sup> Quasi-Steady

$$E_x = \frac{Ek_2}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}}$$

$$E_y = \frac{Ek_1}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} \quad (12)$$

زمان مورد توجه در بررسی تاثیر عملگر پلاسمایی بر روی سیال، مدت زمان تخلیه پلاسما ( $\Delta t$ ) می‌باشد. به دلیل تخلیه سریع الکترودها، انتقال ممنوم به سیال، فقط در طول بخشی از چرخه جریان متناوب رخ می‌دهد که مقدار زمان  $\Delta t$  در مقایسه با مقیاس زمان جریان سیال بسیار کوچک می‌باشد. بنابراین اجزای نیروی حجمی در راستای  $x$  و  $y$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$f_x = E_x \rho_c e_c$$

$$f_y = E_y \rho_c e_c \quad (13)$$

که در رابطه فوق  $e_c$  بار مقدماتی<sup>۳</sup> و  $\rho_c$  چگالی بار کل می‌باشد. برای اعمال این محدودیت که نیروی حجمی فوق فقط در ناحیه تشکیل پلاسما به سیال اعمال می‌شود از تابع دلتا استفاده می‌شود.

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{برای } E < E_{CR} \\ 0 & \text{برای } E \geq E_{CR} \end{cases} \quad (14)$$

که در رابطه فوق  $E_{CR}$  شدت میدان الکتریکی در حالت شکست می‌باشد. مقدار نیروی موثر بر مولکول‌های خنثی نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$f_{effx} = \alpha f_x \delta$$

$$f_{effy} = \alpha f_y \delta \quad (15)$$

که در رابطه فوق  $\alpha$  فاکتور راندمان برخورد می‌باشد. همان‌طور که گفته شد این نیرو فقط در طول زمان  $\Delta t$  (زمانی که پلاسما در حال شکل‌گیری است) به سیال اعمال می‌شود که فقط شامل نیمی از چرخه جریان متناوب می‌باشد که تولید پلاسما فقط در طی این بازه زمانی انجام می‌شود. از نیروی حجمی حاصل در نیمه دوم چرخه جریان متناوب می‌توان به دلیل عدم تولید و یا مقدار بسیار کم پلاسما صرف‌نظر کرد.

همچنین به دلیل فرکانس بالای تخلیه، می‌توان مقدار نیروی اعمالی بر سیال را به صورت یک متوسط زمانی ثابت فرض کرد که در تمام طول چرخه ثابت می‌باشد و تغییر نمی‌کند. مقدار نیروی حجمی متوسط را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$F_{tavex} = \frac{f_{effx} \Delta t}{T_t}$$

$$F_{tavey} = \frac{f_{effy} \Delta t}{T_t} \quad (16)$$

در این حالت می‌توان زمان  $T_t$  را به جای زمان یک چرخه متناوب، زمان کل اعمال ولتاژ نامید. بنابراین نیروی متوسط اعمالی را می‌توان در نهایت به صورت زیر نوشت:

$$F_{tavex} = \vartheta f_{effx} \Delta t$$

$$F_{tavey} = \vartheta f_{effy} \Delta t \quad (17)$$

که در رابطه فوق  $\vartheta$  فرکانس ولتاژ اعمالی است. با جای‌گذاری رابطه (15) در رابطه فوق و در نهایت جایگزینی روابط (10) الی (12) در رابطه مذکور، نیروی حاصل از عملگر پلاسمایی در راستای  $x$  و  $y$  را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$F_{tavex} = \frac{\vartheta \alpha \rho_c e_c \Delta t E}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} k_2 \delta$$

$$F_{tavey} = \frac{\vartheta \alpha \rho_c e_c \Delta t E}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} k_1 \delta \quad (18)$$

روابط فوق نشان‌دهنده نیروهای حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + F_B \quad (5)$$

$$F_B = \rho_c E = \left( -\frac{\epsilon_0}{\lambda_D^2} \right) E \quad (6)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (7)$$

$$\frac{1}{\lambda_D^2} = \frac{e^2 n_0}{\epsilon_0} \left( \frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_e} \right) \quad (8)$$

به‌طور کلی، در شبیه‌سازی عددی پلاسما، برای حل معادلات جریان سیال و محاسبه مقدار نیروی حجمی، اساساً نیاز به تعیین مقادیر و نحوه توزیع تابع پتانسیل الکتریکی در میدان اطراف محرک می‌باشد. که این معادلات در بسیاری از مطالعات اخیر در زمینه محرک‌های پلاسمایی دی بی دی نیز ارائه شده است [34,33].

مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی نیروی حجمی، یک مدل فیزیکی کامل نمی‌باشد بلکه در حقیقت یک مدل ریاضی-عددی است که در آن برای محاسبه نیروی حجمی، هم از مفاهیم فیزیکی و هم از نتایج داده‌های تجربی استفاده می‌شود و در نهایت، مشابه اعمال شرط مرزی سرعت، عمل می‌کند.

## 2- شبیه‌سازی عددی نیروی حاصل از عملگر

برای تعیین توزیع نیروهای حجمی توسط مدل شای و همکارانش [3]، مقدار نیروی حجمی حاصل به طریقی که در "شکل 4" نمایش داده شده، محاسبه می‌گردد.

در این مدل تغییرات شدت میدان الکتریکی به صورت زیر (خطی) فرض می‌شود:

$$|E| = E_0 - k_1 x - k_2 y \quad (9)$$

که در رابطه فوق،  $E_0$  مقدار شدت میدان الکتریکی در نقطه 0 است که توسط رابطه  $E_0 = V/d$  محاسبه می‌شود. در این رابطه  $V$  ولتاژ بیشینه میان دو الکترودها در راستای  $x$  می‌باشد. مقادیر ثابت  $k_1$  و  $k_2$  نیز با استفاده از این شرط حاصل می‌شوند که شدت میدان الکتریکی در مرز میان پلاسما و سیال برابر مقدار شکست<sup>۱</sup> می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$k_1 = \frac{E_0 - E_b}{b} \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{E_0 - E_b}{a} \quad (11)$$

که در رابطه فوق،  $E_b$  شدت میدان الکتریکی در حالت شکست می‌باشد. اجزای میدان الکتریکی در راستای  $x$  و  $y$  نیز به صورت زیر می‌باشند:

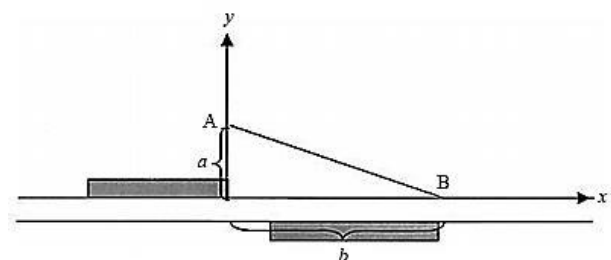


Fig. 4 Schematic of body force area applied by actuator in Shyy and his partners model [3]

شکل 4 شمایی از ناحیه اعمال نیروی حجمی<sup>۲</sup> حاصل از محرک در مدل شای و همکارانش [3]

<sup>1</sup> Breakdown

<sup>2</sup> body force

<sup>3</sup> Elementary Charge

ترم‌های موردنظر کاربر به معادلات مختلف سیالاتی و حرارتی از جمله معادلات پیوستگی، ممنتوم، انرژی، نسبت‌های جرمی ذرات و ... به کار برده می‌شود.

شکل کلی این تابع به صورت زیر می‌باشد:

DEFINE\_SOURCE(name,c,t,ds,eqn)

همان‌طور که مشخص است این تابع دارای 5 ترم ورودی می‌باشد. ترم اول داخل پرانتز نشان‌دهنده نام تابع بوده و c, t, ds و eqn متغیرهایی هستند که توسط حل‌گر فلونتت به توابع توصیفی کاربر منتقل می‌شوند. متغیر c یک نشانگر است که سلولی را که ترم منبع به آن اعمال می‌شود، مشخص می‌کند و t نیز یک نشانگر به رشته سلول است. آرایه ds ترم منبع مشتق شده با توجه به متغیر وابسته به معادله موردنظر می‌باشد. این ترم ممکن است به‌منظور خطی‌سازی ترم منبع و افزایش پایداری کل، مورد استفاده قرار گیرد. ترم eqn نیز نشان‌دهنده معادله‌ای است که ترم منبع به آن اعمال می‌شود.

برای اعمال نیروی حجمی، کد موردنظر توسط زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده و سپس توسط نرم‌افزار فلونتت به نواحی مختلف بر روی سطح پله که پلازما در آنجا تولید می‌شود، اعمال می‌شود.

### 3- شبیه‌سازی مدل صفحه تخت

به منظور بررسی تاثیر محرک پلازما بر الگوی جریان، از یک صفحه تخت به طول 20 میلی‌متر و از سه شبکه با تعداد سلول‌های متفاوت استفاده شده است. لازم به ذکر است فاصله مرکز صفحه از مرز بالا برابر نصف طول صفحه یعنی 10 میلی‌متر است. در جدول 1 پارامترهای انتخاب شده برای مدل‌سازی محرک در این مطالعه آورده شده و در "شکل 5" نمایی از این صفحه و میدان حل نشان داده شده است.

معادلات حاکم بر میدان حل توسط نرم‌افزار انسیس فلونتت نسخه 16 حل شده است. برای شرایط مرزی ورودی از سرعت ورودی<sup>3</sup> استفاده شده و مقادیر سرعت جریان، شدت آشفتگی<sup>4</sup> و طول مشخصه<sup>5</sup> به ترتیب 10 متر بر ثانیه، 1/ و 0.01 متر قرار داده شده است. در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی<sup>6</sup> استفاده شده، همچنین بر روی سطح از شرط مرزی دیواره<sup>7</sup> همراه با شرط عدم لغزش<sup>8</sup> استفاده شده است. نمایی از هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده در "شکل 5" نشان داده شده است.

در "شکل 6" نمایی از محرک پلاسمای استفاده شده در این تحقیق آورده شده است. در این شکل ابعاد محرک پلازما و ناحیه‌ی اعمال نیروی

می‌باشد که توسط شای و همکارانش [3] ارائه گردید. همان‌طور که گفته شد این نیرو فقط در یک ناحیه مثلثی کوچک در بالای عملگر ایجاد می‌شود. با جایگزینی معادلات فوق در معادلات ناویراستوکس می‌توان نیروی حجمی حاصل از عملگر را بر روی سیال عبوری، بررسی کرد.

معادلات حاکم بر جریان ناپایا، آشفته، دوبعدی و غیرقابل تراکم برای سیال با خواص ثابت و بدون در نظر گرفتن نیروهای حجمی به‌صورت روابط زیر است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (20)$$

معادلات حاکم بر جریان، به روش حجم محدود حل شده‌اند. در این روش، مدل سیال موردنظر به صورت المان‌های حجمی شبیه‌سازی شده و انتگرال گیری می‌شود، معادلات انتگرالی به‌دست آمده گسسته‌سازی شده و در نهایت معادلات به‌دست آمده در یک فرآیند تکراری حل می‌شود. روش حل جریان نیز فشار مبنا بوده و در الگوریتم عددی استفاده شده به‌منظور حل میدان جریان برای کوپل کردن گرادیان‌های سرعت و فشار از روش سیمپل و برای گسسته‌سازی معادلات مومنوم از روش مرتبه دوم استفاده شده است. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان نیز از مدل آشفتگی  $K - \omega$  SST استفاده شده است که از نوع مدل دو معادله‌ای برپایه گردابه-لزجت می‌باشد.

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی جریان اطراف پله از نرم‌افزار فلونتت و جهت ایجاد شبکه اطراف پله از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. نرم‌افزار فلونتت به‌طور استاندارد قادر به شبیه‌سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر نمی‌باشد. به منظور افزودن نیروی حجمی خارجی در نرم‌افزار فلونتت، باید از توابع توصیفی کاربر<sup>1</sup> استفاده نمود.

توابع توصیفی کاربر توابعی هستند که توسط کاربر، برنامه‌نویسی و در نرم‌افزار فلونتت بارگذاری می‌شود تا ویژگی‌ها و قابلیت‌های استاندارد کد نوشته شده در فلونتت را ارتقا دهد. این توابع توسط زبان برنامه‌نویسی C کدنویسی می‌شوند. هر تابع توصیفی کاربر شامل یک فایل udf.h می‌باشد که در ابتدای هر فایل و به‌صورت ("include "udf.h") در ابتدای هر کد آورده می‌شود و به توابع تعریف شده اجازه می‌دهد که به مدل‌سازی انجام گرفته توسط نرم‌افزار اعمال شود.

توابع توصیفی کاربر، قادر به انجام طیف وسیعی از کاربردهای مختلف در نرم‌افزار فلونتت بوده که به صورت استاندارد در نرم‌افزار وجود ندارند ولی می‌توانند بنا به خواست موردنظر کاربر به مدل‌سازی اعمال شوند. از جمله این کاربردها عبارتند از:

1- تعریف شرایط مرزی پیچیده

2- تعریف خاص مواد

3- افزودن ترم‌های منبع

4- تغییر نرخ واکنش سطحی و حجمی

5- ارتقای مدل‌های مخلوط‌های چند فازی

با توجه به تمام ویژگی‌های گفته شده در مورد توابع توصیفی کاربر و همچنین ساده‌تر بودن استفاده از آن‌ها نسبت به روش‌های دیگر، این توابع کاربردهای بسیاری در مهندسی یافته و اغلب برای مدل‌سازی‌های پیچیده‌تر ارجحیت دارند. در این تحقیق نیز به منظور مدل‌سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر از تابع توصیف منبع<sup>2</sup> استفاده می‌شود. این تابع به‌منظور افزودن

جدول 1 مشخصات پارامترهای انتخاب شده برای مدل‌سازی محرک پلازما

Table 1 Selected parameters specifications for modeling plasma actuator

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی عددی الکترون	1/m <sup>3</sup>	1 × 10 <sup>17</sup>
فرکانس ولتاژ اعمال شده	Hz	3000
بار الکترون		1.602 × 10 <sup>-19</sup>
زمان تخلیه پلازما	sec	67 × 10 <sup>6</sup>
قدرت میدان الکتریکی	V/m	3 × 10 <sup>6</sup>
ولتاژ اعمال شده	Volts	4000

<sup>3</sup> Velocity inlet

<sup>4</sup> Turbulent Intensity

<sup>5</sup> Length Scale

<sup>6</sup> Pressure outlet

<sup>7</sup> Wall

<sup>8</sup> No Slip

<sup>1</sup> User Defined Functions (UDF)

<sup>2</sup> DEFINE\_SOURCE

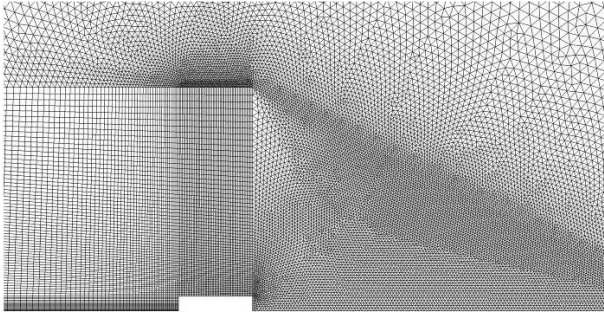


Fig. 8 View of the production network with boundary layer created  
شکل 8 نمایی از شبکه تولیدی همراه با لایه مرزی ایجاد شده

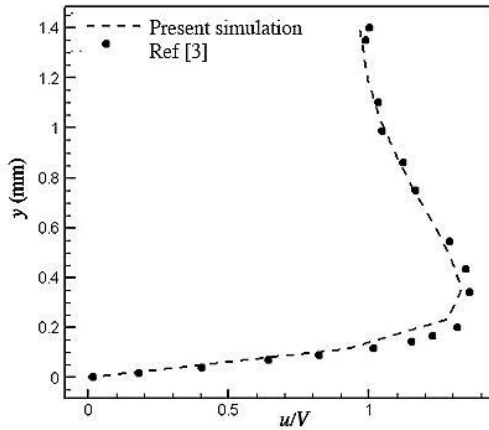


Fig. 9 Compare computed average velocity chart with reference results in station number 4

شکل 9 مقایسه نمودار سرعت متوسط محاسبه شده با نتایج مرجع در موقعیت شماره چهار [3]

است، می‌توان به این اطمینان رسید که نتیجه حاصل شده تا حد بسیار زیادی با نتایج مرجع تطابق دارد. مقادیر پارامترهای استفاده شده برابر سرعت جریان آزاد 5 m/s، فرکانس حامل 3 kHz و ولتاژ اعمالی 4 kV می‌باشد.

#### 4-1- تاثیر پارامترهای مختلف در عملکرد محرک پایا

برای بررسی تاثیر پارامترهای الکتریکی (ولتاژ و فرکانس) و همچنین تغییر سرعت جریان آزاد بر عملکرد محرک پلاسمای پایا ابتدا نمودار سرعت جریان آزاد در چهار موقعیت مختلف در بالا دست و پایین دست محرک پلاسمای در "شکل 10" نشان داده شده است (محل 4 موقعیت موردنظر در "شکل 7" قابل مشاهده است).

همان‌طور که در "شکل 10" قابل مشاهده می‌باشد، تغییرات نمودار سرعت متوسط جریان آزاد نشان می‌دهد که، در بالا دست محرک تغییرات سرعت بسیار ناچیز می‌باشد و سرعت تقریباً برابر سرعت جریان آزاد باقی می‌ماند (موقعیت‌های شماره 1 و 2).

نتایج در پایین دست محرک بسیار متفاوت است. همان‌طور که قابل مشاهده است افزایش سرعت بلافاصله پس از محرک و اعمال نیروی حجمی به جریان آزاد آغاز می‌شود. در واقع ناحیهی اعمال پلاسمای آزاد را به سمت خود می‌کشد و همین مسئله باعث می‌شود که سرعت جریان آزاد در این ناحیه بیشتر گردد.

نکته دیگر این است که این مکش جریان باعث می‌گردد که جریان به سمت دیواره کشیده شود و سرعت در ناحیه نزدیک به سطح مقدار بیشتری داشته باشد. همین مسئله در ادامه باعث می‌گردد که طول ناحیه بازپوست

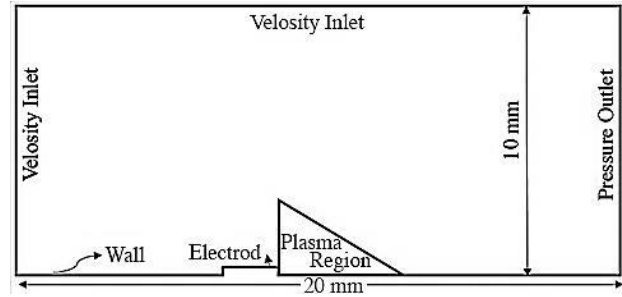


Fig. 5 Geometry and boundary conditions set for flow analysis  
شکل 5 هندسه و شرایط مرزی تعیین شده برای تحلیل جریان

حجمی ناشی از محرک قابل مشاهده می‌باشد. در "شکل 7" موقعیت‌های مکانی مختلف، برای اندازه‌گیری سرعت متوسط و همچنین اعتبارسنجی نمودارهای به دست آمده نشان داده شده است. "شکل 8" مربوط به نمایی از شبکه‌بندی استفاده شده برای مدل صفحه تخت است. برای بررسی حساسیت شبکه نسبت به حل از سه شبکه ریز، متوسط و درشت استفاده شده است. معیار استقلال از شبکه ضریب پسا برحسب تعداد شبکه می‌باشد. از آن‌جا که اختلاف مقادیر به دست آمده از شبکه متوسط و ریز بسیار کم است و نیز برای کوتاه کردن زمان حل و استقلال از شبکه، شبکه متوسط برای حل انتخاب می‌شود.

#### 4- بحث و نتایج

در ابتدا به منظور اعتبارسنجی روش حل مورد استفاده، از مقاله شای [3] استفاده شده است. برای این منظور سرعت متوسط جریان عبوری از روی صفحه تخت در موقعیت ST4 که در "شکل 7" نشان داده شده، به دست آورده شده است.

از مقایسه نمودار به دست آمده و نموداری که توسط شای ارائه گردیده

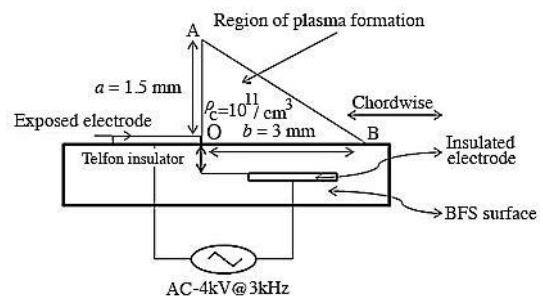


Fig. 6 Schematic model of plasma field

شکل 6 شماتیک میدان مدل پلاسمای

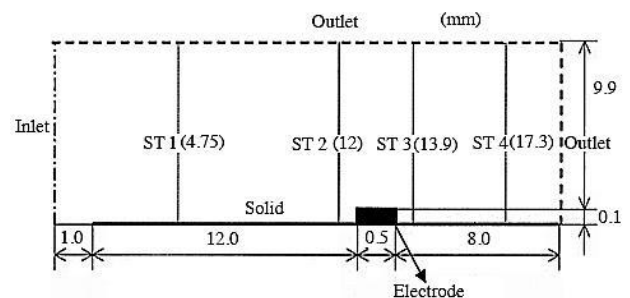


Fig. 7 The solution domain and flat plate boundary conditions in the presence of plasma actuator

شکل 7 دامنه حل و شرایط مرزی صفحه تخت در حضور محرک پلاسمایی

همان‌گونه که در "شکل 11" مشاهده می‌شود، به طور کلی با افزایش مقادیر ولتاژ اعمالی، سرعت متوسط جریان در پایین دست محرک افزایش می‌یابد. افزایش مقدار ولتاژ تا حدی می‌تواند سرعت متوسط جریان را افزایش دهد و با افزایش مقدار ولتاژ مشاهده می‌گردد که سرعت متوسط جریان تغییر چندانی نداشته است. علت این اتفاق می‌تواند این باشد که، فرآیند تخلیه پلاسما، از دو رژیم تخلیه نسبتاً متفاوت پیروی می‌کند. مرحله اول، تا قبل از اشباع شدن محرک، و مرحله دوم، بعد از اشباع شدن محرک.

در حالت اول (تخلیه برافروختگی یکنواخت) که سرعت القایی در حال رشد است، افزایش مقادیر ولتاژ اعمالی، باعث افزایش پدیده انتقال بار، افزایش چگالی پلاسما، افزایش برافروختگی (از طریق تشکیل پلاسمای یکنواخت)، افزایش مقدار نیروی حجمی اعمالی پلاسما به ذرات هوا (سیال) و در نهایت افزایش سرعت متوسط جریان می‌شود. این در حالی است که با اشباع شدن محرک در مرحله دوم، با افزایش بیشتر مقادیر ولتاژ اعمالی، سرعت موثر (میانگین) جریان القایی کاهش می‌یابد.

در حقیقت، اگر یک محرک پلاسمای دی بی دی به وسیله منبع تغذیه، بیشتر از ظرفیت خود، شارژ الکتریکی شود، محرک اشباع می‌شود و تخلیه پلاسما از حالت برافروختگی یکنواخت به حالت برافروختگی رگه‌ای (غیریکنواخت) تبدیل می‌شود. از طرف دیگر، این پدیده باعث می‌شود در سایر نقاط محرک، قدرت چگالی پلاسما و نیز مقدار نیروی حجمی اعمالی به سیال کاهش یابد و نهایتاً، سرعت متوسط جریان تغییر محسوسی نخواهد داشت.

شروع این پدیده (اشباع شدن محرک و تشکیل تخلیه برافروختگی رگه‌ای) می‌تواند تابع عوامل مختلفی باشد، مانند جنس لایه دی‌الکتریک و ضخامت آن، هندسه و آرایش الکترودها، فشار و جنس ماده سیال و همچنین مشخصات و شکل موج سیگنال حامل اعمالی به محرک.

با توجه به "شکل 12" می‌توان مشاهده نمود که با افزایش فرکانس حامل، سرعت متوسط جریان آزاد افزایش می‌یابد. در توجیه این روند می‌توان به این نکته اشاره نمود که با افزایش فرکانس حامل، جریان الکتریکی مصرفی در محرک به صورت محسوسی افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش تخلیه برافروختگی و چگالی پلاسما می‌باشد.

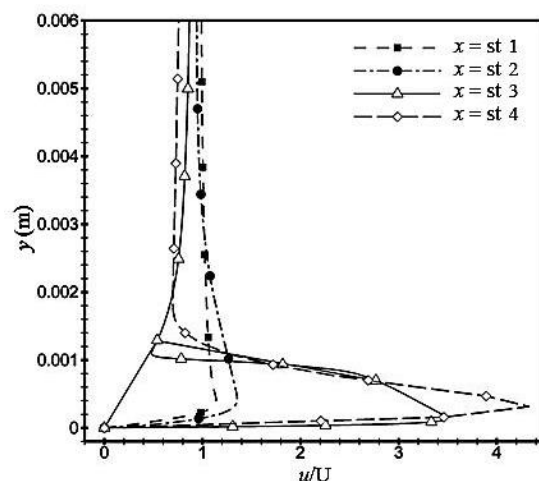


Fig. 10 Average speed chart in the four different stations, Free stream velocity is 5 m/s, Applied voltage is 4 kV and Carrier frequency is 3 kHz

شکل 10 نمودار سرعت متوسط در چهار موقعیت مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، ولتاژ اعمالی 4 kV، فرکانس حامل 3 kHz

جریان کاهش یافته و جدایش جریان به تاخیر بیافتد، که این امر باعث کاهش پسای فشاری، بهبود برآ و سریع‌تر شدن فرآیند بازیابی فشار می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت متوسط جریان آزاد در موقعیت شماره چهار به بیشترین مقدار خود می‌رسد. اما همان‌طور که از نمودار قابل مشاهده است با فاصله گرفتن از ناحیه اعمال نیروی حجمی توسط محرک رفته رفته از سرعت جریان آزاد کاسته می‌شود و در نهایت در فاصله دور دست از این ناحیه سرعت مجدداً با سرعت جریان آزاد در ورودی برابر می‌گردد. این تغییر نشان‌دهنده آن است که نیروی حجمی اعمالی از محرک در ناحیه بسیار کوچکی اعمال می‌گردد ولی تاثیر آن بسیار چشمگیر است.

از نمودار قبل می‌توان به این نتیجه رسید که موقعیت شماره چهار مناسب‌ترین موقعیت برای بررسی عملکرد پارامترهای الکتریکی بر روی محرک است، به منظور بررسی تاثیر تغییر ولتاژ اعمالی بر عملکرد محرک پلاسما، نمودار سرعت متوسط جریان آزاد در موقعیت شماره چهار به دست آورده شده و در "شکل 11" نمایش داده شده است.

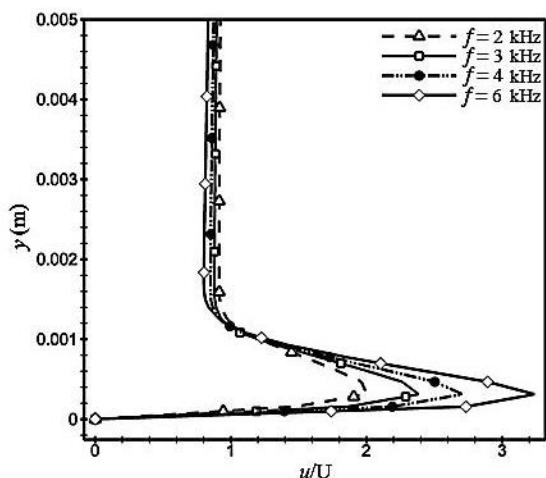


Fig. 12 Average velocity chart in the different carrier frequencies, station number 4, applied voltage is 4kV, free stream speed is 5m/s

شکل 12 نمودار سرعت متوسط در فرکانس‌های مختلف، موقعیت شماره 4، ولتاژ اعمالی برابر 4kV، سرعت جریان آزاد برابر 5m/s

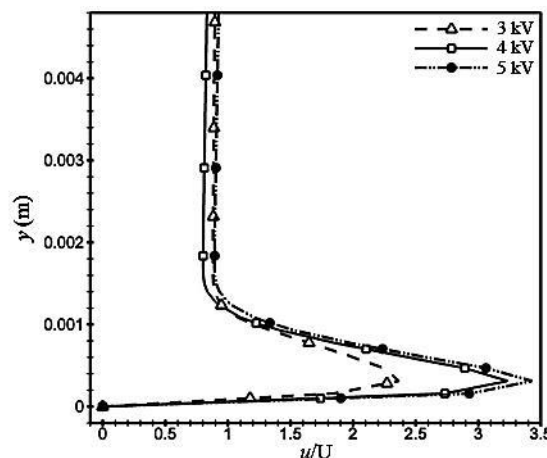
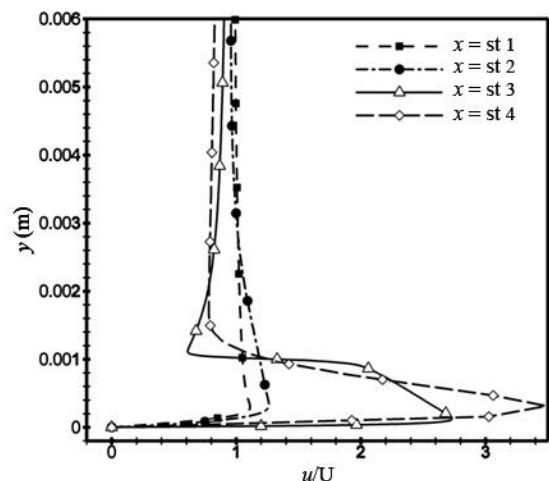


Fig. 11 Average velocity chart in the different applied voltages, station number 4, free stream speed is 5m/s, Carrier frequency is 3kHz

شکل 11 نمودار سرعت متوسط در ولتاژهای مختلف، موقعیت شماره 4، سرعت جریان آزاد برابر 5m/s، فرکانس حامل 3 kHz



**Fig. 14** Average velocity chart in the different stations, Free stream velocity is 5 m/s, Applied voltage is 4kV, Carrier frequency is 3 kHz, excitation frequency is 200 Hz

شکل 14 نمودار سرعت متوسط در موقعیت‌های مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، ولتاژ اعمالی 4 kV، فرکانس حامل 3 kHz، فرکانس تحریک 200 Hz

موقعیت (4) بیشتر می‌گردد و در پایین دست محرک پلازما به بیشترین مقدار خود می‌رسد و نشان‌دهنده آن است که محرک پلازما به خوبی تأثیر خود را بر جریان آزاد اعمال می‌کند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد به محض روشن شدن محرک و شروع تخلیه پلازما، یک نیروی حجمی به میدان سیال اطراف محرک اعمال می‌شود که منجر به تولید جریان القایی باد یونی می‌گردد. این جریان القایی به طرف پایین دست محرک (یعنی به طرف الکتروود پوشیده) حرکت می‌کند و باعث تشکیل یک جت دیواره<sup>1</sup>، بر روی سطح محرک، به صورت مماس بر دیواره می‌شود. با روشن شدن محرک، یک لایه برشی آزاد، بین دو جریان (1) جت دیواره زیرین و (2) هوای بالای محرک، تشکیل می‌شود که نهایتاً منجر به تولید، رشد و ریزش یک گردابه به طرف پایین دست محرک می‌گردد.

در محرک‌های ناپایا، پس از روشن شدن محرک و تشکیل گردابه آغازین، تداوم تخلیه پلازما، باعث تداوم پدیده پیچش گردابه در لایه برشی شده و همزمان باعث می‌شود که گردابه در حالی که به طرف پایین دست حرکت می‌کند و از محرک دور می‌شود، اندازه‌اش رشد کند. در ادامه، با عبور گردابه آغازین از محرک (ریزش گردابه)، تداوم جریان جت دیواره (باد یونی)، باعث تشکیل یک لایه مرزی القایی بر روی سطح محرک (به طرف پایین دست) می‌شود.

اما آن چه که در این قسمت حائز اهمیت می‌باشد، آن است که با مقایسه شکل 10 و 14 می‌توان به این نکته پی برد که تفاوت پیک نمودار سرعت متوسط در این دو نمودار بسیار ناچیز است و این نتیجه باعث می‌گردد که ما بتوانیم با اطمینان بسیار زیادی از محرک‌های ناپایا به جای محرک‌های پایا استفاده کنیم زیرا این محرک‌ها بسته به فرکانس تحریک و سیکل وظیفه تعریف شده برای آن‌ها مدت زمان مشخصی را خاموش هستند و این خاموش بودن باعث کاهش مصرف انرژی در جایی که این پارامتر اهمیت بسیاری دارد، می‌گردد. همچنین در کاهش هزینه‌ها نیز تأثیر چشمگیری دارد.

در ادامه، عملکرد و رفتار محرک‌های پلاسمایی ناپایا، با توجه به اندازه‌گیری متغیرهای آن، بررسی شده است. در این راستا، تأثیر متغیرهای مختلف ورودی در این محرک‌ها، یعنی تأثیر مقادیر فرکانس تحریک و سیکل

از "شکل‌های 11 و 12" می‌توان به این نتیجه دست یافت که حالت بهینه برای عملکرد محرک پلازما، نزدیک شدن به حالتی است که محرک تشکیل یک پلاسمای برافروخته قوی ولی یکنواخت در امتداد طول محرک را می‌دهد. نکته دیگر اینست که محرک پلازما می‌تواند متحمل حجم نسبتاً بزرگی از تخلیه دی‌الکتریکی در هوا بشود. این امر با تجمع الکتریکی بر روی سطح دی‌الکتریک و تشکیل رژیم پلازما (در راستای طول الکتروودها)، از طریق تخلیه برافروختگی ممکن می‌شود.

بررسی‌های انجام شده نشان دهنده آن است که مطابق "شکل 13"، با افزایش سرعت جریان آزاد، پیک نمودار سرعت متوسط جریان در پایین دست محرک کاهش می‌یابد. در واقع پلازما مومنتوم بسیار کمی را به لایه مرزی وارد می‌کند، این مومنتوم با سرعت القایی مشخصی وارد لایه مرزی می‌گردد که بسته به میزان ولتاژ اعمالی و فرکانس حامل مقدار آن متفاوت خواهد شد.

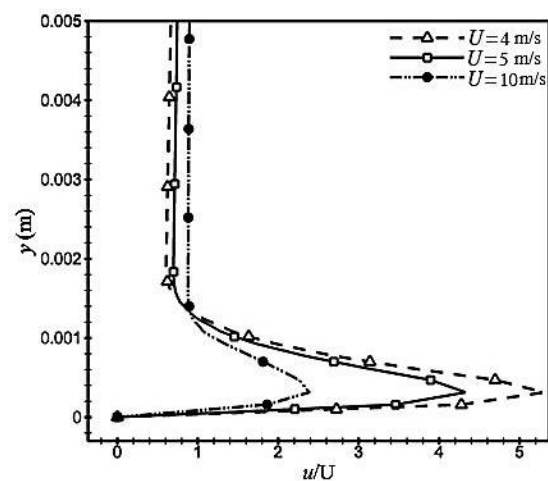
ذکر این نکته لازم است که در هر صورت سرعت القایی مومنتوم به سیال دارای یک پیک می‌باشد و از حد مشخصی بیشتر نمی‌گردد. همچنین باید توجه داشت که مومنتوم تولید شده توسط محرک پلازما نیروی حجمی کمی را به سیال منتقل می‌کند.

با توجه به مطالب گفته شد می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش سرعت جریان آزاد، محرک توان تزریق مومنتوم زیادی را به لایه مرزی نخواهد داشت. زیرا سرعت بالای جریان آزاد بر سرعت القایی محرک غلبه می‌کند و این امر باعث کاهش عملکرد محرک می‌گردد و همان‌طور که در نمودار "شکل 13" مشخص است با افزایش سرعت جریان آزاد پیک نمودار سرعت متوسط جریان در ناحیه اعمال نیروی حجمی کاهش می‌یابد.

#### 4-2- تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد محرک پایا

برای بررسی تأثیر پارامترهای گفته شده، ابتدا در سرعت جریان آزاد 5 m/s، فرکانس 12 kHz و ولتاژ 15 kV، در سیکل وظیفه 60 درصد و فرکانس تحریک 220 Hz در چهار موقعیت نشان داده شده در "شکل 7"، نمودار سرعت متوسط رسم شده است.

مطابق "شکل 14" تغییرات سرعت متوسط از موقعیت (1) به سمت

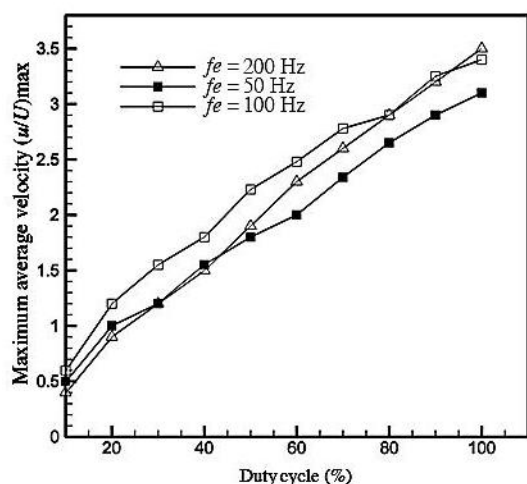


**Fig. 13** Average velocity chart in the different free stream speeds, applied voltage is 4kV, Carrier frequency is 3kHz, station number 4

شکل 13 نمودار سرعت متوسط در سرعت‌های مختلف جریان آزاد، ولتاژ 4kV، فرکانس حامل 3 kHz، موقعیت شماره 4

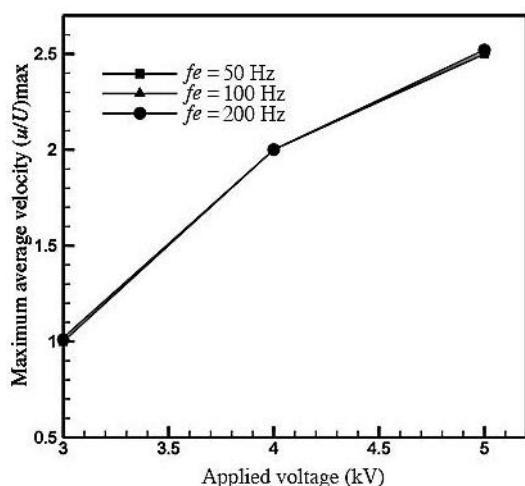
<sup>1</sup> Wall Jet





**Fig. 16** Maximum Average velocity chart in the different excitation frequencies and Duty cycles , Free stream velocity is 5 m/s, Carrier frequency is 6 kHz, Applied voltage is 5 kV

شکل 16 نمودار ماکزیمم سرعت متوسط در فرکانس‌های تحریک و سیکل‌های وظیفه مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، فرکانس حامل 6 kHz، ولتاژ اعمالی برابر 5 kV



**Fig. 17** Maximum Average velocity chart in the different excitation frequencies and Applied voltages , Duty cycles is 30%, Free stream velocity is 5 m/s, Carrier frequency is 6 kHz

شکل 17 نمودار ماکزیمم سرعت متوسط در فرکانس‌های تحریک و ولتاژهای اعمالی مختلف، سیکل وظیفه 30 درصد، سرعت جریان آزاد 5m/s، فرکانس حامل 6 kHz

متناوب گردابه‌ها در دنباله اجسام) می‌باشد، زیرا می‌تواند قابلیت تاثیرگذاری بیشتری بر کنترل جریان القایی داشته باشد.

در این موارد، استفاده از تحریک ناپایا، می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف انرژی الکتریکی، قابلیت کنترل جریان بالاتری را نیز ایجاد کند.

نکته قابل توجه دیگر در زمینه عملکرد محرک‌های ناپایا این است که مطابق مشاهدات عینی انجام شده در حین انجام آزمایشات تحقیق کنونی، آشکار شد که تحریک ناپایا (در مقایسه با تحریک پایا)، به دلیل عدم گرمایش پیوسته (به دلیل داشتن زمان برای استراحت و خنک کاری هنگام خاموش بودن سیگنال، ناشی از عدم فعالیت پیوسته محرک)، می‌تواند باعث کاهش دمای محرک شده و از تخریب لایه عایق دی‌الکتریک (تغییر حالت، باد کردن و حباب زدن، و نهایتاً ذوب شدن لایه پلکسی گلس)، در اثر گرمایش بیش از حد محرک (برای حالت عملکرد طولانی مدت محرک در ولتاژ اعمالی و فرکانس‌های حامل بالا) جلوگیری کند.

وظیفه، بر روی سرعت متوسط در موقعیت شماره (4) اندازه گیری و ارزیابی شده است. در کلیه بررسی‌ها مربوط به بخش بررسی عملکرد محرک‌های ناپایا، مقدار فرکانس حامل برابر 6 کیلوهرتز می‌باشد.

در ابتدا، تاثیر تغییرات مقدار سیکل وظیفه (برحسب درصد) بر روی عملکرد محرک مطالعه شده است. در این راستا، نمودارهای تغییرات سرعت القایی متوسط برحسب مقادیر مختلف سیکل وظیفه از 10 درصد الی 100 درصد (تحریک پایا)، از طریق افزایش ولتاژ اعمالی در فرکانس تحریک 200 هرتز، در "شکل 15" نشان داده شده است.

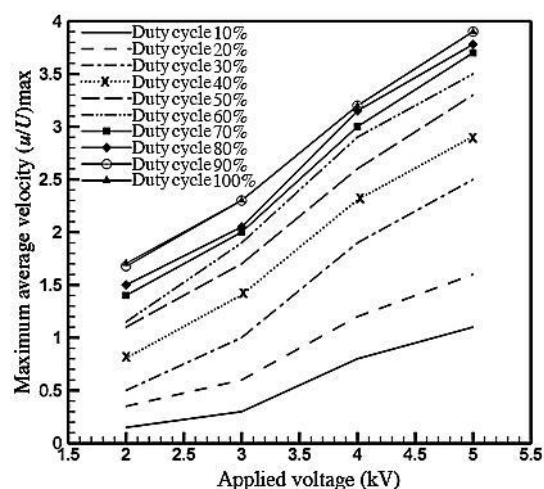
نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که مطابق "شکل 15" با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی، در یک فرکانس تحریک و سیکل‌های وظیفه مختلف و معین، مقادیر سرعت القایی متوسط افزایش می‌یابد. این امر بیانگر افزایش حجم و قدرت پلازما در این حالت است. روند این پدیده، تقریباً مشابه عملکرد محرک‌های پایا (در حالت رژیم برافروختگی یکنواخت) می‌باشد. به علاوه، با افزایش مقدار سیکل وظیفه، در یک فرکانس تحریک ثابت، و در نتیجه افزایش مدت زمان روشن بودن سیگنال اعمالی به محرک در هر پالس تحریک، مقادیر سرعت القایی متوسط افزایش می‌یابد.

نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که مطابق "شکل 16" نمودار ماکزیمم سرعت متوسط با افزایش سیکل وظیفه و فرکانس تحریک، تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد.

پس از مطالعه پارامتر سیکل وظیفه، حال نوبت بررسی تاثیر فرکانس تحریک، بر روی عملکرد محرک ناپایا و همچنین مشخصات جریان القایی آن می‌باشد. برای رسیدن به این مقصود، نمودار تغییرات ماکزیمم سرعت متوسط برحسب ولتاژ اعمالی در سیکل وظیفه 30 درصدی، برای سه فرکانس تحریک مختلف 50، 100 و 200 هرتز، در "شکل 17" ارائه شده است.

همان‌گونه که در "شکل 17" ملاحظه می‌شود، اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی، ماکزیمم سرعت متوسط افزایش می‌یابد، ولی تغییر مقدار فرکانس تحریک، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر آن‌ها ندارد و نمودار برای هر سه فرکانس، تقریباً بر روی یکدیگر افتاده است.

مزیت عمده محرک‌های ناپایا، برای کنترل جریان‌های ناپایا و پالسی است که شامل کنترل لایه‌های برشی ناپایا و کنترل جدایش جریان (ریزش



**Fig. 15** Maximum Average velocity chart in the different Applied voltages and Duty cycles , Free stream velocity is 5 m/s, Carrier frequency is 6 kHz, excitation frequency is 200Hz

شکل 15 نمودار ماکزیمم سرعت متوسط در ولتاژها و سیکل‌های وظیفه مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، فرکانس حامل 6 kHz، فرکانس تحریک 200 Hz

### 3-4- بررسی تاثیر محرک بر رفتار الگوی جریان

به منظور بررسی تاثیر محرک پلازما بر الگوی جریان، پس از روشن کردن محرک، عملکرد آن در زمان‌های مختلف بررسی شد. برای این منظور با نصب محرک بر روی صفحه تخت و روشن کردن آن تغییرات حاصل شده بر روی جریان نمایش داده شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد (مطابق شکل 18)، به محض روشن شدن محرک و شروع تخلیه پلازما، یک نیروی حجمی به میدان سیال اطراف محرک اعمال می‌شود که منجر به تولید جریان القایی باد یونی می‌گردد. این جریان القایی به طرف پایین دست محرک (یعنی به طرف الکتروود پوشیده) حرکت

می‌کند و باعث تشکیل یک جت دیواره، بر روی سطح محرک، به صورت مماس بر دیواره می‌شود. با روشن شدن محرک، یک لایه برشی آزاد، بین دو جریان (1) جت دیواره زیرین و (2) هوای بالای محرک، تشکیل می‌شود که نهایتاً منجر به تولید، رشد و ریزش یک گردابه به طرف پایین دست محرک می‌گردد.

### 5- نتیجه گیری

در این پژوهش متغیرهای موثر بر عملکرد محرک‌های پلاسمایی دی بی دی در حالت تحریک پایا و ناپایا مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مورد بررسی در رابطه با محرک‌های پایا عبارتند از: فرکانس حامل، ولتاژ حامل و سرعت جریان آزاد. به طور کلی مشخص گردید که با افزایش ولتاژ، سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد، البته باید توجه داشت که، افزایش ولتاژ تا حدی قادر به افزایش پیک نمودار سرعت متوسط جریان خواهد بود و با تداوم افزایش ولتاژ، در پیک نمودار سرعت متوسط تغییر چندانی ایجاد نمی‌گردد. همچنین نتایج نشان داد با افزایش فرکانس حامل نیز، پیک نمودار سرعت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش سرعت جریان آزاد، عملکرد محرک پلازما کاسته می‌شود. در بخش بررسی محرک ناپایا، نتایج نشان داد با افزایش مقدار سیکل وظیفه، نمودار سرعت تغییر نموده و سرعت ماکزیمم آن افزایش می‌یابد. این افزایش برای مقادیر سیکل وظیفه بالاتر از 50 درصد بسیار ناچیز است.

همچنین با بررسی تاثیرات مقادیر مختلف فرکانس تحریک و سیکل وظیفه، بر روی عملکرد محرک و همچنین مشخصات کمی و کیفی جریان القایی، مشخص گردید که تغییرات در فرکانس تحریک، تاثیر چندانی بر مقدار ماکزیمم سرعت متوسط ایجاد شده ندارد، ولی با افزایش مقدار سیکل وظیفه، مقادیر مذکور تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابند. به علاوه با افزایش فرکانس تحریک هم‌زمان با افزایش فرکانس ریزش گردابه‌ها از محرک، اندازه و قدرت گردابه‌ها کاهش می‌یابد. این در حالی است که اگر فرکانس تحریک از یک حد مشخصی بالاتر رود جریان القایی در پایین دست محرک، تقریباً مشابه یک جریان پایا می‌شود.

به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از تحریک ناپایا در مقایسه با تحریک پایا، می‌تواند باعث کاهش قابل ملاحظه توان مصرفی الکتریکی محرک شده و همچنین قابلیت تاثیرگذاری بیشتری را بر کنترل جریان توسط محرک داشته باشد. در حقیقت، می‌توان گفت که مزیت اصلی محرک‌های ناپایا، توانایی آن‌ها در تولید جریان‌های القایی پالسی، لایه‌های برشی ناپایا و جریان‌های گردابی می‌باشد که می‌تواند به صورت موثری برای کنترل جریان‌های ناپایا و گردابی و همچنین برای کنترل لایه‌های برشی جدا شده استفاده شود.

### 6- فهرست علائم

$\rho_c$	چگالی بار ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$T_{\text{control}}$	دوره تناوب موج پالس (تحریک ناپایا)
$T$	دما (K)
$u$	سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$\lambda_D$	طول دبای (m)
Re	عدد رینولدز
$f_e$	فرکانس تحریک (Hz)
$P$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )

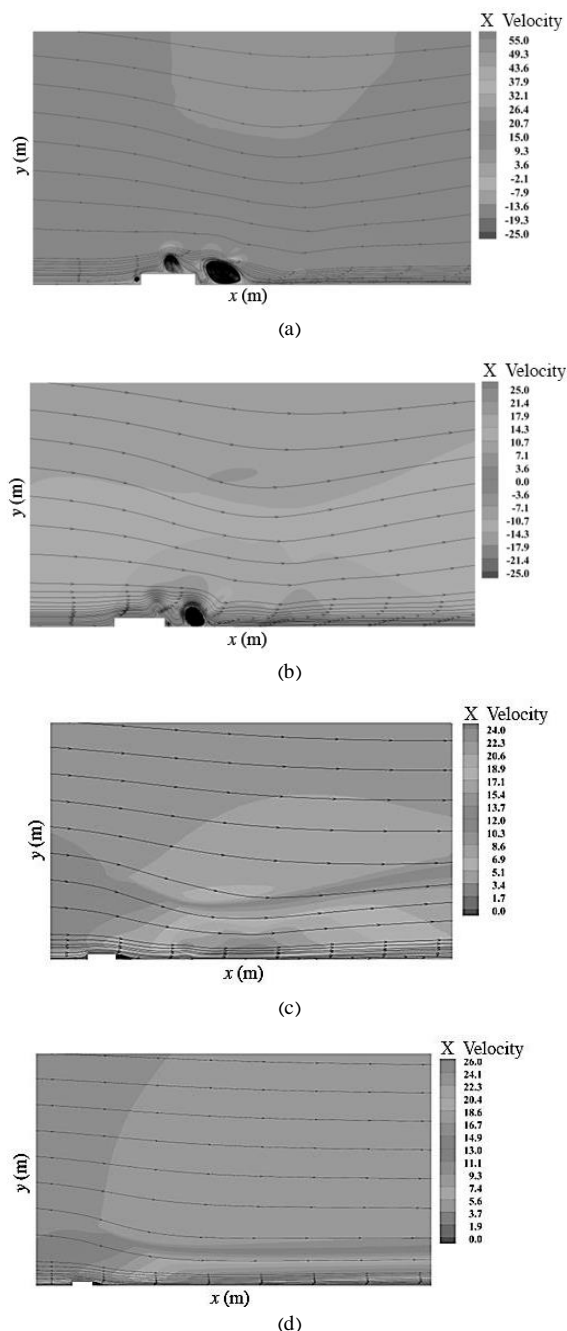


Fig. 18 Contour of flow pattern in the presence of a plasma actuator (a):0.004 s , (b):0.005 s , (c):0.01 s , (d):0.02 s

شکل 18 کانتور الگوی جریان در حضور عملگر پلازما، (الف): 0.004 s، (ب): 0.005 s، (ج): 0.01 s، (د): 0.02 s

- resolved particle image velocimetry investigation, *4th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences*, Seattle, Washington, 23-26 June, 2008.
- [14] M. L. Post, T. C. Corke, Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators, *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 11, pp. 2177-2184, 2004.
- [15] M. L. Post, T. C. Corke, Separation control using plasma actuators: Dynamic stall vortex control on oscillating airfoil, *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 12, pp. 3125-3135, 2006.
- [16] H. Do, W. Kim, M. G. Mungal, M. A. Cappelli, Bluff body flow separation control using surface dielectric barrier discharges, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, 2007.
- [17] J. W. Gregory, Ch. O. Porter, T. E. McLaughlin, Circular cylinder wake control using spatially distributed plasma forcing, *4th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences*, Wahington, 23-26 June, 2008.
- [18] G. I. Font, Boundary layer control with atmospheric plasma discharges, *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 7, pp. 1572-1578, 2006.
- [19] D. M. Schatzman, F. O. Thomas, Turbulent boundary layer separation control with plasma actuators, *4th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences*, Wahington, 23-26 June, 2008.
- [20] C. He, T. C. Corke, M. P. Patel, Plasma flaps and slats: an application of weakly ionized plasma actuators, *Journal of Aircraft*, Vol. 46, No. 3, pp. 864-873, 2009.
- [21] J. Huang, T. C. Corke, F. O. Thomas, Plasma actuators for separation control of low-pressure turbine blades, *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 1, pp. 51-57, 2006.
- [22] D. K. V. Ness, T. C. Corke, S. C. Morris, Turbine tip clearance flow control using plasma actuators, *AIAA Paper*, Vol. 21, pp. 2006, 2006.
- [23] F. O. Thomas, A. Kozlov, T. C. Corke, Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction, *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 8, pp. 1921-1931, 2008.
- [24] C. L. Enloe, T. E. McLaughlin, R. D. Van Dyken, K. D. Kachner, E. J. Jumper, T. C. Corke, Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: Plasma morphology, *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 3, pp. 589-594, 2004.
- [25] G. H. Pouryussefi, *Experimental Investigation of Leading Edge Separation Bubble Control on an Iced Airfoil by Plasma Actuator*, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, K.N.Toosi University, Tehran, 2015. (in Persian فارسی)
- [26] B. L. Owsenek, J. Seyed-Yaghoobi, Theoretical and experimental study of electrohydrodynamic heat transfer enhancement through wire-plate corona discharge, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 119, No. 3, pp. 604-610, 1997.
- [27] D. M. Orlov, T. C. Corke, M. L. Patel, Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings*, Nevada, 9-12 January, 2006.
- [28] D. M. Orlov, *Modeling and Simulation of Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators*, Ph.D. Thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2006.
- [29] G. Font, W. L. Morgan, Plasma discharge in atmospheric pressure oxygen for boundary layer separation control, *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Fluid Dynamics and Co-located Conferences*, Ontario, Canada, 6-9 June, 2005.
- [30] M. Forte, J. Jolibois, F. Moreau, G. Touchard, M. Gazalens, Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity-application to flow control, *Experiments in Fluids*, Vol. 43, No. 6, 2007, PP. 917-928.
- [31] T. C. Corke, M. L. Post, D. M. Orlov, Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: Physics, modeling and applications, *Exp. Fluids*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-26, 2009.
- [32] D. M. Orlov, T. C. Corke, Numerical simulation of aerodynamic plasma actuator effects, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings*, Nevada, 10-13 January, 2005.
- [33] F. O. Thomas, T. C. Corke, M. Iqbal, A. Kozlov, D. Schatzman, Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuator for active aerodynamic flow control, *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 9, pp. 2169-2178, 2009.
- [34] F. O. Thomas, A. Kozlov, T. C. Corke, Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction, *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 8, pp. 1921-1931, 2008.

مدت زمان اعمال سیگنال به محرک  $T_{\text{signal}}$   
ولتاژ (v)  $V$

#### علائم یونانی

پتانسیل الکتریکی  $\phi$   
چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )  $\rho$   
سیکل وظیفه  $\beta$   
لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )  $\mu$   
لزجت سینماتیکی  $\nu$

#### بالانویس‌ها

محرک پلاسمایی تخلیه سد دی الکتریک DBD

#### 7- تقدیر و تشکر

با تشکر از اساتید گرامی جناب آقای دکتر حمید پرهیزکار و جناب آقای دکتر غلامحسین پوریوسفی که در روند انجام پژوهش حاضر نهایت همکاری را با حقیر داشته‌اند.

#### 8- مراجع

- [1] M. Gad-el-Hak, M. Pollard, J. P. Bounnet, *Flow Control: Fundamental and Practices*, pp. 335-467, Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 1998.
- [2] M. P. Patel, T. T. Ng, S. Vasudevan, T. C. Corke, M. Post, T. E. McLaughlin, et al., Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator, *Journal of Aircraft*, Vol. 45, No. 1, pp. 223-236, 2008.
- [3] W. Shyy, B. Jayaraman, A. Andersson, Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics, *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 11, pp. 6434-6443, 2002.
- [4] M. Malik, L. Weinstein, M. Hussani, Ion wind drag reduction, *AIAA 21th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper* 83-0231, Reno, NV, Jan, 1983
- [5] M. Forte, J. Jolibois, F. Moreau, G. Touchard, M. Gazalens, Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity-application to flow control, *Experiments in Fluids*, Vol. 43, No. 6, pp. 917-928, 2007
- [6] K. P. Singh, S. Roy, D. Gaitonde, Study of control parameters for separation mitigation using an asymmetric single dielectric barrier plasma actuator, *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 735-743, 2006.
- [7] G. M. Colver, S. El-Khabyr, Modeling of DC corona discharge along an electrically conductive flat plate with gas flow, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 35, No. 2, pp. 387-394, 1999.
- [8] C. Noger, J. S. Chang, G. Touchard, Active controls of electrohydrodynamically induced secondary flow in corona discharge reactor, *Proc. 2nd Int'l Symp Plasma Techn. Pollution Cont*, Bahia, pp. 136-141, 1997.
- [9] J. R. Roth, D. M. Sherman, S. P. Wilkinson, Electrohydrodynamic flow control with a glow-discharge surface plasma, *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, pp. 1166-1172, 2000.
- [10] S. P. Wilkinson, Investigation of an oscillating surface plasma for turbulent drag reduction, *AIAA Paper*, Vol. 1023, pp. 2003, 2003.
- [11] J. D'Adamo, G. Artana, E. Moreau, G. Touchard, Control of the airflow close to a flat plate with electrohydrodynamic actuators, *ASME 2002 Joint US- European Fluids Engineering Division Conference*, pp. 1339-1344, Montreal, Quebec, Canada, July 14-18, 2002.
- [12] R. Sosa, E. Moreau, G. Touchard, G. Artana, Stall control at high angle of attack with periodically excited EHD actuators, *35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Portland, Oregon, 28 June-1 July, 2004.
- [13] N. Benard, P. Braud, J. Jolibois, E. Moreau, Airflow reattachment along a NACA 0015 airfoil by a surface dielectric barrier discharge actuator—time-