

مطالعه تجربی کنترل ریزش گردابه به وسیله عملگرهای پلاسمایی

سیدآرش سیدشمس طالقانی استادیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران
 عبدالله شادآرام دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین
 طوسی
 مسعود میرزایی دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین
 طوسی

چکیده

هدف این مقاله، کنترل فعال جریان توسط عملگرهای پلاسمایی روی یک ایرفویل به طور تجربی می‌باشد. در این تحقیق از یک عملگر پلاسمایی نوع تخلیه سد دی الکتریکی برای تغییر فرکانس ریزش گردابه و مشخصات آشفتگی جریان حول یک ایرفویل NACA4412 استفاده شده است. هدف از کار حاضر کاهش نویز فلپ‌های کنترلی در هواپیماهای مسافربری از طریق نیروی حجمی تولید شده به وسیله عملگرهای پلاسمایی می‌باشد. نتایج بیان می‌دارند که استفاده از عملگرهای پلاسمایی منجر به یک کاهش قابل توجهی در فرکانس ریزش گردابه اطراف آن فلپ شده است، در حالی که یک افزایش قابل ملاحظه در مقدار توربولانس در یک فاصله دور از عملگر مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی: عملگر پلاسمایی، کنترل فعال، تخلیه سد دی الکتریکی، ریزش گردابه

Experimental Study of Vortex-Shedding Control Using Plasma Actuators

A. Shams Taleghani Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran
 A. Shadaram Associate Professor, Mechanical Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology
 M. Mirzaei Associate Professor, Aerospace Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

The main aim of this paper is to investigate experimentally the active flow control using plasma actuators over an airfoil. The method involved the application of single Dielectric Barrier Discharge (DBD) in order for changing the frequency of vortex-shedding and the turbulence characteristics concerning NACA4412 airfoil. The objective was also to reduce the control flaps noise in transporting aircraft via an effective body force generated by the actuators. The obtained results indicate that the use of plasma actuator led to a significant decrease in frequency of vortex-shedding around the flap whereas significant increase in turbulence levels were achieved at a distance far from the actuator, as well.

Keywords: Plasma actuator, Active control, DBD, Vortex shedding

۱- مقدمه

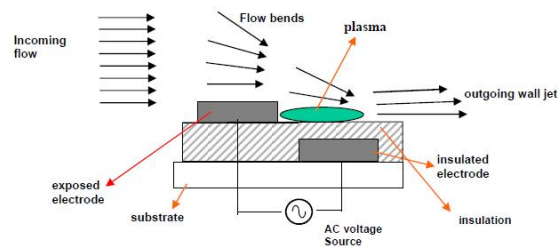
مطالعات انجام شده در زمینه عملگرهای پلاسمایی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: فیزیک تخلیه عملگرهای پلاسمایی، بهینه سازی عملگرهای پلاسمایی و کاربردهای آن. فیزیک تخلیه به طور مستقیم به وسیله مشاهده شدت نور اندازه گیری شده در پلاسمای با ابزار PMT^2 و دیگر مشخصات پلاسمای مانند جریان الکتریکی [۹-۱۰] یا به طور غیر مستقیم با آشکارسازی جریان تحت تاثیر پلاسمای [۱۱] و سایر روش‌ها مانند اندازه گیری سرعت در مجاورت پلاسمای [۱۲-۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. در زمینه بهینه سازی عملگر پلاسمایی می‌توان به مطالعه انجام شده توسط انلو و همکارانش [۷] با بررسی شرایط هندسی مانند ضخامت دی الکتریک و الکترودها اشاره نمود. در این زمینه همچنین می‌توان به کار هوآنگ و همکارانش [۱۵] اشاره نمود که نشان دادند ولتاژ اعمالی به عملگرها در حالت غیر دائمی با عدد استرووال برابر واحد بهترین کارایی را در کنترل جریان روی یک دسته کسکید از پره‌های توربین گاز دارد. همچنین آنها نشان دادند که تولید پلاسمای در جهت منظر در شرایط غیردائمی که سبب افزایش اختلاط می‌شود، موثرتر از عملگر پلاسمایی دائمی است. آنها نشان دادند که عملگر پلاسمایی در حالت غیردائمی توانایی بهتری در حذف حباب روی ایرفویل استفاده شده نسبت به حالت غیردائمی دارد. از موارد کاربردی استفاده شده از عملگرهای پلاسمایی می‌توان به کنترل چرخش در جهت محور یک هواپیمای UAV [۱۶]، حذف گردابه‌های کارمن از یک استوانه [۱۷]، استفاده از عملگر پلاسمایی به عنوان شهپر و وینگلت^۳ [۱۸]، کنترل جدایش روی یک پره توربین فشار پایین [۵]، افزایش لیفت و کاهش درگ [۳]، [۱۹] و [۲۰]، کنترل جریان در فضای بین نوک پره‌های توربین و پوسته [۲۱] و تغییر زاویه واماندگی [۲۲] اشاره نمود.

علی‌رغم کاربردهای مختلف DBD در صنایع، تحقیقات این وسیله به عنوان یک وسیله کنترل جریان هنوز در مراحل اولیه است. مرور جامعی از عملگرهای پلاسمایی به وسیله مورآ [۲۳] انجام شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بیشتر تحقیقات کنترل ریزش گردابه به وسیله عملگر پلاسمایی روی یک استوانه انجام شده است و هیچ نوع گزارشی از کنترل ریزش گردابه روی یک ایرفویل تا به امروز گزارش نشده است.

ریزش گردابه یک پدیده فیزیکی در جریان سیال اطراف جسم می‌باشد و به طور ذاتی ماهیتی غیردائمی دارد. در این نوع جریان، گردابه‌ها به طور تناوبی از جسم جدا می‌شوند. این فرایند باعث یک فشار نوسانی اطراف جسم می‌شود و در نتیجه آن

عملگر پلاسمایی یک وسیله قابل توجه کنترل فعال جریان با کاربردهای مختلف است که به طور نمونه می‌توان به کاربرد آن در صنایع هوافضا اشاره کرد. تخلیه سد دی الکتریکی (DBD)^۱ یک نوع عملگر پلاسمایی است که در مقایسه با دیگر ابزارهای کنترل جریان دارای مزایای سادگی، کمی مصرف انرژی، قیمت پایین، قابلیت اطمینان و کارایی بالا، پاسخ سریع و کاربرد در محیط اتمسفر [۱-۴] می‌باشد. علاوه بر این، این نوع عملگر پلاسمایی می‌تواند تولید جت نزدیک دیواره در جهت‌های منظر یا جهت غالب جریان نماید [۵].

عملگرهای پلاسمایی نوع DBD شامل دو الکتروده هستند که به طور نامتقارن مطابق شکل ۱ قرار می‌گیرند [۶]. یکی از الکترودها در معرض جریان هوا واقع می‌شود در حالی که الکتروده دیگر به وسیله یک لایه ماده دی الکتریک (مثل کاپتون، تفلون و کوارتز) پوشانده می‌شود تا از تشکیل پلاسمای در دو طرف دی الکتریک جلوگیری کند. معمولاً عملگرهای پلاسمایی، بلند و نازک و در فرم نوار یا سیم [۷] می‌باشند. وقتی که یک ولتاژ متناوب بالا (۵ تا ۲۰ کیلو ولت) در یک فرکانسی بین ۵ تا ۲۰ کیلو هرتز به الکترودها اعمال می‌شود هوا روی سطح دی الکتریک در بالای الکتروده پوشیده شده یونیزه می‌شود. هوای یونیزه شده پلاسمای نام دارد و در حضور یک گرادیان میدان الکتریکی تولید یک نیروی حجمی در هوای مجاور می‌کند. این نیروی حجمی تولید یک جت دیواره برای جریان نزدیک سطح به همراه مکش می‌کند [۸]. ولتاژ اعمالی بین الکترودها می‌تواند از نوع AC یا DC باشد. در شرایط فشار اتمسفری، شکست و تخلیه الکتریکی عموماً در میدان الکتریکی کمتری برای ولتاژ اعمالی AC اتفاق می‌افتد. با توجه به نیاز کارکرد وسایل آیرودینامیکی در شرایط فشار اتمسفریک عملگر نوع AC نسبت به DC ترجیح داده می‌شود.



شکل ۱- طرحواره‌ای از عملگر پلاسمایی DBD [۶]

2. Photo multiplier tube

3. Winglet

1. Dielectric barrier discharge

عملکرد آن دارد که روی لیفت و درگ ایرفویل در پروازهای بالزن [۳۹] و کنترل غیردائمی گردابه [۴۰] اثرگذار است. فلپ‌های کنترلی که روی لبه فرار ایرفویل‌ها واقع می‌شوند به عنوان منبع نويز و ناپایداری در آن سیستم محسوب می‌شوند [۴۱]. با تولید گردابه توسط عملگرهای پلاسمایی، جریان اطراف بال و در نتیجه نوسانات آن قابل کنترل است. یکی از جنبه‌های کاربردی این عمل، کنترل فرکانس ریزش گردابه روی لبه فرار بال هواپیما در مواقع نشستن می‌باشد.

با تغییر پارامترهای موثر مانند سرعت جریان آزاد، زاویه حمله و شکل موج، کیفیت پلازما و راندمان عملگر تغییر می‌کند. این مطالعه بر روی فرکانس ریزش گردابه، نقصان سرعت و شدت آشفتگی در دو مد خاموش و روشن عملگرهای پلاسمایی تمرکز دارد. یکی از اهداف اصلی این مقاله نشان دادن توانایی عملگر پلاسمایی در تغییر فرکانس ریزش گردابه و در نتیجه بهبود سرعت دنباله و الگوی جریان می‌باشد.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در این تحقیق، اثرات یک DBD به عنوان یک عملگر پلاسمایی مطالعه شده است. آزمایشات در یک تونل باد زیر صوت با ابعاد محفظه آزمون $0.3m \times 0.3m$ در طول $0.6m$ انجام شده است. تونل قابلیت تغییر سرعت تا $40 m/s$ را دارد و شدت توربولانس جریان ورودی به محفظه آزمون حدود 1% می‌باشد. مدل در بخش مرکزی محفظه آزمون تونل نصب شد و آزمایشات در سرعت جریان آزاد $17 m/s$ انجام شد. مدل مورد آزمایش یک ایرفویل NACA4412 از جنس چوب بود که طول وتر آن $0.1m$ و طول منظر آن $0.3m$ بود. آزمایشات در زاویه حمله 10° انجام شد. شکل ۲ طرحواره‌ای از این ایرفویل به همراه موقعیت دو عملگر پلاسمایی نصب شده روی آن را نشان می‌دهد. برای مطالعه سرعت جریان از سرعت سنجی توسط سیم داغ استفاده شد. سرعت‌های لحظه‌ای و متوسط در راستای غالب جریان به وسیله پراب سیم داغ یک بعدی 55p11 شرکت دانتک^۱ اندازه گیری شد. یک کامپیوتر کار کنترل جابجایی توسط تراورس را با دقت $0.05mm$ به عهده داشت که به پراب امکان جابجا شدن در شبکه مورد نیاز برای داده برداری را می‌داد.

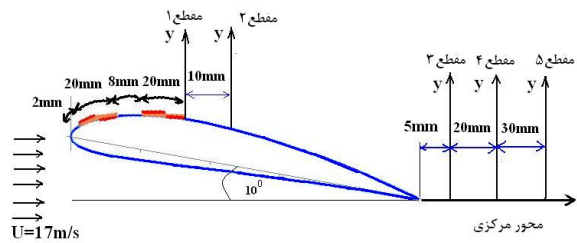
عملگرهای پلاسمایی استفاده شده در اینجا عملگر پلاسمایی با دو المان بودند. پانل المان‌ها روی ایرفویل نصب شد و پلاسمای تولید شده در دو خط موازی برای تغییر فرکانس ریزش گردابه مورد استفاده واقع شد.

ارتعاشات سازه‌ای و نويز تولید می‌شود. اگر فرکانس ریزش گردابه با فرکانس طبیعی آن یکی شود می‌تواند سبب آسیب در سازه شود. وقتی فرکانس ریزش گردابه کاهش پیدا کند، عدد استروهال که نسبت شتاب موضعی به شتاب جابجایی است کاهش می‌یابد [۲۴]. در اثر کاهش عدد استروهال، شتاب موضعی (یعنی $\frac{\partial V}{\partial t}$) در مقایسه با جملات جابجایی کوچکتر می‌شود و در نتیجه جریان به جریان دائمی و شبه دائمی نزدیک می‌شود. طبیعت جریان دائمی روی یک ایرفویل، خط جریانی شدن، کاهش درگ و افزایش لیفت می‌باشد.

فرکانس ریزش گردابه روی پایداری لایه برشی در حال جدا شدن اثر می‌گذارد. در مواردی که ریزش گردابه بهبود پیدا کند، مشاهده می‌شود که گرادیان فشار در ناحیه دنباله و اطراف جسم بهبود می‌یابد و در نتیجه پایداری لایه برشی را به طور ذاتی به همراه دارد [۲۵]. کنترل آن روی استوانه [۲۶] و ایرفویل [۲۷] به وسیله برخی محققین تحقیق شده است. یک کار تحقیقاتی قابل ملاحظه بر مبنای توپولوژی ریزش گردابه روی یک ایرفویل دوبعدی در مرجع [۲۸] انجام شده است. یکی از جنبه‌های کاربردی کنترل ریزش گردابه در توربین‌های بادی [۲۹] می‌باشد و عملکرد توربین‌های بادی وابسته به فرکانس ریزش گردابه است. ریزش گردابه می‌تواند یک منبع مشخصی از نويز برای یک فن در شرایط کارکردی با دور پایین باشد. به طور حتم این در اثر ناپایداری‌های لایه مرزی در سمت مکش آن پره، جایی که ناپایداری‌ها در فرم امواج تولمین-شلیختینگ هستند می‌باشد. این ناپایداری‌ها با لبه فرار پره اندرکنش داشته و تولید امواج آکوستیک [۳۰] می‌کنند. سودرمن [۳۱] اولین کسی بود که از تولیدکننده‌های ورتکس برای کاهش نويز ریزش گردابه ایرفویل استفاده کرد. تأثیر زبری سطح روی فرکانس ریزش گردابه در دنباله یک استوانه به وسیله آچنباچ و همکارانش [۳۲] نیز تحقیق شده است. آنها دریافتند که استوانه‌های با سطوح صاف، دنباله بی قاعده تر و تصادفی تری نسبت به استوانه‌های سطوح زبر دارند. آنها همچنین نشان دادند که عدد استروهال برای دنباله‌های صاف و زبر به ترتیب 0.5 و 0.2 می‌باشد. کاهش، حذف یا کنترل ریزش گردابه انگیزه کارهای تحقیقاتی زیادی در طول چندین دهه [۳۳-۳۸] بوده است. سیساتلی و سیوردینگ [۳۶] روی تعیین فرکانس ریزش گردابه از پره‌های توربوماشین متمرکز شدند و نتایج آنها در سطوح بالای فشار استاتیک، افزایش اتلافات در اثر ریزش گردابه را تأیید می‌کند. برای پیشینه کردن لیفت، تئوری کنترل بهینه روی یک صفحه مسطح دوبعدی برای کنترل ریزش گردابه به وسیله جو و همکارانش [۳۷-۳۸] انجام شده است. فرکانس ریزش گردابه و همچنین ساختار گردابه در دنباله یک ایرفویل اثر مشخصی روی

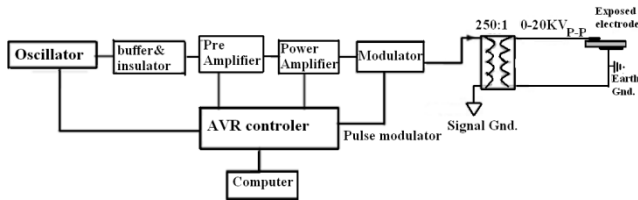
¹ Dantec dynamics

بلوکی از این مدار را نشان می‌دهد. این وسیله قابلیت تولید یکی از موج‌های خروجی سینوسی، مربعی، مثلثی و دندانه اره‌ای و تغییر ولتاژ، فرکانس موج حامل، فرکانس مدولاسیون و مقادیر سیکل کاری را دارد. خروجی این مدار طوری طراحی شده است که محدوده فرکانس موج حامل بین ۱ تا ۳۰ kHz، ولتاژ بین ۱ تا ۲۰ kV، فرکانس تحریک ۱۰ تا ۲۰۰۰ Hz و چرخه کاری بین ۲ تا ۹۷٪ را بدهد. همه این مقادیر به طور مستقل از هم قابل تغییر هستند. در طول این کار، دو نوع موج سینوسی و دندانه اره‌ای در سیکل کاری ۶۰٪، فرکانس تحریک ۱۷۰۰ Hz، ولتاژ 14 kV_{P-P} و فرکانس موج حامل ۲۰ kHz برای تولید یک تخلیه پایدار استفاده شد. این مقادیر با توجه به رنگ و شکل پلاسمای تولید شده انتخاب شدند.



شکل ۲- ایرفویل مورد آزمایش به همراه موقعیت عملگرهای نصب شده و مقاطع داده برداری

هر عملگر DBD شامل دو الکتروود مسی با ضخامت $50\ \mu\text{m}$ بود که با سه لایه فیلم کاپتون^۱ به ضخامت هر لایه $50\ \mu\text{m}$ جدا شده بودند. پهنای الکتروودها ۱۰ mm و طول آنها ۳۰۰ mm بود. کاپتون ولتاژ شکست عایق بالایی در حدود $20\ \text{kV}/\text{mm}$ و یک ثابت دی الکتریک پایین در حدود ۳ دارد که ویژگی‌های الکتریکی خوبی را در مقایسه با دیگر دی الکتریک‌ها فراهم می‌کند. الکتروود در معرض جریان به منبع تغذیه ولتاژ بالا و الکتروود پوشیده شده به زمین متصل شدند. کلیه عملیات عملگرهای پلاسمایی یا به طریقه دستی و یا از طریق کامپیوتر کنترل شدند. وقتی عملگرها فعال شدند، پلازما نزدیک لبه‌های داخلی الکتروودها با کاهش شدت نور به طرف الکتروودهای پوشیده شده تشکیل شد. شکل ۳ عکسی از ایرفویل NACA4412 در داخل تونل باد به همراه پلاسمای تشکیل شده روی آن توسط دو عملگر را نشان می‌دهد.

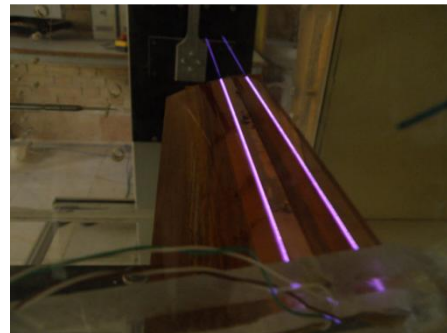


شکل ۴- مدار الکترونیکی استفاده شده برای تولید پلازما

شکل ۵ تولید تحریک غیر دائمی برای شرایط ذکر شده بالا را با استفاده از مدولاسیون یک موج سینوسی نشان می‌دهد. شرحی از سیکل کاری و فرکانس تحریک در این شکل مشخص شده است. شکل موج ولتاژ در حالت دندانه اره‌ای نیز می‌تواند به کار گرفته شود که در مقادیر بیشینه ولتاژ و شرایط فرکانسی یکسان، دو موج با توجه به مساحت زیر نمودار متفاوت، می‌توانند متفاوت عمل کنند. در حالت سینوسی کمی مساحت زیر نمودار که بیانگر مقدار انرژی بیشتر است در مقایسه با حالت دندانه اره‌ای بیشتر است ولی آهنگ تغییرات ولتاژ در حالت دندانه اره‌ای تندتر است.

۳- نتایج

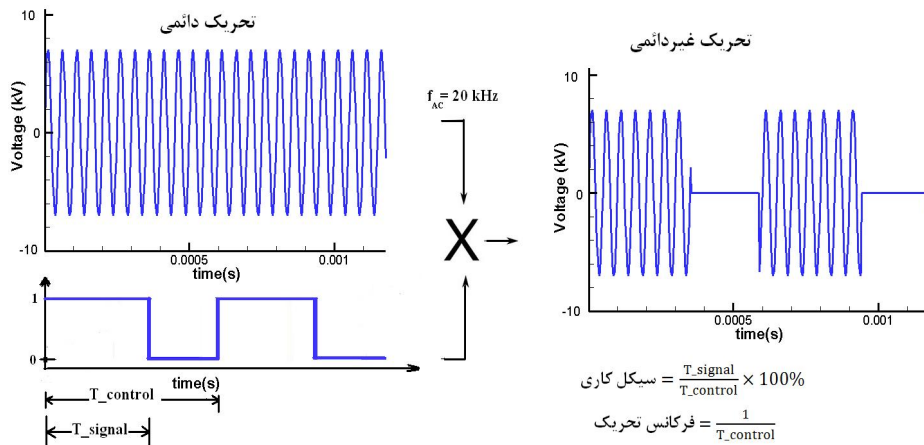
قبل از هر کاری، برای تعیین تاثیر عملگر پلاسمایی روی جریان، پراب سیم داغ در موقعیت ۱ mm بالای سطح ایرفویل روی لبه الکتروود پوشیده شده (مقطع ۱ شکل ۲) قرار داده شد. این نقطه، نزدیکترین نقطه نسبت به پلازما است که در برابر قوس الکتریکی، سوختگی پراب و اثرات نویز ایمن باشد.



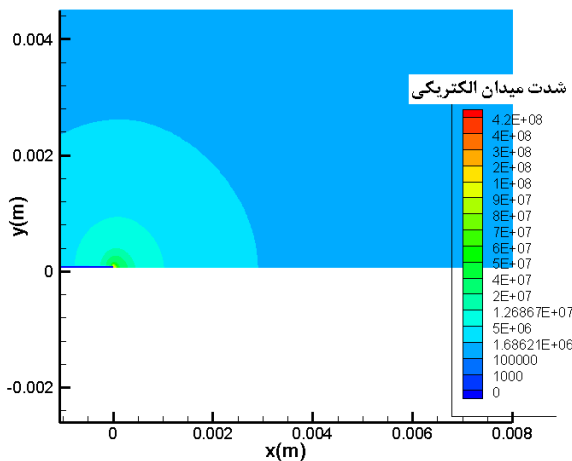
شکل ۳- عکسی از عملگرهای روشن به همراه پلاسمای تشکیل شده روی ایرفویل NACA4412

در این مقاله، ولتاژ AC مورد نیاز برای تولید پلازما به وسیله یک کنترلر با یک مدار طراحی شده مخصوص فراهم شد. این مدار که شامل چندین زیر مدار است، از سه بخش اصلی مشتمل بر یک اسیلاتور، یک آمپلی فایر توان با بهره متغیر و یک ترانسفورماتور ولتاژ بالا تشکیل شده است. شکل ۴ یک دیاگرام

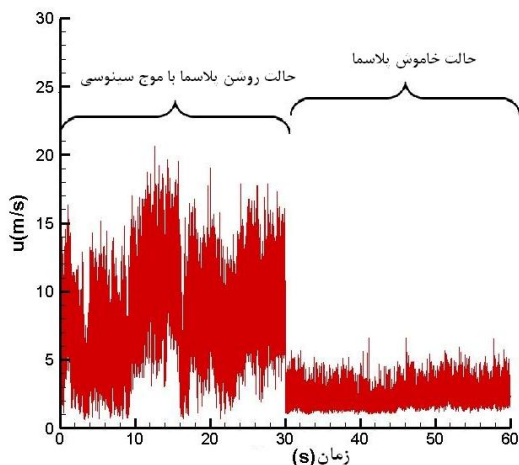
¹ Kapton



شکل ۵- تحریرک دائمی و غیر دائمی و نحوه مدولاسیون



شکل ۶- توزیع شدت میدان الکتریکی اطراف عملگر

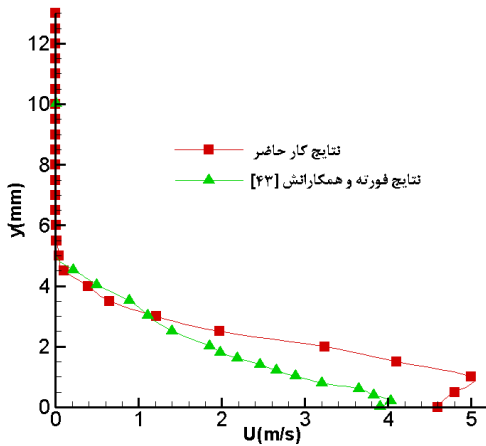


شکل ۷- تاثیر پلاسما با موج ورودی سینوسی روی مولفه سرعت در جهت غالب جریان در مقطع ۱ و ۱mm بالای سطح

بر طبق تصویر ۸، افزایش سرعت در محدوده ۴mm بالای سطح دیده می‌شود. در این ناحیه، افزایش سرعت بین 2.7 m/s و 5.7 m/s است و بیشترین تأثیر در ۱mm بالای سطح اتفاق می‌افتد. علی‌رغم استفاده از عملگرهای پلاسمایی متفاوت،

با توجه به مدل‌سازی‌های عددی انجام گرفته بر مبنای روش ارائه شده در مرجع [۴۲]، شدت میدان الکتریکی با شرایط عملگرهای موجود مدل‌سازی شد. کلیه روابط در این مرجع ارائه شده است. در شکل ۶ نتیجه مدل‌سازی شدت میدان الکتریکی نشان داده شده است. با توجه به این شکل شدت میدان در نواحی خیلی نزدیک شدید است و در نقطه اندازه‌گیری داده‌های ذکر شده تحت میدان الکتریکی ضعیفی می‌باشد. سرعت لحظه‌ای در حدود ۶۰ ثانیه با فرکانس داده برداری ۱kHz در این نقطه اندازه‌گیری و ثبت شد. در طول ۳۰ ثانیه اول داده برداری، عملگرهای پلاسمایی روشن و در طول ۳۰ ثانیه بعد خاموش شدند. در شکل ۷ داده‌های مولفه سرعت در جهت غالب نشان داده شده است. در این شکل مقدار قابل ملاحظه‌ای اختلاف سرعت بین دو مد روشن و خاموش پلاسما مشهود است. سرعت متوسط در حالت‌های روشن و خاموش به ترتیب مقادیر 7.9 m/s و 2.25 m/s می‌باشند. وقتی عملگرهای پلاسمایی روشن شدند، یک تخلیه پلاسما روی سطح عایق ظاهر می‌شود و یک مقدار مومنتوم ناشی از پلاسما به طور مستقیم به هوای اطراف اضافه می‌شود. شیوه‌ای که پلاسما بتواند نیرو را به عملگرها اضافه نماید از طریق اندرکنش میدان الکتریکی با ذرات باردار در پلاسما می‌باشد [۷].

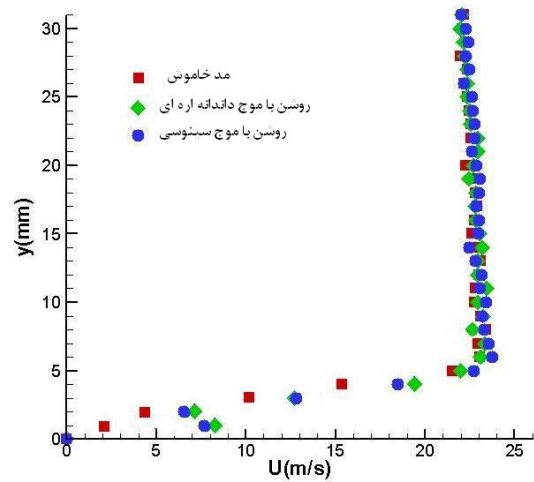
در تصاویر ۸ و ۹ مقادیر سرعت در جهت غالب جریان برای مقاطع ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این نمودارها، مقادیر سرعت برای حالت‌های خاموش، پلاسما با موج سینوسی و پلاسما با موج ولتاژ ورودی دندان‌اره‌ای نشان داده شده است.



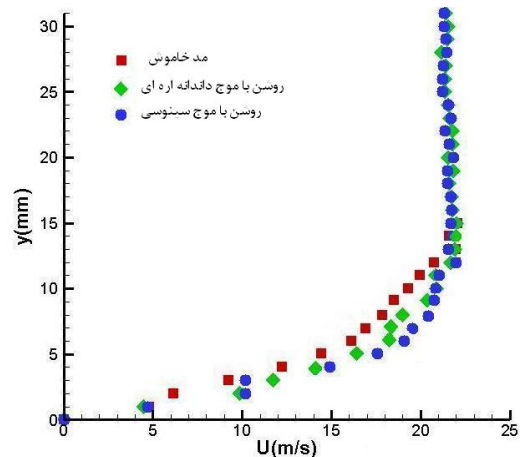
شکل ۱۰- باد یونی تولید شده در محیط بدون جریان آزاد

شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ مقادیر مولفه سرعت غالب در حوزه فرکانس را برای مدهای خاموش پلاسما، روشن با موج دندان‌اره ای و روشن با موج سینوسی نشان می‌دهد. این انتقال سرعت لحظه‌ای به حوزه فرکانس به وسیله انتقال فوریه سریع (FFT) انجام می‌شود. این نمودارها در نقاط ۶mm بالای سطح در مقاطع ۱ و ۲ ارائه شده است. در این نمودارها این نکته قابل توجه است که مقادیر فرکانس غالب در همه مقاطع اندازه گیری شده مقادیر یکسانی را در هر حالت دارد و به همین علت مقادیر آنالیز فرکانسی برای نقاط دیگر ارائه نشده است. مقادیر فرکانس غالب در این تصاویر مقادیر فرکانس ریزش گردابه را نشان می‌دهد که در حالت خاموش ۳۲۵Hz، حالت روشن با موج سینوسی ۲۳۵Hz و در حالت روشن با موج دندان‌اره ای مقادیر ۲۲۲Hz و ۲۵۰Hz را نشان می‌دهد. بر طبق تصاویر ۱۲ و ۱۳ قدرت فرکانس غالب تولید شده به وسیله پلاسما بیشتر از حالتی است که پلاسما خاموش است. بر طبق تحقیق انجام شده توسط کورک و همکارانش [۱۳]، عملگر پلاسمایی تولید یک گردابه می‌کند که به طور طرحواره در شکل ۱۴ نشان داده شده است. علاوه بر آن، یک طرحواره‌ای از حباب تشکیل شده روی سطح به خوبی در این تصویر دیده می‌شود. اندرکنش بین ورتکس تولید شده به وسیله عملگر پلاسمایی و ورتکس در ناحیه حباب که مخالف جهت چرخش هم هستند، در کاهش مقدار فرکانس ریزش گردابه حول ایرفویل موثر هستند که نتایج ما هم این مطلب را تأیید می‌کند. انتظار می‌رود که اگر به طریقی (به طور نمونه با عوض کردن جهت عملگر) جهت ورتکس تولید شده عوض شود، فرکانس غالب در مقایسه با حالت قبل افزایش یابد.

مقدار بیشینه سرعت افزایش یافته و ارتفاع ناحیه تحت تأثیر به وسیله پلاسما تقریباً با نتایج فورته و همکارانش [۴۳] همخوانی دارد. برای مقایسه نتایج حاضر و نتایج فورته و همکارانش [۴۳]، نیمرخ سرعت باد یونی تولید شده در شرایط بدون جریان آزاد در مقطع با ۱۰mm فاصله از مرکز عملگرها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشابه با تصویر ۸، اثر افزایش سرعت به وسیله عملگرهای پلاسمایی در شکل ۹ نیز مشهود است. با این تفاوت که بیشینه افزایش سرعت از ۵۷m/s به ۴m/s کاهش می‌یابد ولی یک ناحیه پهن‌تر را تحت تأثیر قرار می‌دهد (از ۲mm به ۱۲mm افزایش می‌یابد).

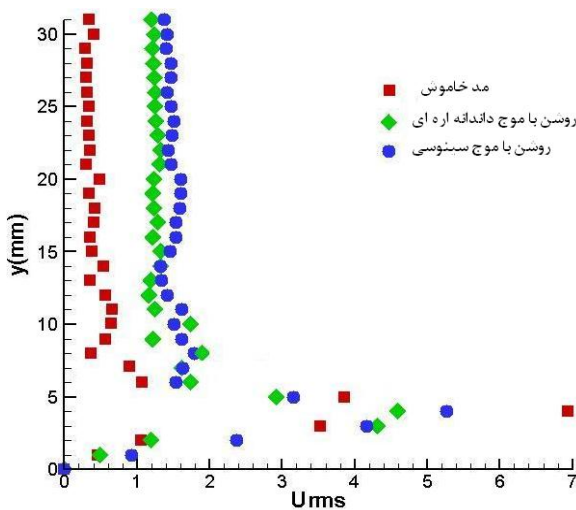


شکل ۸- مولفه سرعت در جهت غالب جریان در مقطع ۱ در حالت‌های روشن پلاسما و خاموش

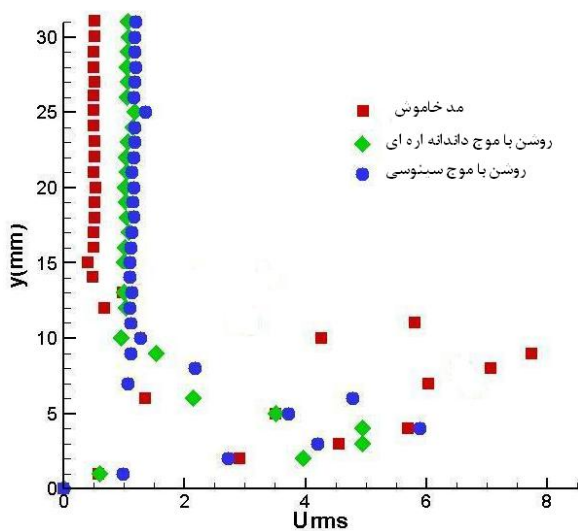


شکل ۹- مولفه سرعت در جهت غالب جریان در مقطع ۲ در حالت‌های روشن پلاسما و خاموش

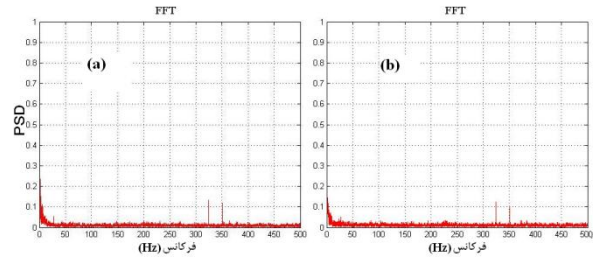
تا حدود ۳۱mm بالای دیواره که اندازه‌گیری انجام شده است، مقدار ثابتی را نشان می‌دهد. با دور شدن از الکتروود پوشیده شده در مقطع ۱، اثر عملگرهای پلاسمایی روی جریان سیال کاهش می‌یابد. اغتشاش‌های ایجاد شده نزدیک سطح، با حرکت الکترون‌ها و یون‌ها در لبه پلاسمای جایی که سرعت القایی به وسیله عملگرهای پلاسمایی با جریان برگشتی مواجه می‌شود مقدارش کاهش می‌یابد. در نتیجه، مقدار U_{rms} در ناحیه نزدیک سطح کاهش می‌یابد. شدت آشفتگی و مقدار U_{rms} در بالای سطح جایی که باد یونی القایی به وسیله عملگرهای پلاسمایی و جریان هوا اطراف ایرفویل هم جهت می‌شوند، کمی افزایش می‌یابد.



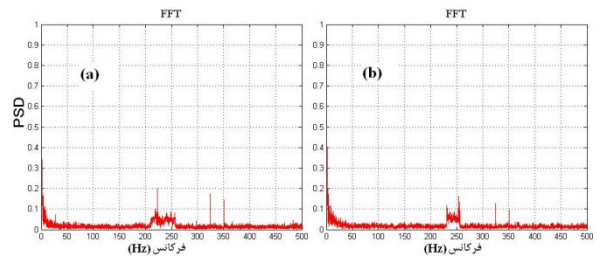
شکل ۱۵- ریشه میانگین مربع سرعت در جهت غالب در حالت‌های تحریک پلاسمای با دو موج سینوسی و دندانه اره‌ای و حالت خاموش در مقطع ۱



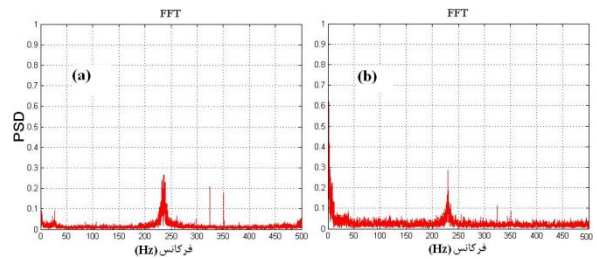
شکل ۱۶- ریشه میانگین مربع سرعت در جهت غالب در حالت‌های تحریک پلاسمای با دو موج سینوسی و دندانه اره‌ای و حالت خاموش در مقطع ۲



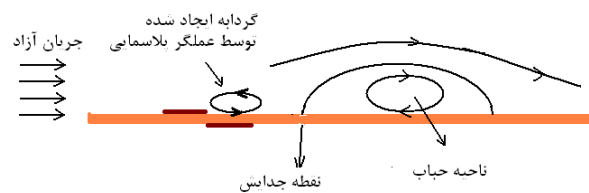
شکل ۱۱- طیف فرکانسی سرعت در جهت غالب جریان (a) در مقطع ۱ و (b) در مقطع ۲ در ۶mm بالای سطح ایرفویل در حالت خاموش عملگرها



شکل ۱۲- طیف فرکانسی سرعت در جهت غالب جریان (a) در مقطع ۱ و (b) در مقطع ۲ در ۶mm بالای سطح ایرفویل با حالت روشن با موج دندانه اره‌ای



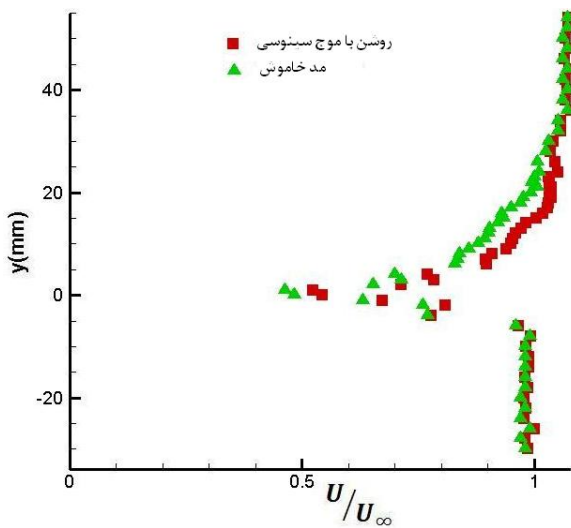
شکل ۱۳- طیف فرکانسی سرعت در جهت غالب جریان (a) در مقطع ۱ و (b) در مقطع ۲ در ۶mm بالای سطح ایرفویل با حالت روشن با موج سینوسی



شکل ۱۴- طرح‌های از ورتکس تولید شده به وسیله عملگر پلاسمایی نزدیک یک ناحیه حباب

ریشه میانگین مربع سرعت در جهت غالب (U_{rms}) در مقاطع ۱ و ۲ در تصاویر ۱۵ و ۱۶ ارائه می‌شود. تعداد داده‌ها برای محاسبه U_{rms} در اینجا ۱۲۰۰۰ می‌باشد. همانطور که در این نمودارها مشخص است، مقدار بیشینه U_{rms} با تولید پلاسمای کاهش یافته است. اما یک مقدار بالاتر از سطح ایرفویل، پلاسمای باعث شده که U_{rms} افزایش یابد. افزایش U_{rms}

ایرفویل هست. مقدار افزایش سرعت در نقطه بیشینه حدود 57 m/s است.



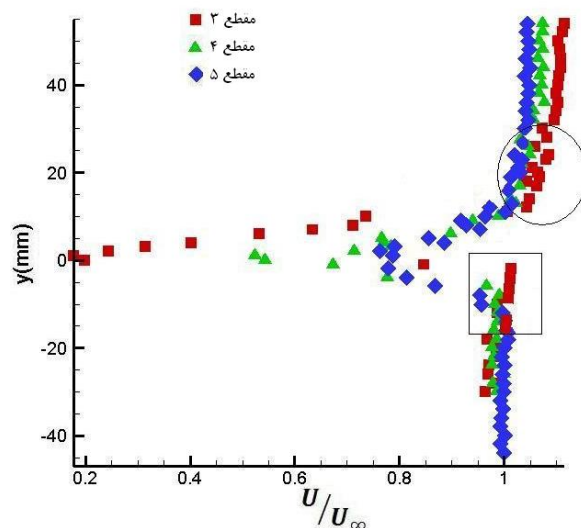
شکل ۱۸- نیمرخ‌های سرعت در جهت غالب جریان برای مقایسه دو حالت تحریک با پلازما و حالت خاموش در مقطع ۴

با توجه به کاهش در مقدار فرکانس ریزش گردابه، این نتیجه حاصل می‌شود که عملگرهای پلاسمایی توانایی تغییر این فرکانس را داشته‌اند. علاوه بر این عملگرها قدرت گردابه‌ها را نیز افزایش داده‌اند. ریشه میانگین مربع سرعت به وسیله تحریک پلازما در نواحی چند میلیمتر دورتر از سطح جایی که اثر دیواره ناچیز است، افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر عملگرهای پلاسمایی مقدار انرژی آشفتگی در خارج از ناحیه پلازما را افزایش داده‌اند. همچنین باد یونی تولید شده به وسیله عملگرهای پلاسمایی باعث کاهش عرض دنباله شده است. با توجه به رفتار متفاوت ریشه میانگین مربع سرعت در نزدیک دیواره، یک ابزار سرعت سنج غیر تداخلی برای بررسی جزئیات بیشتر لازم خواهد بود. با توجه به نتایج این‌گونه به نظر می‌رسد که عملگرهای پلاسمایی در هر ناحیه زیر لایه، لگاریتمی و ناحیه خارجی رفتار متفاوتی دارند.

مراجع

- [1] Sosa, R., Artana, G. "Steady control of laminar separation over airfoils with plasma sheet actuators", Journal of Electrostatics, Vol. 64, pp. 604 – 610, 2006.
- [2] Moreau, E., Louste, C., Touchard, G. "Electric wind induced by sliding discharge in air at atmospheric pressure", Journal of Electrostatics, Vol. 66, pp.107–114, 2008.
- [3] Corke, T. C., Post, M. L., Orlov, D. M. "SDBD plasma enhanced aerodynamics: concepts,

شکل ۱۷ نیمرخ‌های سرعت بی بعد در مقاطع ۳، ۴ و ۵ در ناحیه دنباله نزدیک در حالت اعمال پلازما با موج سینوسی را نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه علامت‌گذاری شده به وسیله دایره نشان می‌دهد که لبه دنباله در فاصله y ثابت از محور مرکزی با تحریک پلازما ثابت مانده است. از طرف دیگر ناحیه علامت‌گذاری شده با مربع در ناحیه بدون تاثیر پلازما واقع شده است که ضخامت دنباله در آن تغییر می‌کند. برای آنالیز بیشتر، نیمرخ‌های سرعت در مقطع ۴ برای عملگر پلاسمایی در شرایط روشن و خاموش در شکل ۱۸ با هم مقایسه شده‌اند. بر طبق این شکل، افزایش سرعت در ناحیه دنباله نزدیک با استفاده از القای عملگر پلاسمایی مشهود است. همچنین کاهش ضخامت دنباله بالای محور مرکزی در وسط منظر به خوبی دیده می‌شود. چنین نتیجه‌ای نیز روی یک ایرفویل NACA0015 در رینولدز پایین‌تر به وسیله پست و کورک [۱۹] مشاهده شده است.



شکل ۱۷- نیمرخ‌های سرعت در جهت غالب جریان برای حالت تحریک با پلازما در مقاطع ۳، ۴ و ۵

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر نشان داده شد که باد یونی تولید شده توسط عملگرهای پلاسمایی توانایی کنترل ریزش گردابه را دارد. این تحقیق کاربرد جدیدی از عملگرهای پلاسمایی در کنترل فرکانس ریزش گردابه از روی یک ایرفویل را دنبال می‌کند. در این مطالعه مشخصات آشفتگی و آنالیز فرکانسی گردابه‌های اطراف ایرفویل در حضور عملگرهای پلاسمایی که تا به حال گزارش نشده بود بررسی شد. در مقایسه با کارهای مشابه موجود این کار در محدوده رینولدز بالاتر انجام شده است. نتایج بیانگر افزایش سرعت در ناحیه 4 mm بالای سطح دیواره

- [16] Nelson, R., Corke, T. C., Patel, M. P., Ng, T. T. "Modification of the flow structure over a UAV wing for roll control", AIAA Paper 2007-0884.
- [17] Thomas, F. O., Kozlov, A., Corke, T. C. "Plasma Actuators for Bluff Body Flow Control", AIAA Paper 2006-2845.
- [18] Ramakumar, K., Jacob, J. "Flow Control and Lift Enhancement Using Plasma Actuators", AIAA Paper 2005-4635.
- [19] Post, M. L., Corke, T. C. "Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators", AIAA J., Vol. 42, pp. 2177-2184, 2004.
- [20] Benard, N., Jolibois, J., Moreau, E. "Lift and drag performances of an axisymmetric airfoil controlled by plasma actuator", Journal of Electrostatics, Vol. 67, pp. 133-139, 2009.
- [21] Van Ness, D. K., Corke, T. C., Morris, S. C. "Turbine Tip Clearance Flow Control using Plasma Actuators", AIAA Paper 2006-0021.
- [22] Patel, M. P., Sowle, Z. H., Corke, T. C., He, C. "Autonomous sensing and control of wing stall using a smart plasma slat", AIAA Paper 2006-1207.
- [23] Moreau, E. "Airflow control by non-thermal plasma actuators", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 40, pp. 605-636, 2007.
- [24] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H. "Fundamentals of Fluid Mechanics", John Wiley & Sons, 2002.
- [25] Mittal, S., Raghuvanshi, A. "Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers", International Journal For Numerical Methods In Fluids, Vol. 35, pp. 421-447, 2001.
- [26] Ffowcs Williams, J. E., Zhao, B. C. "The active control of vortex shedding", Journal of Fluids and Structures, Vol. 3, Issue 2, pp. 115-122, March 1989.
- [27] T. Colonius, D.R. Williams, "Control of vortex shedding on two and three-dimensional airfoils", Phil. Trans. R. Soc. A, Vol. 369, No. 1940, pp. 1525-1539; 2011.
- [28] Lipinski, D., Cardwell, B., Mohseni, K., "A Lagrangian analysis of a two-dimensional airfoil with vortex shedding", J. Phys. A: Math. Theor., Vol. 41, 2008.
- [29] Medici, D. "Wind Turbine Wakes - Control and Vortex Shedding", Technical Reports from KTH Mechanics, Royal Institute of Technology, S-100 44 Stockholm, March 2004.
- [30] Longhouse, R. E. "Vortex shedding noise of low tip speed, axial flow fans, Journal of sound and vibration", Vol. 53, No.1, pp. 25-46, 1977.
- [31] Soderman, P. T. "Leading-edge serration which reduce the noise of low-speed rotors", NASA TN D-7371, 1973.
- [32] Achenbach, E., Heinecke, E. "On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the optimization and applications", J. Progress in Aerospace Sciences, Vol. 43, pp. 193-217, 2007.
- [4] Patel, M. P., Ng, T. T., Vasudevan, S., Corke, T. C., Post, M. L., Mclaughlin, T. E., Suchomel, C. F. "Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator", Journal of aircraft, Vol. 45, pp. 223-236, 2008.
- [5] Huang, J. "Separation Control over low pressure turbine blades using plasma actuators", PhD thesis, University of Notre Dame, 2005.
- [6] Jayaraman, B., Shyy, W. "Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer", J. Progress in Aerospace Sciences, Vol. 44, pp. 139 - 191, 2008.
- [7] Enloe, C. L., Mclaughlin, T. E., Van Dyken, R. D., Kachner, K. D., Jumper, E. J., Corke, T. C., Post, M. L., Haddad, O. "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: geometric effects", AIAA J., Vol. 42, pp. 595-604, 2004.
- [8] Grundmann, S., Tropea, C. "Experimental damping of boundary-layer oscillations using DBD plasma actuators", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 30, Issue 3, pp. 394-402, 2009.
- [9] Enloe, C. L., Mclaughlin, T. E., Van Dyken, R. D., Kachner, K. D., Jumper, E. J., Corke, T. C., "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: plasma morphology", AIAA J., Vol. 42, pp. 589-594, 2004.
- [10] Dong, B., Bauchire, J. M., Pouvesle, J. M., Magnier, P., Hong, D. "Experimental study of a DBD surface discharge for the active control of subsonic airflow", J. Phys. D: Applied Physics, Vol. 41, 2008.
- [11] Juckes, T. N., Choi, K. S "Flow control around a circular cylinder using pulsed dielectric barrier discharge surface plasma", Physics of fluids, Vol. 21, 2009.
- [12] Porter, C. O., Baughn, J. W., Mclaughlin, T. E., Enloe, C. L., Font, G. I. "Plasma actuator force measurements", AIAA J., Vol. 45, pp. 1562-1570, 2007.
- [13] Corke, T. C., Post, M. L., Orlov, D. M. "Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications", J. Exp. Fluids, Vol. 46, pp. 1-26, 2009.
- [14] Jolibois, J., Forte, M., Moreau, E. "Application of an AC barrier discharge actuator to control airflow separation above a NACA 0015 airfoil: Optimization of the actuation location along the chord", Journal of Electrostatics, Vol. 66, pp. 496-503, 2008.
- [15] Huang, J., Corke, T. C., Thomas, F. O. "Unsteady plasma actuators for separation control of low pressure turbine blades", AIAA J., Vol. 44, pp. 1477-1487, 2006.

- range of Reynolds numbers 6.103 to 5.105", J. Fluid Mech., Vol. 109, pp. 239-251, 1981.
- [33] Bourgoyne, D. A., Ceccio, S. L., Dowling, D. R. "Vortex shedding from a hydrofoil at high Reynolds number", J. Fluid Mech., Vol. 531, pp. 293-324, 2005.
- [34] Strykowski, P. J., Sreenivasan, K. R. "On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers", J. Fluid Mech., Vol. 218, pp. 71-107, 1990.
- [35] Iollo, A., Zannetti, L. "Optimal Vortex Shedding Control", European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona, 11-14 September 2000.
- [36] Cicutelli, G., Sieverding, C. H. "The effect of vortex shedding on the unsteady pressure distribution around the trailing edge of a turbine blade", ASME Paper, 96-GT-39, 1996.
- [37] Joe, W. T., Colonius, T., MacMynowski, D. G. "Optimized Control of Vortex Shedding from an Inclined Flat Plate", AIAA2009-4027.
- [38] Joe, W. T., Taira, K., Colonius, T., MacMynowski, D. G., Tadmor, G. "Closed-Loop Control of Vortex Shedding on a Two-Dimensional Flat-Plate Airfoil at a Low Reynolds Number", AIAA 2008-634.
- [39] Wang, J. "Vortex shedding and frequency selection in flapping flight", J. Fluid Mech., Vol. 410, pp. 323-341, 2000.
- [40] Wu, J. Z., Lu, X. Y., Wu, J. M. "Post-stall flow control on an airfoil by local unsteady forcing", J. Fluid Mech., Vol. 371, pp. 21-58, 1998.
- [41] Mau, K., Grunewald, M., Reichenberger, J., Borchers, I., Drobiez, R. "Aerodynamic Flap Of An Aircraft Having A Device Which Influences The Flap Vortex", US Patent Application 20090084905, Published on April 2, 2009.
- [۴۲] شادآرام، عبدالله، سید شمس طالقانی، سید آرش، تغییر فرکانس ریزش گردابه یک سیلندر با مقطع چهارگوش به وسیله عملگر پلاسمایی، هجدهمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، ISME2010-1255، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۹.
- [43] Forte, M., Jolibois, J., Pons, J., Moreau, E., Touchard, G., Cazalens, M. "Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control", Exp Fluids, Vol. 43, pp. 917-928, 2007.