

بررسی تجربی هندسه‌های مختلف مولدهای پلاسمایی جریان گردابه‌ای در کنترل جریان تراکم‌پذیر

علیرضا غیور^۱، محمود مانی^۲، محمد سعیدی^۳

۱ دانشجوی دکترای هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲ استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، mani@aut.ac.ir

۳ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۴

چکیده

توانایی چهار هندسه‌ی مختلف مولد پلاسمایی جریان گردابه‌ای (شانه‌ای، T شکل، دندان‌اره‌ای ساده و دندان‌اره‌ای مشبک) در کنترل جریان تراکم‌پذیر به طور تجربی در ولتاژ و فرکانس‌های عملکردی مختلف بر روی یک ایرفویل فوق بحرانی بررسی و موارد استفاده از هر کدام توصیه شده است. از تجزیه و تحلیل نمودار چگالی طیفی توان^۱ مربوط به نوسانات فشار در لایه مرزی برای تعیین فرکانس‌های تحریک ناپایای عملگرهای پلاسمایی استفاده و مشخص شد وجود فرکانس غالب در نمودارهای چگالی طیفی توان نشانه‌ی بارزی بر وجود جدایی جریان در آن منطقه از ایرفویل می‌باشد. در آزمایش‌ها مشاهده شد که در هنگام عملکرد پالسی عملگرهای پلاسمایی با هندسه شانه‌ای، در جلوی عملگر حباب جدایی ایجاد می‌شود که استفاده از هندسه‌ی T شکل، اندازه حباب جدایی را کاهش می‌دهد. بر اساس نتیجه‌ی آزمایش‌ها، عملگرهای پلاسمایی T شکل و دندان‌اره‌ای مشبک با عملکرد پالسی، در قیاس با هندسه‌های شانه‌ای و دندان‌اره‌ای ساده در شرایط یکسان کارایی بیشتری در کنترل جریان تراکم‌پذیر دارند.

واژگان کلیدی

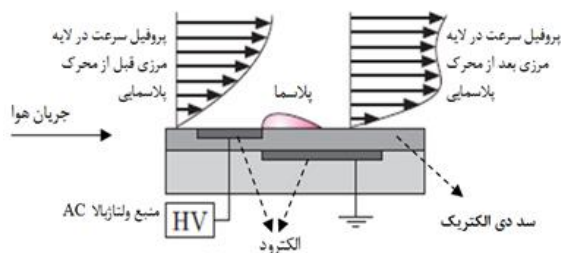
عملگر پلاسمایی، کنترل جریان، فرکانس تحریک ناپایا، مولد جریان گردابه‌ای.

۱. مقدمه

اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هواپیماهای تجاری معمولاً از بال‌های فوق بحرانی برای افزایش کارایی خود در هر دو رژیم جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر استفاده می‌کنند. جدایی لایه مرزی در رژیم تراکم‌پذیر در زوایای کمتری در مقایسه با رژیم تراکم‌ناپذیر رخ می‌دهد. این به دلیل کاهش قدرت پیک مکش و متعاقب آن واماندگی لبه‌ی حمله بواسطه گردابه‌ی واماندگی

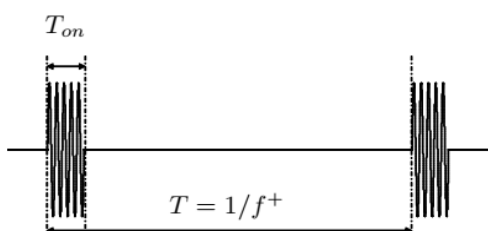
جدایی لایه مرزی یک مشکل متداول و اساسی است که تقریباً برای هر جسم پرنده در کلیه رژیم‌های جریان رخ می‌دهد و می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد و کنترل پرواز تأثیر بگذارد. این موضوع باعث می‌شود مبحث کنترل جریان برای طراحان هواپیما و متخصصان آیرودینامیک بسیار مهم باشد به خصوص در زمینه حمل و نقل هوایی تجاری که در آن ایمنی پرواز و اقتصاد از

روی یک صفحه تخت در شرایط سکون اندازه‌گیری کردند. آنها مشاهده کردند که در تولید پلاسما هر چه فرکانس جریان متناوب پایین‌تر، ثابت دی الکتریک کمتر، و ماده دی الکتریک ضخیم‌تر باشد می‌توان بدون شکل‌گیری رشته رشته‌ای پلاسما و ایجاد پلاسمای یکنواخت، باعث افزایش بیشینه نیروی بدنی و در نتیجه اشباع نیروی بدنی توسط عملگرهای پلاسمایی شد.



شکل ۱. شیوه‌ی اثر عملگر پلاسمایی بر جریان داخل لایه مرزی

جیمن و همکاران [۳] رابطه بین توان مصرفی عملگر پلاسمایی و ولتاژ و فرکانس حامل را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که رابطه‌ی توان مصرفی عملگر پلاسمایی با فرکانس حامل بصورت خطی می‌باشد (منظور از فرکانس حامل فرکانس خروجی منبع تغذیه است که باعث تشکیل پلاسما می‌شود). بینگ هونگ و همکاران [۴] به طور تجربی اثرات ولتاژ تخلیه پلاسما را در کنترل جدایی جریان مطالعه کردند. آنها دریافتند که یک ولتاژ آستانه برای تحریک و اثرگذاری آیرودینامیکی پلاسما بر روی جریان وجود دارد و مشاهده کردند که اگر ولتاژ تشکیل پلاسما کمتر از ولتاژ آستانه باشد، پلاسمای تولید شده نمی‌تواند در کنترل جدایی جریان تأثیرگذار باشد. علاوه بر این، آنها خاطرنشان کردند که شدت فعال سازی اولیه‌ی پلاسما، نقش مهمی در کنترل جریان دارد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که بعد از کنترل جدایی جریان، با افزایش مقدار ولتاژ پلاسما نیروهای برآ و پسا بدون تغییر باقی می‌مانند و تحت تأثیر این افزایش قرار نمی‌گیرند.



شکل ۲. سیکل کاری ناپایا

دینامیک^۲ است که در زوایای حمله بسیار پایین‌تر اتفاق می‌افتد برخلاف آنچه در واماندگی لبه‌ی فرار در جریان تراکم‌ناپذیر رخ می‌دهد [۱]. در چنین شرایطی، کنترل جریان و تأخیر در جدایی لبه حمله از اهمیت حیاتی برخوردار است. به طور کلی، روش‌های کنترل جریان را می‌توان به الف) اختلاط لایه مرزی با جریان آزاد، ب) کنترل لایه مرزی با روش‌های متداول دمش/مکش و ج) تحریک متناوب جریان که می‌تواند مبتنی بر عوامل آکوستیکی، هیدرودینامیکی، مکانیکی و الکترومغناطیس باشد، طبقه‌بندی کرد. تحریک جریان با ایجاد پلاسما، به عنوان یک روش تحریک الکترو/هیدرودینامیکی، یک روش بسیار کارآمد برای کنترل فعال جریان برای افزایش زاویه حمله واماندگی است. عملگر پلاسمایی با سرعت عمل و تواتر بسیار بالا مومنتوم را به لایه مرزی تزریق می‌کند و می‌تواند به عنوان یک کنترل کننده فعال، دقیق‌تر و بسیار سریع‌تر از سایر روش‌ها جدایی لایه مرزی را کنترل کند.

عملگرهای پلاسمایی، از پتانسیل‌های قابل توجهی برای کاربردهای هوافضایی برخوردار هستند و یک مکانیزم ساده، مقرون به صرفه (با مصرف انرژی کم و بدون برخورداری از المان‌ها و مکانیزم‌های پیچیده و متحرک) و همچنین یک مکانیزم با عملکرد به هنگام هستند که به منظور کنترل جریان (جلوگیری و یا تأخیر در جدایی جریان)، مومنتوم و انرژی به لایه مرزی انتقال می‌دهند. با وجود همه مزایای فوق یکی از اساسی‌ترین معایبشان نوظهور بودن آنها و عدم تحقیقات کامل در برخی حوزه‌های مربوطه و همچنین عدم توسعه سطح آمادگی فناوری^۳ آنها در قیاس با عملگرهای متداول می‌باشد. یکی دیگر از نقاط ضعف آنها (مخصوصاً در پلاسمای سرد) محدودیت آنها در تولید و تزریق سرعت به داخل لایه مرزی می‌باشد به گونه‌ای که در حال حاضر حداکثر سرعت ادعا شده‌ای که توسط عملگرهای پلاسمای سرد تولید شده از ۱۰ متر بر ثانیه تجاوز نکرده است. نحوه‌ی عملکرد عملگرهای پلاسمایی و ایجاد پلاسما عبارتست از یک تخلیه‌ی الکتریکی بین دو الکترود که توسط یک سد دی-الکتریک از هم جدا شده‌اند (شکل ۱). تخلیه الکتریکی در اثر اعمال یک اختلاف ولتاژ مناسب از نوع غیر مستقیم^۴ یا متناوب^۵ ایجاد می‌شود که در اصل به یک تخلیه نامرئی و بیصدا معروف است. توماس و همکاران [۲] با استفاده از مواد دی الکتریک متفاوت، ولتاژهای ورودی، فرکانس‌ها و الکترودهای با هندسه‌ی متفاوت، نیروی بدنی تولید شده توسط یک عملگر پلاسمایی را بر

ثانیه می‌شود. برنت و همکاران [۱۴] ثابت کردند که الکترو دندانه اره‌ای نسبت به الکترو نواری نیاز به ولتاژ کمتری برای شروع تخلیه و تزریق مومنتوم به لایه مرزی دارد. با این حال، ناحیه‌ی اثر و توان مصرفی الکترودهای دندانه اره‌ای بیشتر است. ژیفنگ و همکاران [۱۵] به روش تجربی میدان جریان ناشی از ایجاد پلازما با عملگر دندانه اره‌ای را در شرایط هوای ساکن بررسی کرده‌اند. مولد پلاسمایی جت مصنوعی هندسه‌ی دیگریست که ژانگ و همکاران [۱۶] به روش عددی جریان گردابه‌ای حلقوی ناشی از آنها را در شرایط هوای ساکن روی یک صفحه‌ی مسطح بر اساس معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز ناویر-استوکس^۸ بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که افزایش فرکانس تحریک ناپایا به ۶۰ هرتز و بالاتر، باعث کاهش فاصله بین جفت گردابه مجاور می‌شود. بنابراین، میدان جریان به شرایط عملکردی در حالت پایا شباهت بیشتری پیدا می‌کند. سانتاناکریشن [۱۷] جریان ایجاد شده توسط هندسه‌ی مولد پلاسمایی جت مصنوعی و تأثیر آن در کنترل جریان را مورد مطالعه قرار داد. وی رابطه بین شدت پلازما، حداکثر سرعت و میزان وسعت جریان جت مصنوعی پلازما را بررسی کرد و در سرعت پایین جریان آزاد اثر جت پلاسمای مصنوعی را در کاهش سرعت دنباله‌ی جریان در پشت سیلندر استوانه‌ای در عملکرد پایا و ناپایا (پالسی) مورد بررسی قرار داد. هندسه دندانه اره‌ای مشبک نیز ترکیبی از دندانه اره‌ای ساده و جت مصنوعی پلازما است که جانه سان و همکاران [۱۸] به طور تجربی نیروی بدنی، نیروی مکش و توان مصرفی را در هوای ساکن در مقایسه با عملگرهای خطی یا نواری شکل مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. توانایی عملگرهای پلاسمایی در ایجاد جریان‌های گردابه‌ای و کاهش رشد فرایند گذار^۹ در لایه مرزی تراکم‌ناپذیر در چندین مطالعه به اثبات رسیده است [۱۹] و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳. چگونگی شکل‌گیری و تکامل گردابه‌های تکرار شونده در یک عملکرد پایا توسط عملگر پلاسمایی بر روی صفحه تخت توسط بال کریشن و همکاران [۲۰] مورد بررسی قرار گرفت. آنها نشان دادند که توان مصرفی عملگر پلاسمایی در عملکرد پالسی (عملکرد ناپایا)، در مقایسه با حالت عملکرد مداوم (پایا) کاهش می‌یابد.

شرایط جوی مانند فشار، دما و رطوبت نیز عواملی هستند که بر عملکرد مولدهای پلاسمایی جریان گردابه‌ای تأثیرگذار هستند که بنارد و همکاران [۲۴] در تحقیق خود به این موضوع

از منظر حالت‌های عملکردی نیز عملگرهای پلاسمایی تأثیر متفاوتی بر جریان می‌گذارند. در مطالعات متعددی اشاره شده است که عملگرهای پلاسمایی در حالت عملکرد ناپایا یا پالسی^۶ در مقایسه با حالت عملکردی پایا (مداوم) از اثربخشی بالاتر و مصرف انرژی کمتری برخوردارند [۵ و ۶ و ۷]. اسادا و همکاران [۵] توانایی یک عملگر پلاسمایی مبتنی بر تخلیه سد دی الکتریک^۷ را در کنترل جدایی جریان بر یک ایرفویل NACA0015 در حالت پایا بررسی کرده‌اند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، آنها تنها در مدت زمان کوتاهی (Ton) از هر دوره‌ی تناوب (T) عملگر را روشن کردند و دریافتند که اثربخشی عملگر با این روش در کنترل جدایی جریان بسیار بالاتر است. علاوه بر این، در این روش هرچه فرکانس تناوب $f + = 1$ T / باشد اثربخشی عملگر در کنترل جریان بیشتر است.

هندسه‌ی عملگرهای پلاسمایی از دیگر پارامترهای مهم و مؤثر بر اثربخشی آنها در کنترل جریان می‌باشد. انلو و همکاران [۸] و رودریگز و همکاران [۹] تأثیر پارامترهای هندسی مانند ابعاد و شکل الکتروود در معرض جریان را بر عملکرد یک عملگر پلاسمایی بر روی صفحه‌ی تخت بررسی کردند. در آزمایشات آنها، صفحه تخت برای اندازه‌گیری نیروی بدنی تولید شده توسط عملگر پلاسمایی به یک نیروسنج متصل شد. در تحقیقات آنها اگرچه پارامترهای هندسی الکتروودها تأثیر محدودی در توان مصرفی و خصوصیات تخلیه الکتریکی دارند، اما بیشینه نیروی بدنی تولید شده بوسیله‌ی عملگر به طور قابل توجهی تحت تأثیر هندسه‌ی الکتروود تغییر می‌کند. هندسه‌های مختلفی از عملگرهای پلاسمایی می‌توانند در نزدیکی سطح، جریان‌های گردابه‌ای تولید کرده و نقش مولد جریان‌های گردابی را بازی کنند. در مورد این نوع عملگر تحقیقات تجربی و تحلیل‌های عددی زیادی انجام شده است [۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. غیور و همکاران [۱۳] توانایی مولدهای پلاسمایی جریان گردابی با هندسه‌های شانه‌ای و دندانه اره‌ای مشبک در کنترل جریان مادون صوت ضعیف را بر روی ایرفویل NACA 0012 بررسی کردند. آنها نشان دادند که استفاده از عملگر پلاسمایی دندانه اره‌ای مشبک در لبه حمله بیشینه نیروی بدنی و در نتیجه اشباع نیروی بدنی توسط عملگرهای پلاسمایی شد. در تمام طول بال و در جلوی عملگر پلاسمایی شانه‌ای باعث بهبود توزیع فشار روی سطح ایرفویل و افزایش زاویه حمله‌ی واماندگی در سرعت جریان آزاد ۲۵ متر بر

پرداخته‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که رطوبت برای یک مولد پلاسمایی گردابه دارای اثر مخرب است و وقتی که رطوبت نسبی بیش از ۸۵٪ افزایش می‌یابد به موجب آن اثربخشی عملگر پلاسمایی به سرعت افت پیدا می‌کند. ناهمواری‌های ناشی از نصب عملگر پلاسمایی می‌توانند در کنترل جریان تراکم‌پذیر در رژیم‌های مادون صوت و مافوق صوت تأثیرگذار باشند. ریزتا و همکاران [۲۵] به کمک روش عددی اثر تراکم‌پذیری را بر روی کنترل فرایند گذار در عددهای ماخ ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۶ در حضور این ناهمواری‌ها در لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل مطالعه کردند. آنها مشاهده کردند که در عددهای ماخ ۰.۲ و ۰.۴ و در حالتی که عملگر پلاسمایی خاموش است، فرایند گذار به تأخیر افتاده و درست در پایین دست ناهمواری رخ داد. با این حال، هنگامی که عملگر پلاسمایی در این اعداد ماخ روشن شد، فرایند گذار به موقعیتی تقریباً مشابه به حالت قبل از نصب عملگر پلاسمایی انتقال یافت. دنیسون [۲۶] اثر عدد ماخ را بر روی قابلیت نفوذ جریان ثانویه پلاسمای ایجاد شده در لایه مرزی برای اعداد ماخ از ۰.۵ تا ۲ مورد مطالعه قرار داد. او یک مدل تحلیلی تهیه کرد که ارتباط مستقیمی بین قابلیت نفوذ پلاسمای در لایه مرزی و عدد ماخ را نشان می‌داد. در اکثر مطالعات قبلی، عملگرهای پلاسمایی که برای کنترل جریان تراکم‌پذیر استفاده شده‌اند، از تکنیک تخلیه سد دی الکتریک نانو ثانیه‌ای استفاده کرده‌اند. در چنین مواردی، پالس‌های جریان مستقیم (DC) بسیار پرانرژی برای مدت زمان بسیار کوتاه به شکل پالس‌های نانو ثانیه امواج شوک را در داخل لایه مرزی تولید می‌کنند که به نوبه‌ی خود به یک منبع تغذیه پیچیده و گران قیمت نیاز دارد [۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱]. کلی [۳۲] توانایی تخلیه سد دی الکتریک را در کنترل جریان روی ایرفویل با کارآمدی انرژی بالا^۱ NASA-EET و ایرفویل-V Osprey 22 بررسی کرد. وی در اعداد ماخ از ۰.۱ تا ۰.۴ اثر عملگرهای پلاسمایی را با ایجاد موج‌های شوک نانو ثانیه‌ای در لبه‌ی حمله و لبه‌ی فرار ایرفویل بررسی کرد و کارایی بالایی از عملگر پلاسمایی نصب شده در راستای پهنای ایرفویل در ایجاد تأخیر در پدیده‌ی واماندگی و افزایش حداکثر نیروی برآ روی ایرفویل EET نشان داد. علاوه بر این، او از عملگر پلاسمایی برای ایرفویل های V-22 برای فاصله اعداد ماخ ۰.۱ تا ۰.۲ استفاده کرد و نشان داد که مولدهای پلاسمایی جریان گردابه‌ای، عملکردی قابل مقایسه با مولدهای مکانیکی دارند.

در تحقیق حاضر، از عملگرهای پلاسمایی با منبع تغذیه جریان متناوب برای کنترل جریان تراکم‌پذیر بر روی یک ایرفویل فوق بحرانی استفاده شده است. چهار هندسه‌ی مختلف مولد پلاسمایی جریان گردابه‌ای (شانه‌ای، T شکل، دندانه اره‌ای ساده و دندانه اره‌ای مشبک) به روش تجربی در ولتاژ و فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا بتوانند جدایی جریان را بر روی ایرفویل فوق بحرانی در رژیم جریان تراکم‌پذیر کنترل کنند. اگرچه مطالعات متعددی در تحقیقات و مقالات قبلی روی عملگرهای پلاسمایی شانه‌ای و دندانه اره‌ای ساده انجام شده، اما تعداد بسیار محدودی از مطالعات روی عملگرهای پلاسمایی دندانه اره‌ای مشبک و T شکل انجام شده است. بنابراین، در این تحقیق تأثیر چهار هندسه‌ی ذکر شده تحت تأثیر ولتاژ و فرکانس‌های مختلف مورد مطالعه‌ی بیشتر و مقایسه قرار گرفته‌اند. این مقاله به ترتیب زیر نگاشته شده است: تجهیزات، اتصالات آزمایشگاهی و ملاحظات مربوطه در بخش ۲ توضیح داده شده و هندسه‌های مختلف مولدهای پلاسمایی جریان گردابه‌ای در بخش ۳ معرفی شده است. نتایج و بحث و بررسی در بخش ۴ و سرانجام در آخرین بخش، یافته‌های اصلی و نتیجه‌گیری ارائه گردیده است.

۲. تجهیزات آزمون

در این بخش، مجموعه‌ی تجهیزات و ابزار مورد نیاز برای آزمون‌ها و سیستم داده‌برداری به طور خلاصه آورده شده است. شکل ۳ بصورت شماتیک ترکیب تجهیزات، ابزارها و مکانیسم‌های مختلف برای انجام آزمون‌ها را نشان داده است که به شرح زیر می‌باشند:

۲-۱. تونل باد

آزمایش‌ها در یک تونل باد ترانسونیک با مدار باز انجام شده‌اند که به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. عدد ماخ محفظه‌ی آزمون با تغییر سرعت توربوپمپ و تغییر هندسه‌ی نازل، بین ۰.۱ تا ۱.۲ قابل تنظیم است. محفظه‌ی آزمون به طول ۱.۵ متر با سطح مقطع $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ است. در قسمت بالادست، فاصله‌ی بین ابتدای محفظه‌ی آزمون و لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل تقریباً ۵ برابر طول وتر ایرفویل است. شدت تلاطم جریان از طریق یک پراب سیم داغ اندازه‌گیری شد که کمتر از ۰.۲٪ بود.

۲-۲. ایرفویل

ولت و ۱ تا ۴۰ کیلو هرتز است. فرکانس تحریک ناپایا^{۱۲} در بازه ۰،۰۲ تا ۱،۲ کیلو هرتز و سیکل کاری^{۱۳} از ۱٪ تا ۹۹٪ قابل تنظیم است. فرکانس تحریک فرکانسی است که عملگر پلاسمایی برای تحریک و یا میراسازی فرکانس نوسانات داخل لایه مرزی مانند امواج تولمین_اشلیختینگ ایجاد می‌کند. میزان توان مصرفی عملگر پلاسمایی با استفاده از مدار الکتریکی واسطه، که به همین منظور طراحی و در خروجی منبع تغذیه تعبیه شده، اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیس^{۱۴} و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیس^{۱۵} ناشی از عملکرد منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً تجهیزات اندازه‌گیری و داده‌برداری، از کابل‌های دارای پوشش محافظ الکتریکی و همچنین ملاحظات تطبیق امپدانس در طراحی منبع تغذیه استفاده شده است.

۲-۵. عملگرهای پلاسمایی

همانگونه که گفته شد عملگرهای پلاسمایی مومنتوم به لایه مرزی تزریق می‌کنند و برخلاف عملگرهای مکانیکی، نیروی پسای آیرودینامیکی ایجاد نمی‌کنند. در این تحقیق عملگر پلاسمایی با استفاده از فناوری بورد مدار چاپی انعطاف پذیر^{۱۶} ساخته شده است تا از ناهمواریهای گسترده در شکل آیرودینامیکی ایرفویل تا حد امکان جلوگیری شود. مطابق شکل ۵ برای این منظور، برای طراحی و ساخت عملگر پلاسمایی ورق کاپتون/ مس به دلیل انعطاف پذیری آن انتخاب شده است. کاپتون (پلی ایمید) یک ماده دی الکتریک متداول است که در تولید بوردهای مدار چاپی انعطاف پذیر تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضخامت کاپتون و مس با معیار جلوگیری از بروز شکست الکتریکی و کمترین نیروی پسا ناشی از تغییر در هندسه‌ی بیرونی ایرفویل به ترتیب ۰،۷ و ۰،۲۵ میلی متر انتخاب شده‌اند.

۳. هندسه عملگرهای پلاسمایی

در این تحقیق از عملگر پلاسمایی به عنوان مولد جریان گردابه‌ای برای کنترل جدایی جریان استفاده شده است. معمولاً در طراحی مولدهای پلاسمایی جریان گردابه‌ای، هندسه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از این بین، چهار هندسه‌ی مشخص انتخاب شده که به طور خلاصه در زیربخش‌های زیر در مورد آنها توضیح داده شده است.

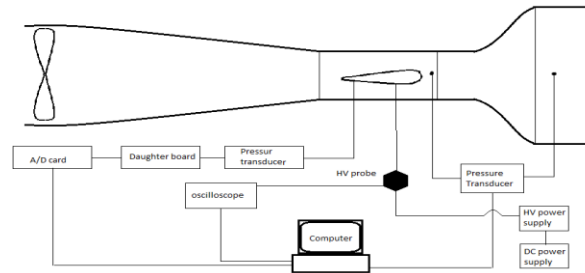
مدل ایرفویل مورد استفاده در این تحقیق، یک ایرفویل فوق بحرانی (NASA (SC (2) 0410 با ابعاد 200×600 میلی متر مربع است (شکل ۴) از آنجایی که نیروهای آیرودینامیکی که در آزمایش‌های مختلف روی ایرفویل اثر می‌کنند می‌توانند به ۱۰۵۰ نیوتون برسند، برای ساخت آن از جنس استیل ضد زنگ استفاده شده است که بارهای آیرودینامیکی بالایی را تحمل کرده و در مقابل هرگونه تغییر شکل ناخواسته مقاومت می‌کند. از طرف دیگر عملگر پلاسمایی از دو الکتروتود فلزی تشکیل شده است که الکتروتود پایینی آن باید به سطح ایرفویل وصل شود. در این صورت، هدایت الکتریکی بدنه‌ی ایرفویل می‌تواند عملکرد عملگرهای پلاسمایی را مختل کرده و در انجام آزمایش‌ها مشکلات جدی ایجاد کند. بنابراین، بخشی از سطح بالایی ایرفویل (۱۴۰ × ۵۰ میلی متر مربع معادل ۶۰٪ حداکثر مساحت آن) از یک ماده غیر فلزی (پلکسی گلاس) ساخته شده است (شکل الف) (۴) که عملگر پلاسمایی روی آن نصب می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار استاتیک لحظه‌ای و به‌هنگام بر روی سطح ایرفویل، ۱۶ منفذ موئین بر روی سطح فوقانی ایرفویل در امتداد خط وتر در وسط ایرفویل ایجاد شده که در شکل (ب) ۴ نشان داده شده است. موقعیت منافذ نیز بطور شماتیک در شکل (ج) ۴ و جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

۲-۳. ابزار اندازه‌گیری

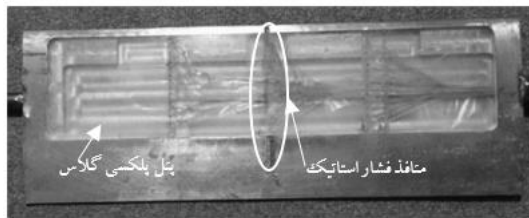
ترانسدیوسرهای فشار کولایت با حداکثر فشار قابل اندازه‌گیری ۱ بار و فرکانس ۵۰،۰۰۰ هرتز برای ثبت پدیده‌های فرکانس بالا در لایه مرزی ناشی از عملکرد عملگر پلاسمایی استفاده شده است. این سنسورها دارای زمان واکنش ۲۰ میکرو ثانیه، ولتاژ خروجی ۱۰ ولت (DC)، حساسیت $6.71 \text{ mV} / \text{psi}$ و خطای هیستریزس ۰،۱٪ هستند.

۲-۴. منبع تغذیه

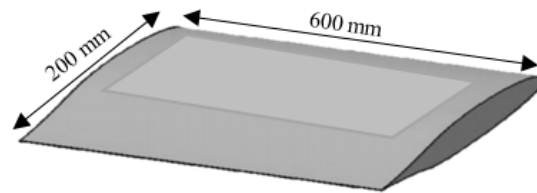
منبع تغذیه متناوب مورد استفاده در این تست‌ها یک منبع تغذیه کاملاً خاص با حداکثر توان خروجی ۲،۵ کیلو وات و طیف گسترده‌ای از پارامترهای الکتریکی برای تشکیل پلازما توسط عملگرهای پلاسمایی مختلف می‌باشد. بازه‌ی ولتاژ خروجی و محدوده‌ی فرکانس حامل^{۱۱} منبع تغذیه به ترتیب ۱ تا ۳۰ کیلو



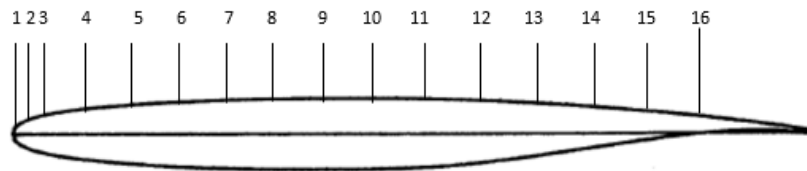
شکل ۳. نمای شماتیک از تونل باد مدار باز، ایرفویل، منبع تغذیه و سیستم داده‌برداری.



(ب)



(الف)

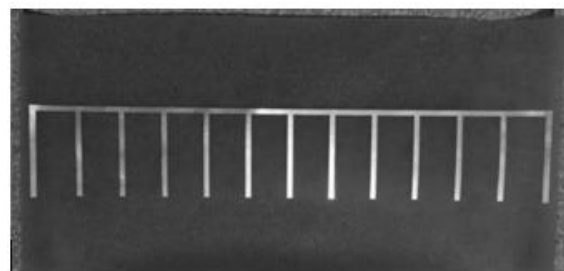


(ج)

شکل ۴. (الف) طرح ایرفویل، (ب) منافذ فشار و (ج) محل قرارگیری منافذ فشار روی ایرفویل.

جدول ۱. موقعیت قرارگیری منافذ فشار

16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	N
0.85	0.76	0.71	0.62	0.53	0.49	0.45	0.4	0.35	0.31	0.28	0.22	0.13	0.05	0.017	0	%



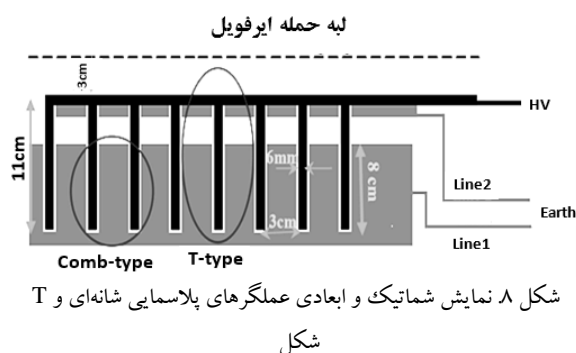
شکل ۵. ورق کاپتون/مس که طرح هندسه‌ی شانه‌ای عملگر پلاسمایی روی آن ایجاد شده است

۳-۱. عملگرهای پلاسمایی شانه‌ای

در عملگرهای پلاسمایی شانه‌ای، برای ایجاد گردابه در راستای وتر ایرفویل (راستای جریان^{۱۷})، الکترودهایی بر روی سطح ایرفویل و در امتداد جریان آزاد نصب شده‌اند (شکل ۶). الکترودهای در راستای وتر، جت‌های سطحی در راستای پهنای^{۱۸} ایرفویل القاء می‌کنند که در تقاطع با لایه مرزی اولیه، جریان‌های گردابه‌ای تولید می‌کنند [۳۳]. مطابق شکل ۶ عملگرهای پلاسمایی شانه‌ای به دو دسته طبقه‌بندی شده‌اند:

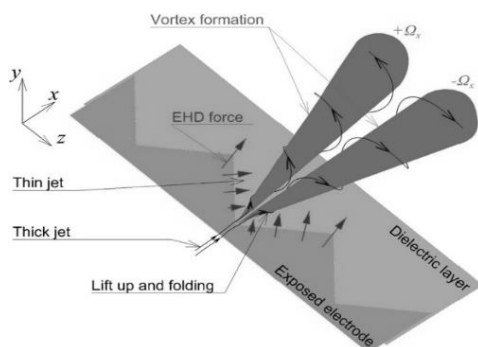
(الف) مولدهای جریان‌های چرخشی مزدوج قرینه و (ب) مولدهای جریان‌های چرخشی تکی [۱۰]. جریان‌های چرخشی از ابتدای الکترودها تولید می‌شوند. محل حداکثر توان این گردابه‌ها به سرعت جریان آزاد، طول الکترودها و ولتاژ و فرکانس تحریک پلاسمای بستگی دارد. عملکرد این دو نوع عملگر در جریان شبه تراکم‌ناپذیر ($M = 0.3$) به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که میرایی جریان‌های گردابه‌ای در نوع (ب) به دلیل عدم هم‌افزایی گردابه‌ها به طور قابل‌توجهی سریعتر است

این صورت هندسه‌ای T شکل حاصل می‌شود که به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است. به این ترتیب، فقط الکترودهای موازی با جریان آزاد (خط ۱) برای آرایش شانه‌ای استفاده شده‌اند در حالیکه الکتروده عمود بر جریان (خط ۱ و خط ۲) در کنترل جریان برای هندسه‌ی T شکل شرکت می‌کنند.



۳-۳. عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای ساده

جهت نیروهای الکتروهیدرودینامیکی و همچنین جفت گردابه‌ی قرینه‌ی تولید شده توسط عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای به صورت شماتیک در شکل ۹ نشان داده شده است [۱۵].



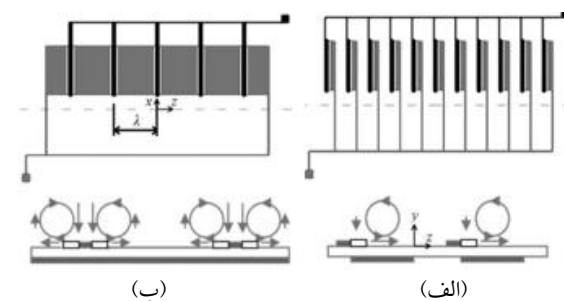
شکل ۹. نمایش نحوه‌ی تشکیل جریان‌های گردابه‌ای توسط عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای ساده

عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای با $r > 1$ ($r = \lambda/H$) که در آن λ فاصله‌ی دندان‌ها، و H ارتفاع دندان‌ها است (شکل ۱۰) می‌تواند جریان گردابه‌ایی ایجاد کند.

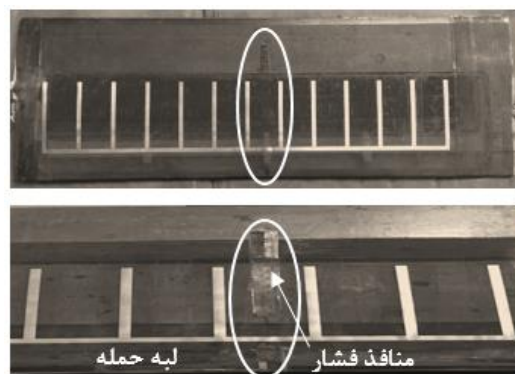
مقادیر کوچک نسبت r ($r = 0.5$ و $r = 0.25$) باعث تولید نیروی بدنی می‌شوند [۲] و [۲۴] و مقادیر بالای این نسبت ($r = 2$) برای تولید جریان گردابه‌ایی مناسب هستند [۳۵] و [۳۶]. در تحقیق حاضر، به منظور تولید جریان گردابه‌ای، r بزرگتر از یک انتخاب شده است، و همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، λ و H به ترتیب ۱۲ میلی‌متر و ۸ میلی‌متر انتخاب شده‌اند.

[۳۴]. به همین دلیل در مطالعه‌ی حاضر، از عملگر نوع (الف) استفاده شده است که در عملکرد ناپایا (حالت پالسی)، جریان‌های چرخشی مزدوج و قرینه تولید می‌کند.

عملگر پلاسمایی مستقیماً بر روی سطح فوقانی ایرفوایل نصب شده و منافذ فشاری را پوشانده است. بنابراین لایه‌های عملگر (کاپتون و مس) برش داده شده تا همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده منافذ مذکور باز شوند.



شکل ۶. نمای شماتیک و نحوه‌ی تشکیل جریان‌های چرخشی مزدوج (الف) و تکی (ب) [۳۴]

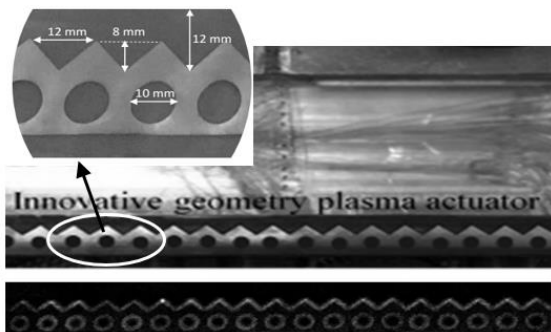


شکل ۷. عملگر پلاسمایی شانه‌ای نصب شده روی سطح ایرفوایل قبل و بعد از ایجاد برش برای باز شدن منافذ فشار استاتیک

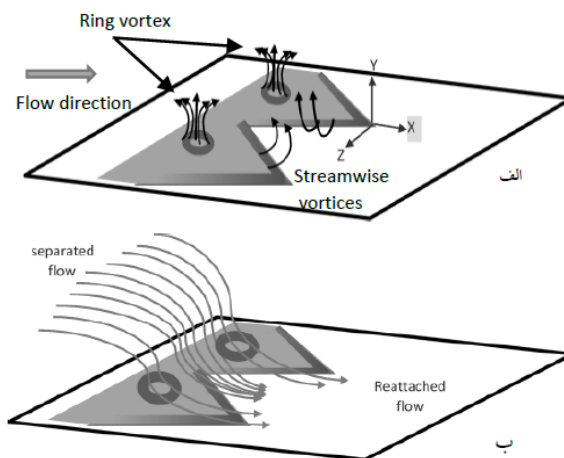
۳-۲. عملگر پلاسمایی T شکل

این عملگر، ترکیبی از عملگر پلاسمایی شانه‌ای موازی با جریان و عملگر پلاسمایی نواری شکل عمود بر جهت جریان می‌باشد. مطابق شکل ۸، در این هندسه در زیر نوار باریک مسی که نقش الکتروده ولتاژ بالا را بازی می‌کند و در نزدیکی لبه حمله نصب شده است، یک لایه مس خوابانده و از آن به عنوان یک عملگر پلاسمایی نواری شکل عمود بر جهت جریان استفاده شده است و بدین ترتیب در هنگامی که لایه مس زیر آن به مسیر ارت منبع تغذیه متصل می‌شود شروع به تولید جریان پلاسمای در امتداد جریان آزاد و انتقال مومنتوم به داخل لایه مرزی می‌نماید که در

عملگر پلاسمایی دندانانه اره‌ای مشبک در شرایط عملکرد پالسی به صورت همزمان گردابه‌ی حلقوی و گردابه‌ی مزدوج قرینه تولید می‌کند. شکل ۱۳ نمای شماتیک از چگونگی تولید جریان‌های گردابه‌ای و اتصال مجدد جریان جدا شده از روی سطح را نشان می‌دهد. در این هندسه، ترکیبی از گردابه حلقوی و گردابه مزدوج قرینه باعث می‌شود که لایه مرزی با جریان آزاد پرنرزی مخلوط شود.



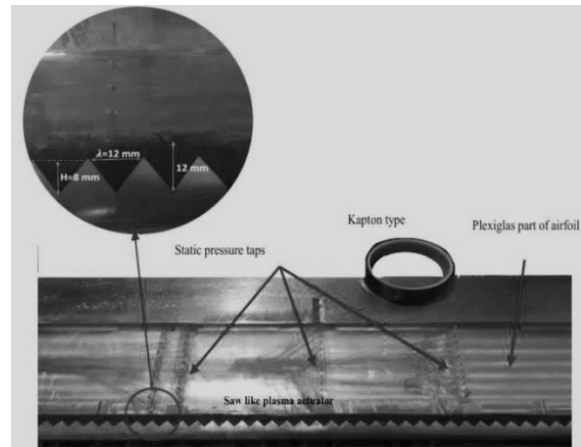
شکل ۱۲. عملگر پلاسمایی دندانانه اره‌ای مشبک نصب شده روی ایرفویل و ابعاد و اندازه‌های مربوطه



شکل ۱۳. نمایش نحوه‌ی تشکیل جریان‌های گردابه‌ای توسط عملگر پلاسمایی دندانانه اره‌ای مشبک

۴. بحث و بررسی نتایج

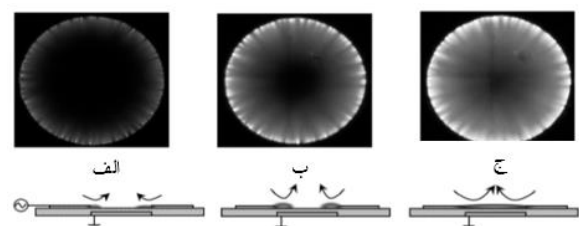
در ابتدا به تعریف برخی پارامترهای مهم و پرتکرار در بررسی نتایج آزمون‌ها می‌پردازیم. برای ارزیابی عملکرد هندسه‌های مختلف عملگرهای پلاسمایی از نمودار ضریب فشار بر روی سطح فوقانی ایرفویل (قسمت مکش) استفاده شده است. ضریب فشار برای جریان تراکم‌ناپذیر در یک نقطه‌ی دلخواه A روی سطح به صورت $C_{p,i,A} = (P_A - P_{\infty}) / \frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2$ تعریف می‌شود که در



شکل ۱۰. عملگر پلاسمایی دندانانه اره‌ای نصب شده روی ایرفویل و ابعاد و اندازه‌های مربوطه

۳-۴. عملگر پلاسمایی دندانانه اره‌ای مشبک

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، عملگر پلاسمایی دندانانه اره‌ای مشبک ترکیبی از عملگر پلاسمایی دندانانه اره‌ای ساده و عملگر پلاسمایی جت مصنوعی^{۱۹} است. عملگر پلاسمایی جت مصنوعی یک عملگر خاص است که جت بدون جریان جرم^{۲۰} تولید می‌کند. هنگامی که مولد پلاسمایی جت مصنوعی در حالت پالسی عمل می‌کند، گردابه‌های حلقوی ایجاد و وقتی به طور مداوم کار می‌کند، یک جت مصنوعی پایا تولید می‌کند. شبیه به انواع دیگر جت‌های مصنوعی، این نوع عملگر پلاسمایی می‌تواند در هر فرکانسی به صورت پالسی گردابه‌ی حلقوی ایجاد کند (شکل ۱۳) و به عنوان وسیله مکشی در کنترل جریان استفاده شود [۳۷]. مطابق شکل (الف) ۱۱، جریان پلازما در مولد پلاسمایی جت مصنوعی در مراحل اولیه وقتی توان ورودی به اندازه کافی بالا نباشد شکل حلقوی و بعضاً رشته رشته‌ای دارد. با این وجود، با افزایش توان ورودی، جریان پلازما به اندازه کافی تولید می‌شود و در نهایت تبدیل به دیسک کامل می‌شود (شکل (ج) ۱۱).



شکل ۱۱. فرایند تشکیل پلازما در مولد پلاسمایی جت مصنوعی با افزایش توان ورودی

ولتاژ مورد نیاز و در نتیجه حداقل ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده‌ی عملگر پلاسمایی می‌گردد. فرکانس کاهش یافته‌ی بی بعد به صورت $F = f_{ex}/U_{\infty}$ برای جریان متناوب و ولتاژ ورودی لازم برای عملکرد در حالت ناپایا (پالسی) تعریف شده است. در اینجا، l طول منطقه جدایی و f_{ex} فرکانس تحریک ناپایای عملگر برای یک جریان متناوب با حداقل ولتاژ ورودی می‌باشد و وقتی $F+$ نزدیک به یک باشد، بهینه است. حالت عملکرد پالسی بهینه باعث کاهش توان مصرفی عملگرهای پلاسمایی نیز می‌شود زیرا به حداقل ولتاژ ورودی نیاز دارد و عملگر نیز به طور مداوم کار نمی‌کند. با این مقدمه به تجزیه و تحلیل عملکرد تک‌تک عملگرهای پلاسمایی و سپس مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته خواهد شد.

۴-۱. تجزیه و تحلیل عملکرد عملگر پلاسمایی شانه‌ای و

T شکل

از آنجاکه در زاویه حمله $\alpha=10^{\circ}$ درجه، جدایی جریان تقریباً از $x/c = 0.2$ آغاز می‌شود بنابراین، برای اطمینان از قرارگیری عملگر در ابتدای ناحیه جدایی، اندازه‌ی زاویه حمله به گونه‌ای انتخاب شده است که منطقه‌ی جدایی حدود 4cm از پایین دست لبه حمله شروع شود. عملگرهای پلاسمایی شانه‌ای و T شکل برای اثرگذاری هرچه بیشتر، در ابتدای این منطقه نصب شده‌اند (شکل ۱۴).

همانطور که در بالا توضیح داده شد، فرکانس تحریک برای عملکرد در حالت ناپایا وقتی بهینه است که فرکانس کاهش یافته‌ی $F+$ نزدیک به یک باشد. طبق فرمول در این حالت برای $C = 0.2m$ ، $l = 0.16m$ و $U_{\infty} = 140m/s$ مقدار بهینه برای فرکانس تحریک ناپایا در حدود ۸۷۵ هرتز است. بر اساس نمودار چگالی طیف توان (PSD) مربوط به فشار استاتیک اندازه‌گیری شده توسط منافذ فوقانی، فرکانس تحریک ناپایا به صورت فرکانس غالب در هنگام عملکرد پالسی عملگر پلاسمایی ظاهر می‌شود که مطابق شکل ۱۵، ۸۶۰ هرتز می‌باشد. با توجه به فرکانس ۸۶۰ هرتز، فرکانس کاهش یافته $F+ = 0.9825$ به دست می‌آید. تفاوت اندک بین فرکانس‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده (۸۷۵ هرتز و ۸۶۰ هرتز) قابل چشم‌پوشی و عمدتاً به دلیل وجود ناهمواریهای هرچند ناچیز مربوط به نصب عملگر پلاسمایی بر روی سطح ایرفویل می‌باشد [۲۵].

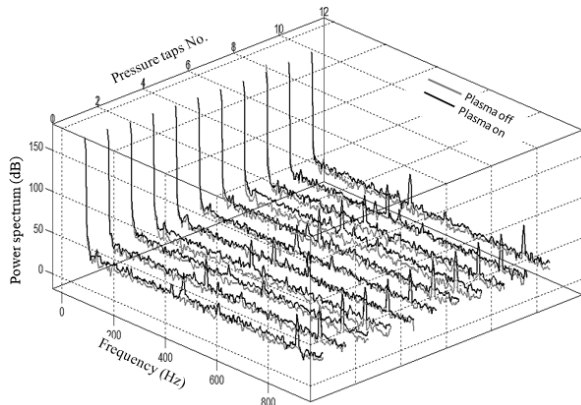
آن P_{∞} ، P_A ، U_{∞} و ρ_{∞} به ترتیب عبارتند از: فشار استاتیک جریان آزاد، فشار استاتیک در نقطه‌ی A، سرعت و چگالی جریان آزاد. پس از اعمال تئوری پرندل-گلاورت، ضریب فشار در جریان تراکم‌پذیر به صورت $C_{p,A} = C_{p,i,A}/\sqrt{1-M_{\infty}^2}$ اصلاح می‌شود، که M_{∞} عدد ماخ جریان آزاد است. عدد رینولدز جریان بر اساس سرعت جریان آزاد و محل نصب عملگر پلاسمایی به صورت $Re_x = U_{\infty}x/v$ تعریف می‌شود که در آزمون‌های انجام شده در این تحقیق $U_{\infty} = 140 m/s$ سرعت جریان آزاد، $x = 4cm$ فاصله یک نقطه خاص از لبه‌ی حمله و v ویسکوزیته‌ی سینماتیک هواست که در ۷ درجه سانتیگراد مساوی $1.35e-5 m^2/s$ می‌باشد. بدین ترتیب عدد رینولدز مربوط به این شرایط $Re_x = 414818$ به دست خواهد آمد.

همچنین، برای تعیین تقریبی ضخامت لایه مرزی، از رابطه تجربی صفحه تخت استفاده شده است ($\delta_x = 0.16x/Re_x^{1/7}$) که بر اساس آن در ابتدای ناحیه جدایی جریان ($x = 4cm$) ضخامت لایه مرزی تقریباً $\delta_x = 0.001m$ به بدست می‌آید.

لازم به ذکر است که به دلیل لزوم نصب عملگر پلاسمایی بر روی قسمت غیر فلزی ایرفویل (که در بخش ۲-۲ توضیح داده شده است)، لبه‌ی عملگر پلاسمایی تقریباً 3cm در پایین دست لبه‌ی حمله قرار گرفته است (شکل ۱۷) بنابراین، برای اطمینان از قرارگیری عملگر در ناحیه جدایی، شرایط آزمایش به گونه‌ای تنظیم شده است که منطقه‌ی جدایی حدود 4cm از پایین دست لبه حمله شروع شود (نه دقیقاً از لبه حمله). همانطور که در بخش ۲-۳ ذکر شد، ضخامت لایه مس به عنوان الکتروود در معرض جریان $\delta_c = 0.00025m$ انتخاب شده است که بسیار کمتر از مقدار تقریبی برای ضخامت لایه مرزی در ابتدای منطقه جدایی و حاکی از قرار داشتن عملگر پلاسمایی در داخل لایه مرزی است.

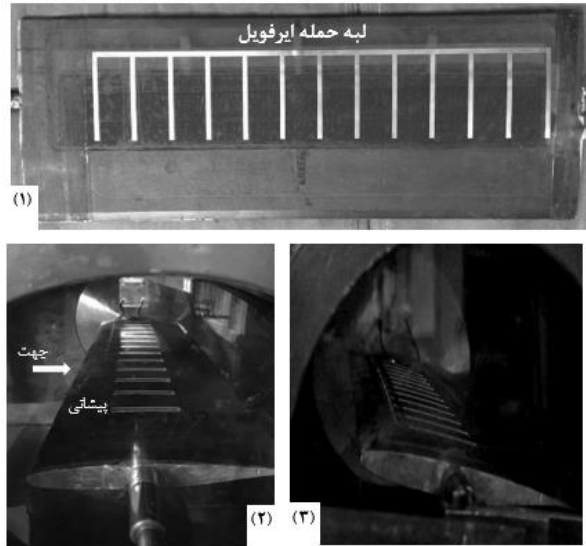
به منظور تعیین ولتاژ و فرکانس مناسب برای حداکثر شدت پلاسمای، یک سری پیش آزمون قبل از آزمون‌های اصلی انجام شده است. بدیهی است که تولید گردابه‌های قدرتمندتر نیاز به ولتاژهای بالاتری در تخلیه الکتریکی و تولید پلاسمای دارد که این نیز خود نیازمند الکترودهایی با لایه‌های دی الکتریک ضخیم‌تر می‌باشد تا از شکست الکتریکی جلوگیری شود. با این حال، عملگر پلاسمایی ضخیم‌تر نیروی پسای ایرفویل را افزایش می‌دهد. انتخاب مقدار بهینه فرکانس تحریک ناپایا می‌تواند این نگرانی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد، زیرا منجر به حداقل

آزمون‌های تونل باد در $M_{\infty}=0.428$ و در دو حالت خاموش و روشن بودن عملگر پلاسمایی در حالت عملکردی ناپایا در $V_{pp} = 15kV$ ، $f_{car} = 10, 11, 12 \text{ kHz}$ ، $f_{ex} = 875Hz$ و سیکل کاری ۵۰٪ انجام می‌شوند. تأثیر گردابه تولید شده توسط عملگر پلاسمایی بر روی توزیع فشار، از ولتاژ تحریک (Vpp) ۱۰ کیلوولت آغاز و مشخص شد که توزیع فشار به ازای ولتاژ زیر ۱۰ کیلوولت حتی با افزایش فرکانس حامل، تغییر نمی‌کند.



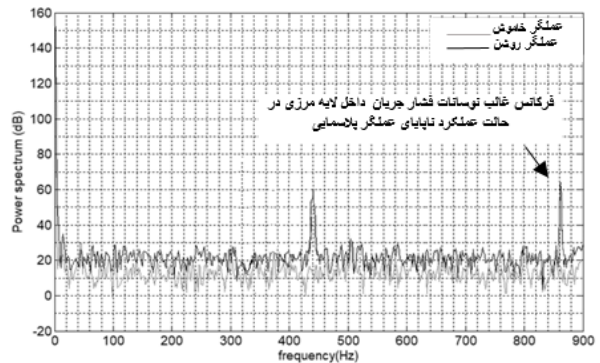
شکل ۱۶. نمودار آشناری چگالی طیفی توان نوسانات فشار استاتیک در منافذ فشار مختلف در طول وتر ایرفویل

در پیش آزمون‌های قبل از آزمون‌های اصلی مشخص شد که افزایش V_{pp} تا ۱۵ کیلوولت باعث بهبود توزیع فشار بر روی ایرفویل می‌شد ولی ولتاژ ۱۶ کیلوولت موجب شکست الکتریکی عملگر پلاسمایی و سوختن عملگر گردید، بنابراین تمام آزمایش‌ها در V_{pp} ثابت و مساوی ۱۵ کیلوولت انجام شده‌اند. در این ولتاژ، شدت مناسب پلازما و تخلیه الکتریکی همگن (بدون جریان رشته رشته‌ای) در فرکانس حامل از ۱۰ تا ۱۲ کیلوهرتز حاصل شد. همچنین مشاهده شد که با افزایش فرکانس حامل بالاتر از ۱۲ کیلوهرتز، عملگر پلاسمایی با یک صدای بسیار تیز و آزار دهنده و به صورت رشته‌ای کار می‌کند و بخشی از توان ورودی را به گرما تبدیل می‌کند. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که عملگر شانه‌ای، با تولید گردابه‌های موازی جریان، به خوبی توانسته است باعث انتقال انرژی جریان آزاد به داخل لایه مرزی و بهبود ضریب فشار در سطح بالایی ایرفویل گردد. در نمودار شکل ۱۷ به خوبی مشهود است که در حالت عملکرد پالسی، در مقابل عملگر شانه‌ای و نزدیک لبه‌ی حمله حباب جدایی ایجاد شده که علت آن پالس‌هایی هستند که در پیشانی الکترودها در خلاف جهت جریان آزاد ایجاد می‌گردند.



شکل ۱۴. (۱) ایرفویل با عملگر پلاسمایی نصب شده روی آن در حالت خاموش و بیرون تونل باد، (۲) ایرفویل با عملگر پلاسمایی شانه‌ای در حالت روشن، (۳) ایرفویل با عملگر پلاسمایی T شکل در حالت روشن (داخل تونل باد).

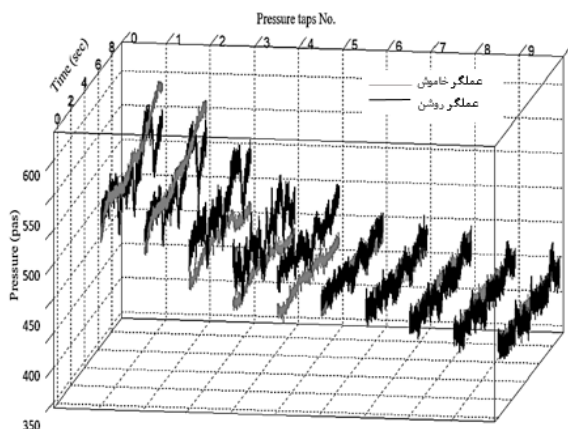
لازم به ذکر است که اگرچه از روش PCB برای نصب عملگر پلاسمایی استفاده شده است، اما باز هم فرکانس کاهش یافته ($F+ = 0.9825$) هنوز ۱،۷٪ متفاوت از مقدار مطلوب است. این نشان می‌دهد که اثر ضخامت عملگر پلاسمایی و ناهمواریهای ناشی از آن باید در طراحی در نظر گرفته شود.



شکل ۱۵. نمودار چگالی طیفی توان فشار لحظه‌ای منفذ فشار واقع در $x/c = 0.35$ در زاویه حمله ۱۰ درجه

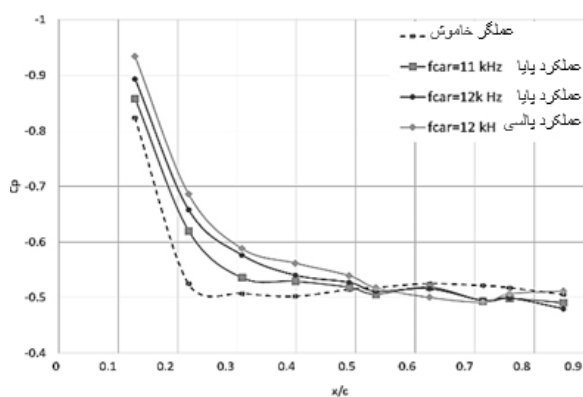
در شکل ۱۶ نیز مشهود است که وقتی عملگر T شکل در حالت ناپایا عمل می‌کند، برای کلیه منافذ واقع در امتداد خط وتر ایرفویل با $x/c > 0.2$ ، یک فرکانس غالب مشاهده می‌شود که یک نشانه قوی برای جدایی جریان در این ناحیه از سطح ایرفویل است.

شایان ذکر است که میزان توان مصرفی عملگرهای پلاسمایی شانه‌ای و T شکل در شرایط آزمایشی مشابه ($f_{car} = 10\text{kHz}$, $V_{pp} = 15\text{kV}$, $\alpha = 10^\circ$, $M_\infty = 0.428$) $f_{ex} = 875\text{Hz}$ سیکل کاری ۵۰٪ به ترتیب ۵۰۰ و ۶۷۵ وات می‌باشد.



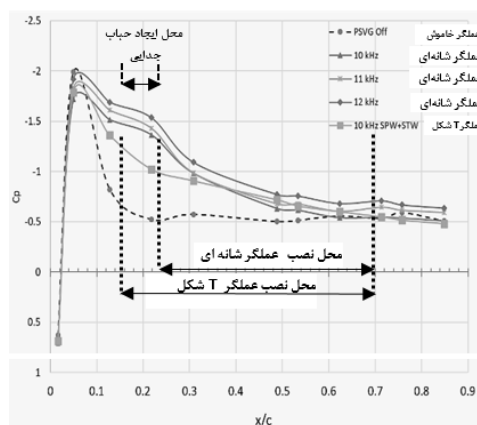
شکل ۱۸. نمودار تغییرات لحظه‌ای فشار مربوط به منافذ فشاری مختلف در طول وتر ایرفویل در حالت‌های روشن و خاموش عملگر شانه‌ای

داده شده در شکل ۲۰ توزیع فشار مربوط به حالت خاموشی عملگر پلاسمایی، در $\alpha = 10^\circ$ جدایی جریان تقریباً از ۲۰٪ وتر شروع شده و تا لبه‌ی فرار ایرفویل ادامه می‌یابد. طبق رابطه، با توجه به طول ناحیه جدایی ($l = 0.16\text{m}$) و سرعت جریان آزاد ($U_\infty = 140\text{m/s}$)، فرکانس تحریک بهینه ناپایا ۸۷۵ هرتز به دست آمد. با این حال، با مشاهده‌ی فرکانس غالب در نمودار PSD، فرکانس تحریک ناپایا و فرکانس بدون بعد به ترتیب $F^+ = 0.937$ و $f_{ex} = 820\text{Hz}$ حاصل می‌شوند.



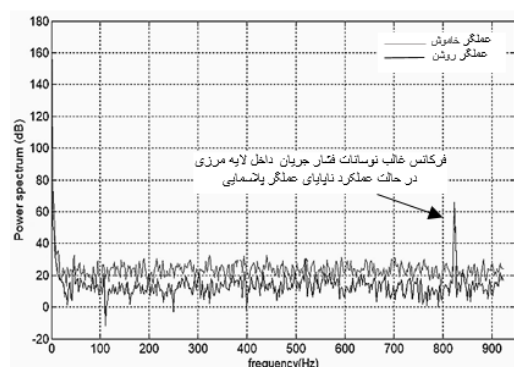
شکل ۲۰. نمودارهای توزیع فشار بر روی سطح ایرفویل تحت تأثیر عملکرد عملگر دندان‌اره‌ای ساده

در شکل ۱۸ وجود نوسانهای شدید فشار در منافذ نزدیک به لبه حمله، وجود حباب جدایی در این منطقه را تأیید می‌کند. همچنین مشاهده شد که با افزایش فرکانس حامل و همچنین استفاده از هندسه‌ی T شکل، اندازه حباب جدایی کاهش می‌یابد (شکل ۱۷).



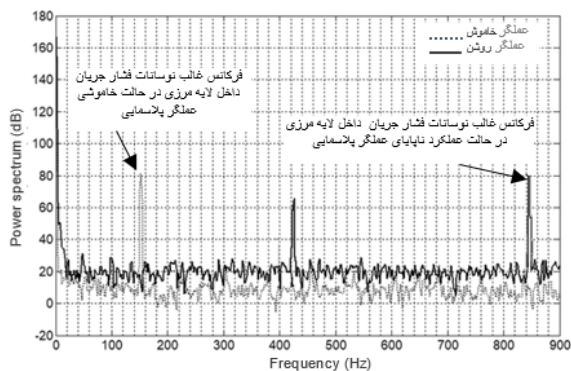
شکل ۱۷. نمودارهای توزیع فشار بر روی سطح ایرفویل تحت تأثیر عملکرد عملگرهای شانه‌ای و T شکل

۲-۴. تجزیه و تحلیل عملکرد عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای ساده
با توجه به این که عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای ساده در لبه حمله‌ی ایرفویل نصب شده است و چهار منفذ فشار اول را پوشانده است بنابراین، امکان تجزیه و تحلیل اثر این نوع عملگر بر روی توزیع فشار، برای لبه‌ی حمله (۱۰٪ اول وتر) وجود ندارد. طبق نمودار PSD در شرایطی که عملگر روشن است یک فرکانس غالب (۸۲۰ هرتز) مشاهده می‌شود (شکل ۱۹). در نمودار نشان

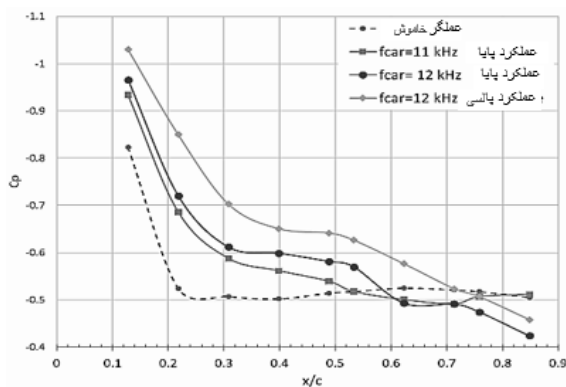


شکل ۱۹. نمودار چگالی طیفی توان نوسانات فشار داخل لایه مرزی در منفذ فشار واقع در $x/c = 0.35$ در دو حالت خاموش و عملکرد پالسی عملگر دندان‌اره‌ای ساده

نیز افزایش می‌یابد. استفاده از عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای مشبک در حالت عملکردی ناپایا در فرکانس تحریک $f_{ex} = 875\text{Hz}$ و سیکل کاری ۵۰٪، منجر به مکش بیشتری در ۷۰٪ اول وتر ایرفویل شد. با عملکرد این عملگر بهبود فشار بهتری نیز در ناحیه پایین دست جریان ایجاد شد. این امر به دلیل تزریق انرژی به لایه مرزی از طریق ایجاد جریان‌های گردابه‌ای ترکیبی (در جهات عمود و موازی با جریان آزاد) است که باعث می‌شود جریان جدا شده به خوبی کنترل شود.



شکل ۲۱. نمودار چگالی طیفی توان نوسانات فشار داخل لایه مرزی در منفذ فشار واقع در $x/c = 0.35$. دو حالت خاموش و عملکرد پالسی عملگر دندان‌اره‌ای مشبک



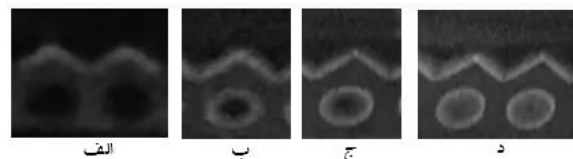
شکل ۲۲. نمودارهای توزیع فشار بر روی سطح ایرفویل تحت تأثیر عملکرد عملگر دندان‌اره‌ای مشبک

مقایسه شکل (۲۰) و شکل (۲۳) نشان می‌دهد که عملگرهای پلاسمایی با هندسه دندان‌اره‌ای ساده و مشبک در عملکرد پالسی باعث افزایش فشار مکشی در قیاس با حالت مبنا (پلاسمای خاموش) در نزدیکی لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل به میزان حدوداً ۳۵٪ و ۶۸٪ شده است. بنابراین، می‌توان استنباط نمود که عملگرهای پلاسمایی ذکر شده در بالا می‌تواند به کنترل جدایی لبه حمله‌ی جریان تراکم‌پذیر ($M_{\infty}=0.428$) و بهبود زاویه حمله‌ی واماندگی

همانطور که در شکل ۲۰ مشهود است، عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای ساده فشار جریان جدا شده را در نزدیکی لبه حمله بازیابی کرده است. همچنین مشخص شد که اثربخشی عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای ساده با افزایش فرکانس حامل و عملکرد در حالت ناپایا، افزایش می‌یابد.

۳-۴. تجزیه و تحلیل عملکرد عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای مشبک

شکل ۲۱ روند تشکیل پلاسمای را با افزایش توان ورودی روی عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای مشبک نشان می‌دهد. هنگامی که توان ورودی کم باشد، پلاسمای در لبه‌ی دندان‌اره‌ی عملگر ایجاد می‌شود (شکل الف). با افزایش توان ورودی، پلاسمای در منطقه حلقوی هم تشکیل شده تا زمانی که به طور کامل در منطقه حلقوی به صورت دیسک کامل ظاهر شود (شکل د).



شکل ۲۱. مراحل تشکیل پلاسمای در عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای مشبک با افزایش توان ورودی

برای این عملگر نیز فرکانس تحریک ناپایا به شکل فرکانس غالب ۸۵۰ هرتز از نمودار PSD برای $\alpha = 10^\circ$ در هنگام عملکرد عملگر در حالت ناپایا استخراج می‌شود (شکل ۲۲). فرکانس تحریک ناپایا و فرکانس بدون بعد به ترتیب $f_{ex} = 850\text{Hz}$ و $F^+ = 0.971$ حاصل می‌شوند. یک نگاه دقیق به شکل ۲۲ نشان می‌دهد که فرکانس ۱۵۰ هرتز، فرکانس تشدید نوسانات جریان کنترل نشده (خاموشی عملگر پلاسمایی) می‌باشد. بنابراین، به عنوان یک اصل باید توجه داشت که در حین استفاده از عملگر در آزمایش‌ها، فرکانس تحریک ناپایا دارای یک فاصله مطمئن از این فرکانس باشد. هایکارو و همکاران [۳۸] نیز در تحقیق خود تأکید کرده‌اند که در کنترل جریان، فرکانس ناپایا باید بالاتر از فرکانس تشدید نوسانات جریان کنترل نشده تنظیم شود.

همانطور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، عملگر پلاسمایی دندان‌اره‌ای مشبک در شرایط عملکرد پایا بهبود قابل توجهی در نمودار توزیع فشار سطح فوقانی ایرفویل ایجاد می‌نماید و این موضوع با افزایش فرکانس حامل از ۱۱ کیلوهرتز به ۱۲ کیلوهرتز

۳. اثر عملگرهای پلاسمایی با هندسه دندان اره‌ای مشبک و ساده نیز با یکدیگر مقایسه و مشاهده شد که هر دو عملگر پلاسمایی با بهبود پیک مکشی در نزدیکی لبه‌ی حمله و بازیابی فشار در پایین دست جریان به واسطه‌ی انرژی بخشیدن به لایه مرزی، قادرند جریان جدا شده را به خوبی کنترل کنند. با این حال، علیرغم مصرف انرژی بالاتر، هندسه‌ی دندان اره‌ای مشبک توزیع فشار بهتری را روی سطح ایرفویل ایجاد نمود.

۴. در کل، در بین هندسه‌های آزمایش شده، عملگر پلاسمایی T شکل بهترین عملکرد را در کنترل جریان نشان داد که استفاده از آن برای حالت‌هایی که هدف، بهبود زاویه‌ی حمله‌ی واماندگی باشد (مثلا در نشست و برخاست هواپیما) توصیه می‌شود.

۵. استفاده از هندسه‌های دندان اره‌ای ساده و مشبک برای کنترل موضعی جدایی جریان (به عنوان مثال در لبه‌ی حمله یا لبه‌ی فرار بال) توصیه می‌شود که البته نشان داده شد در عملکرد پالسی از بین این دو، هندسه‌ی دندان اره‌ای مشبک از اثربخشی به مراتب بالاتری برخوردار می‌باشد.

می‌باشند. در شرایط مشابه، میزان توان مصرفی عملگرهای پلاسمایی با هندسه‌ی دندان اره‌ای مشبک و ساده در عملکرد ناپایا به ترتیب ۵۴۰ و ۳۶۰ وات اندازه‌گیری شد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر چهار هندسه‌ی مختلف مولد پلاسمایی جریان گردابه‌ای بر کنترل جدایی جریان روی یک ایرفویل فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه‌ی عملکرد این هندسه‌های مختلف بر روی جریان در یک نقطه خاص از ایرفویل در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. در کل، می‌توان نتیجه گرفت:

۱. جدایی جریان تراکم‌پذیر ($M_{\infty}=0.428$) بر روی ایرفویل NASA SC (2) -0410 را می‌توان با استفاده از هندسه‌های مختلف مولدهای پلاسمایی جریان گردابه‌ای کنترل نمود.

۲. عملکرد هندسه‌های شانه‌ای و T شکل در شرایط یکسان مقایسه شد. در جلوی عملگر پلاسمایی شانه‌ای در نزدیکی لبه حمله‌ی ایرفویل حباب جدایی ایجاد گردید. تغییر هندسه‌ی عملگر از شانه‌ای به T شکل به طور قابل ملاحظه‌ای اندازه حباب جدایی را کاهش داد.

جدول ۲. مقایسه‌ی تأثیر عملگرهای پلاسمایی مختلف در یک نقطه خاص از ایرفویل

پارامتر / عملگر پلاسمایی	موقعیت عملگر	ولتاژ کاری	فرکانس حامل	فرکانس تحریک	سیکل کاری	حالت عملکردی	Maximum ΔC_p $x/c=0.22$ at
شانه‌ای شکل	5cm از لبه حمله (موازی با جریان آزاد)	15 kV	10-11-12 kHz	875 Hz	50%	پالسی	حباب جدایی
T شکل	3cm از لبه حمله (موازی با جریان آزاد)	15 kV	10-11-12 kHz	875 Hz	50%	پالسی	100%
دندان اره‌ای ساده	2.5cm از لبه حمله (عمود بر جریان آزاد)	15 kV	10-11-12 kHz	875 Hz	100% 50%	مداوم/ پالسی	29% 35%
دندان اره‌ای مشبک	2.5cm از لبه حمله (عمود بران جریان آزاد)	15 kV	10-11-12 kHz	875 Hz	100% 50%	مداوم/ پالسی	39% 68%

۶. مأخذ

- [1] P. Bowles, "Wind tunnel experiments on the effect of compressibility on the attributes of dynamic stall," University of Notre Dame, South Bend, Notre Dame, March 2012.
- [2] Thomas, F., Corke, C., Iqbal, M., Kozlov, A. and Schatzman, D., "Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control," AIAA, Vols. 47, No. 9, pp. 2169-2178, 2009.
- [3] Giepmans, R. H. M., and Kotsonis, M., "On the mechanical efficiency of dielectric barrier discharge plasma actuators," Applied Physics Letters, vol. 98, 2011.
- [4] Ying-hong, L. Yun, W. Hui-min, S., Hua, L. and Min, J., "Plasma Flow Control," InTech, Shanghai, 2011.
- [5] Asada, K., Yoshihiko, N., Akira, O. and Kozo, F., "Airfoil Flow Experiment on the Duty Cycle of DBD Plasma Actuator," in 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2009.

- [6] K. Fujii, "High-performance computing-based exploration of flow control with micro devices," *Philosophical transactions of the royal society A*, vol. A, pp. 1-13, 2017.
- [7] Hikaru, A., Satoshi, S., Makoto, S., Aiko, Y., Taku, N. and Kozo, F., "Computational and experimental analysis of flow structures induced by a plasma actuator with burst modulations in quiescent air," *Mechanical Engineering Journal*, vol. 2, 2015.
- [8] Enloe, C., McLaughlin, T., VanDyken, R., Kachner, K., Jumper, E., Corke, C., Post, M. and Haddad, O., "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects," *AIAA Journal*, Vols. 42, no. 3, pp. 595-604, 2004.
- [9] Rodrigues, F., Pascoa, J. and Trancossi, M., "Analysis of Innovative Plasma Actuator Geometries for Boundary Layer Control," in *ASME*, Phoenix, Arizona, 2016.
- [10] Timothy, N., Takehiko, S. and Hirohide, F., "Flow Control on a NACA 4418 Using Dielectric-Barrier-Discharge Vortex Generator," *AIAA*, vol. 51, pp. 452-465, February 2013.
- [11] Chuan, H. and Thomas, C., "Numerical and Experimental Analysis of Plasma Flow Control Over a Hump Model," in *45th Aerospace Sciences Meeting*, January 8-11, Reno, Nevada, 2007.
- [12] Michael, W., Flint, O. and David, S., "A Parametric Investigation of Plasma Streamwise Vortex Generator Performance," in *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Notre Dame, 2012.
- [13] Ghayour, A., Mani, M., "Experimental investigation of plasma vortex generator in flow control," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2019.
- [14] Berendt, A., Podlinski, J., and Mizeraczyk, J., "Comparison of airflow patterns produced by dbd actuators with smooth or saw-like discharge electrode," *Journal of Physics: Conference Series*, 2011.
- [15] Zhifeng, L., Mingming, Z. and Lianze, W., "Investigation on 3D flow field induced by a plasma actuator with serrated electrode," *Science bulletin*, pp. 481-487, March 2016.
- [16] Zhang, P., Dai, C., Liu, A. and Wang, J., "The effect of actuation frequency on the plasma synthetic jet," *SCIENCE CHINA*, vol. 54, p. 2945-2950, 2011.
- [17] A. Santhanakrishnan, "Characterization and flow physics of plasma synthetic jet actuators," *University of Kentucky*, Kentucky, 2007.
- [18] Jae-San, Y., Jae-Hung, H. and Ho-young, K., "Flow control technology for vibration load reduction," January 2013. [Online]. Available: http://sss.kaist.ac.kr/?page_id=2915.
- [19] Ronald, E. and Philippe, L., "Effect of Plasma Actuator Excitation for Controlling Bypass Transition in Boundary Layers," in *AIAA*, Orlando, Florida, 2010.
- [20] Bal Krishan, M. and Panigrahi, P., "Formation and characterization of the vortices generated by a DBD plasma actuator in burst mode," *Physics of Fluids*, vol. 29, 2017.
- [21] Chi Wai, W., Xiaoqi, C., Qian, P. and Yu, Z., "Effects of plasma actuator generated vortices on a turbulent boundary layer," in *10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10)*, Chicago, USA, 2017.
- [22] H. Chuan, "Plasma slats flaps; an application of plasma actuators for hingeless aerodynamic control," *University of Notre Dame*, Notre Dame, 2008.
- [23] Timothy, N. and Kwong-So, C., "Dielectric-barrier-discharge vortex generators: characterisation and optimisation for flow separation control," *Springer*, vol. 52, no. Springer-Verlag, p. 329-345, 2012.
- [24] Benard, N., Moreau, E. and Balcon, N., "Electric wind produced by a surface dielectric barrier discharge operating over a wide range of relative humidity," in *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2009.
- [25] Rizzetta, D. and Visbal, M., "Effect of compressibility on plasma-based transition control for a wing with leading-edge excrescence," *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*, vol. 31, pp. 156-173, 2017.
- [26] M. Denison, "Compressibility Effects on the Non-Linear Receptivity of Boundary Layers to Dielectric Barrier Discharges," *The University of Texas at Arlington*, TEXAS, 2013.
- [27] C. Rethmel, "Airfoil Leading Edge Flow Separation Control Using Nanosecond Pulse DBD Plasma Actuators," *The Ohio State University*, Ohio State, 2011.
- [28] Little, J., Takashima, K., Nishihara, M., Adamovich, I., and Samimy, M., "High Lift Airfoil Leading Edge Separation Control with Nanosecond Pulse Driven DBD Plasma Actuators," *AIAA*, 2010.
- [29] Frankhouser, M., "Nanosecond Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Flow Control of Compressible Dynamic Stall," *The Ohio State University*, Ohio State, 2015.
- [30] G. Bradley, "Active control of massively separated high speed /base flow with electric arc plasma actuators," *University of Illinois at Urbana*, Urbana, Illinois, 2012.
- [31] W. Matthew, "Nanosecond Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Flow Control of Compressible Dynamic Stall," *The Ohio State University*, Ohio State, 2015.
- [32] L. Kelley, "Airfoil leading and trailing edge separation control using SDBD plasma

- actuators," University of Notre Dame, Notre Dame, 2013.
- [33] Kwing-So, C., Timothy, N. and Richard, D., "Plasma Virtual Actuators for Flow Control," *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, vol. 3, pp. 22-34, 2015.
- [34] Philipp, C. and Markus, J., "Numerical Investigations on Tollmien–Schlichting Wave Attenuation Using Plasma-Actuator Vortex Generators," *AIAA*, pp. 1-7, 2018.
- [35] Liu, Z., Wang, L. and Fu, S., "Study of flow induced by sine wave and saw tooth plasma actuators," *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011.
- [36] Durscher, R. and Roy, S., "Three-dimensional flow measurements induced from serpentine plasma actuators in quiescent air," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, 2012.
- [37] P. Bennani, "Development and optimization of synthetic jets for active flow control," *Isae, Toulouse*, 2011.
- [38] Hikaru, A., Yoshiaki, A., "Flow control using a DBD plasma actuator for horizontal axis wind turbine blades of simple experimental model," in *11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)*, Barcelona, Spain, 2014.
- [39] P. Bowles, "Wind tunnel experiments on the effect of compressibility on the attributes of dynamic stall," *University of Notre Dame, South Bend, PhD Thesis, Notre Dame, March 2012.*

پی نوشت

-
1. Power spectral density (PSD)
 2. Dynamic stall vortex
 3. Technology readiness level (TRL)
 4. Alternative current (AC)
 5. Direct current (DC)
 6. Unsteady or burst mode
 7. Dielectric barrier discharge (DBD)
 8. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)
 9. Transient
 10. NASA energy efficient transport (EET)
 11. Carrier frequency
 12. Excitation frequency
 13. Duty cycle
 14. Electromagnetic compatibility (EMC)
 15. Electromagnetic interference (EMI)
 16. Printed circuit board (PCB)
 17. Streamwise
 18. Spanwise
 19. Plasma synthetic jet actuator (PSJA)
 20. Zero-net-mass-flux (ZNMF)
 21. Electrical breakdown