

دسته‌بندی کاربردی عملگرهای کنترل جریان و چالش‌های موجود در صنعت هوایی

سید آرش سید شمس طالقانی

استادیار پژوهشگاه هوافضا، تهران، taleghani@ari.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۱

چکیده

عملگرها مبدل‌هایی هستند که یک سیگنال الکتریکی را به یک اندازه فیزیکی مطلوب تبدیل می‌کنند. عملگرهای کنترل فعال جریان به‌وسیلهٔ ایجاد یک اغتشاش قابل کنترل الکترونیکی جریان را اصلاح می‌کنند. زمینهٔ کنترل فعال جریان طی دههٔ اخیر شاهد رشد چشمگیر عملگرها بوده است که این سندی بر اهمیت و چالش‌های مربوط به طراحی عملگرهاست. این مقاله چارچوبی برای بحث دربارهٔ ویژگی‌های عملگرها، مشخصات، انتخاب، طراحی و دسته‌بندی آنها در کاربردهای علوم و صنایع هوایی فراهم می‌کند. در مقالهٔ حاضر، اصول کاری عملگرها تشریح و انواع عملگرهای مشهور در جریان‌های سرعت پایین تا سرعت متوسط شامل عملگرهای سیالی، سطح متحرک و پلاسمایی توصیف می‌شوند. همچنین توانمندی‌ها و نواقص اجتناب‌ناپذیر هر کدام از عملگرها و مسیرهای تحقیقاتی آتی، که نیازمند تحقیقات هستند، ارائه می‌شود. تعداد نمونه‌هایی از عملگرهای کنترل فعال جریان که از نمونهٔ آزمایشگاهی به کاربردهای هوایی واقعی انتقال پیدا کرده‌اند اندک است. در اینجا اصول طراحی عملگر و ارزیابی آن به‌منظور انتخاب مناسب عملگر ارائه می‌شود. فناوری‌های مختلف برای آشکارشدن توانایی‌ها و محدودیت‌ها مقایسه می‌شوند. در نهایت سیر طراحی جدید و مسیرهای ممکن تحقیقات آتی شناسایی و بحث می‌شوند.

واژگان کلیدی: عملگر، حسگر، کنترل فعال جریان، جت مصنوعی، عملگر پلاسمایی

۱. مقدمه

در اثر اعمال آن، لایه مرزی، متفاوت از حالت طبیعی رفتار خواهد کرد. فیدلر^۱ نیز تعریفی کامل و جامع به‌صورت زیر ارائه کرد: کنترل جریان یک فرایند یا عملیات است که برحسب نیاز کاربر، برخی از خواص جریان مورد کنترل قرار گرفته و به‌نحوی در جهت مطلوب هدایت می‌شود [۱-۲]. مزایای مهم کنترل جریان عبارت است از: کاهش نیروی پسا، افزایش نیروی برا، افزایش انتقال حرارت سیال، افزایش اختلاط و نهایتاً جلوگیری

کنترل جریان به‌معنای تلاش برای تغییر یا اصلاح برخی رفتارها و ویژگی‌های میدان جریان در جهت خواست و تمایل کاربر است. تاکنون تعاریف بسیاری برای کنترل جریان ارائه شده است که به ظاهر تفاوت‌هایی با هم دارند، اما در نهایت مفهوم تمامی آنها یکسان است. یکی از این تعاریف که توسط فلت^۱ در سال ۱۹۶۱ م برای جریان میان دو دیواره ارائه شد، به این صورت است: کنترل لایه مرزی، شامل هر مکانیزم یا فرایندی است که

از افزایش سروصدا. روش فعال که در مقابل روش غیرفعال قرار می‌گیرد روشی است که در آن، انرژی، جرم یا هر نیروی کمکی دیگر بین محیط و سیال مبادله می‌شود. در مقایسه با روش کنترلی غیرفعال، روش‌های فعال به دلیل امکان غیرفعال کردن آنها در مواقع غیرضروری، قابلیت کنترل جدایش جریان را با کارایی بیشتری فراهم می‌کنند.

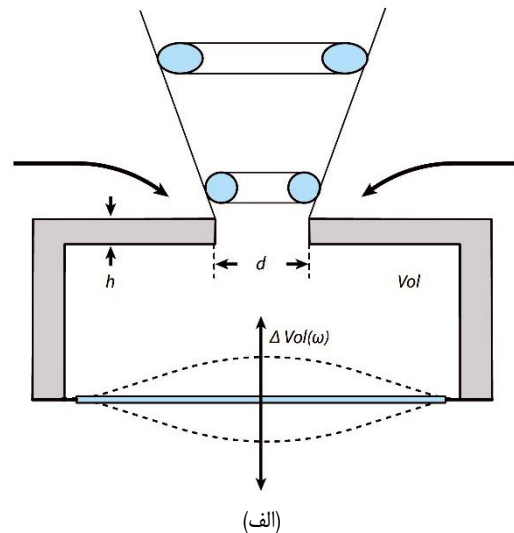
اگر به‌طور عمومی بخواهیم صحبت کنیم، کنترل فعال به اضافه‌شدن انرژی از طریق یک عملگر اطلاق می‌شود [۳]. به‌طور خلاصه، عملگر می‌تواند روشن و خاموش شود و برخی مشخصه‌های عملی می‌توانند تنظیم شوند. چون درک جمعی محققان از مکانیک سیالات بهتر شده است، همه پژوهشگران به سمت اعمال نیرو با دامنه کوچک متمرکز شده‌اند که در آن کاهش توان عملگر، سایز و جرم امکان‌پذیر است [۴]. اما در بسیاری از نمونه‌ها مثل جریان‌های سرعت‌بالا، اعمال نیروی دامنه کوچک مؤثر یک هدف اجتناب‌پذیر است؛ چون عملگرها معمولاً فاقد عرض باند کافی یا توانایی کنترل هستند. کنترل فعال جریان یک زمینه چندموضوعی در حال توسعه روزافزون است که ورای مکانیک سیالات، پژوهشگران را در زمینه‌هایی مثل ریاضی کاربردی، فیزیک و کنترل جذب خود نموده است. مجموعه مهارت‌های مختلف بین محققان در این زمینه‌ها به‌طور تاریخی، منجر به ایجاد موانعی برای پیشرفت شده است. به‌طور نمونه، کنترل جریان فیدبک‌دار، کم‌کم در حوزه کنترل فعال جریان نفوذ کرده است [۵]. علاوه بر مسائل حسگر، کنترل فیدبک‌دار در مقایسه با کنترل حلقه‌باز، الزامات دینامیکی اضافی را روی عملگرهایی که به‌وسیله تجربی کاران اغلب نادیده گرفته می‌شوند، اعمال می‌کند. برعکس، متخصصان کنترل نظری اغلب محدودیت‌های کاربردی سخت‌افزار جاری را نادیده می‌گیرند. در نهایت طراحان مبدل‌های الکترونیکی به‌ندرت برخی جنبه‌های منحصر به فرد تحریک جریان مثل موقعیت قرارگیری عملگر و فیزیک اندرکنش سیال/عملگر را ملاحظه می‌کنند.

در این مقاله سعی شده است مقایسه‌ای کاربردی از عملگرهای پلاسمایی مورد استفاده در صنعت هوایی صورت پذیرد و نقاط قوت و ضعف این عملگرها شفاف شود. با توجه به این اظهارات می‌توان فرصت‌های مطالعاتی و تحقیقاتی آتی را برنامه‌ریزی کرد.

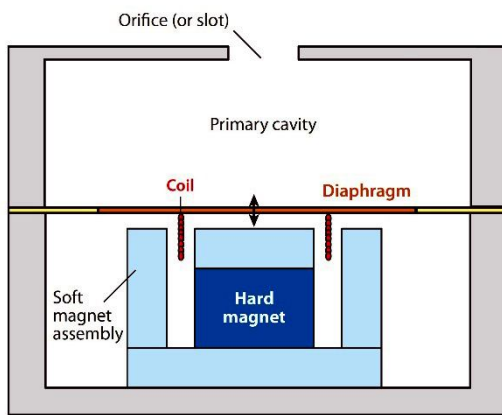
۲. انواع عملگر

انواع مختلفی از عملگرهای گوناگون کنترل جریان وجود دارد و به چندین روش قابل دسته‌بندی است. یک نوع مفید از دسته‌بندی عملگرهای جریان براساس کارکرد در شکل ۱ نمایش داده شده است. رایج‌ترین نوع عملگر کنترل فعال جریان، نوع سیالی یا فلویدیک است که از تزریق جریان یا مکش استفاده می‌کند. در این کلاس، عملگرهای فلاکس جرمی صفر^۳ یا جت مصنوعی [۷] وجود دارد. عملگرهای فلاکس جرمی صفر، به‌طور متناوب سیال را تزریق و می‌بلعد که این کار در یک حالت نوسانی داخل یک شکاف یا اریفیس با سیال عمل محیط و بدون نیاز به هیچ منبع جرم خارجی انجام می‌شود. در شکل ۲ طرحواره‌ای از این عملگر نمایش داده شده است. دیافراگم نشان داده شده در این شکل وقتی توسط یک میدان الکترومغناطیس یا در اثر اعمال جریان الکتریکی به صفحه پیزوالکتریک شروع به نوسان کند، دائماً هوای محیط را به بیرون محفظه داده و در نیم‌سیکل بعد می‌مکد. این سبب ایجاد یک جت مصنوعی می‌شود که در شکل نشان داده شده است. همچنین شکل واقعی این عملگرها به همراه دو نوع روزنه جت خروجی از این عملگرها در شکل ۳ نمایش داده شده است. در مقابل این عملگرها، عملگرهای با فلاکس جرمی غیرصفر قرار دارند که نیازمند چشمه یا چاه سیال هستند و رانش پایا و ناپایا (پالسی) با استفاده از یک شیر [۹]، یک نوسانگر سیال طبیعی [۱۰] و یا ابزار احتراقی رانش [۱۱] اعمال می‌شود. این عملگرها به لحاظ سایز از ابعاد ماکرو تا میکرو جت‌های ابعاد زیر میلی‌متر [۱۲] دسته‌بندی می‌شوند. دو نمونه از این عملگرهای سیالی نوع نوسان ساز سیالی در شکل ۴ نمایش داده شده است. این نوع عملگرها با استفاده از یک مخزن فشرده سیال، تولید جت پالسی می‌کند. این نوع عملگر براساس اثر کواندا عمل نموده و حلقه بازخورد سبب افزایش فشار می‌شود. این افزایش فشار، سبب هل‌دادن جت به سمت دیگر می‌شود و این فرایند حالت سیکیلی خواهد داشت. در نوع دوم که بدون بازخورد است، برخورد دو جت خروجی از مخزن فشرده تولید اندرکنش ناپایدار و الگوهای چرخشی و دارای ورتیسیته می‌کند که دائماً به شکل سیکیلی تغییر موقعیت می‌دهد. کلاس دیگر شامل یک بدنه متحرک داخل یا روی مرز میدان است. اگرچه عملگرهای سیالی معمولاً شامل برخی بخش‌های متحرک هستند، بر خلاف بیشتر

نوسانگرهای سیالی، اصول کاری اولیه آنها تزریق یا مکش سیال است. مقصود از سطح یا شی متحرک، القای موضعی سیال است. یک نمونه نوسانگر، ریبون الکترودینامیکی استفاده شده در آزمایشات کلاسیک صفحه تخت شویبار و اسکرامستاد [۱۳] روی



گذار لایه مرزی لایه ای است. نمونه‌های دیگر لیست شده در شکل ۱ شامل فلپ‌های جنبشی [۱۴-۱۶]، حرکت پریودیک زمانی یک دیافراگم نصب شده روی سطح [۱۷] و سیم نوسانی [۱۸]، المان‌های چرخش سطح [۱۹] و سطوح مورفینگ [۲۰] می‌شود.



شکل ۲. طرحواره‌ای از عملگر جت مصنوعی با دیافراگم پیزوسرامیک و الکترودینامیک [۶]
 (الف) دیافراگم پیزوسرامیک، (ب) دیافراگم الکترودینامیک

کلاس بعدی عملگرهای پلاسمایی است. یکی از روش‌های جدید در زمینه کنترل جریان استفاده از عملگر پلاسمایی است که به وسیله تزریق ممتوم به لایه مرزی، سبب افزایش سرعت ذرات و جلوگیری از وقوع پدیده جدایش می‌شود. ایجاد پلاسمای سطحی به وسیله عملگر پلاسمایی در اثر یک میدان الکتریکی قوی سبب ایجاد یک سرعت موضعی در حد چند متر بر ثانیه می‌شود. تحقیقات و بررسی‌های انجام شده روی این فناوری نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسمایی نتایج بسیار مطلوبی در کنترل پدیده جدایش جریان به ویژه جریان توربوماشین‌های کم‌سرعت به جا گذاشته است که از جمله آنها می‌توان به کنترل جدایش جریان روی پره‌های توربین، جلوگیری از پدیده واماندگی و کاهش صدا در فن‌ها و کمپرسورها اشاره کرد. از جمله ویژگی‌های مهم عملگرهای پلاسمایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۵. قابلیت عملکرد در فشار جو
 ۶. قابلیت عملکرد در سرعت‌های کم و زیاد جریان
 ۷. مصرف کم انرژی
 ۸. کاهش هزینه‌های عملیاتی، تکمیل و تعمیر
- به دلیل مزایای گفته شده در مورد عملگرهای پلاسمایی، امروزه تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از این نوع عملگرها به منظور کنترل لایه مرزی جریان انجام شده و همچنان نیز در حال انجام است. مرور جامعی از عملگرهای پلاسمایی و کاربردهای آنها توسط موراً انجام شده است [۲۱]. مشهورترین نوع عملگرهای پلاسمایی، تخلیه سد دی الکتریکی منفرد^۴ است که فیزیک، طراحی و کاربردهای آن توسط کورک و همکاران [۲۲-۲۳] مرور شده است. عملگرهای پلاسمایی دیگر که پتانسیل مناسبی برای جریان‌های سرعت بالا دارند شامل رشته‌های قوس الکتریکی موضعی [۲۴] و جت جرقه‌ای [۲۵-۲۶] می‌شوند. در شکل ۵ سه نوع رایج عملگرهای پلاسمایی کرونا، تخلیه سد دی الکتریکی منفرد و تخلیه کشویی نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۶ نمونه ای از به کارگیری عملگر تخلیه سد دی الکتریکی منفرد برای کنترل جریان روی

۱. نداشتن قطعات متحرک

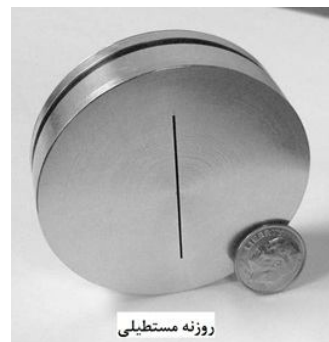
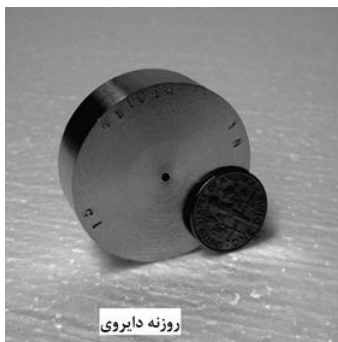
۲. قابلیت پاسخ در محدوده وسیعی از ولتاژها و فرکانس‌ها

۳. تأخیر زمانی بسیار ناچیز

۴. سادگی ساختار

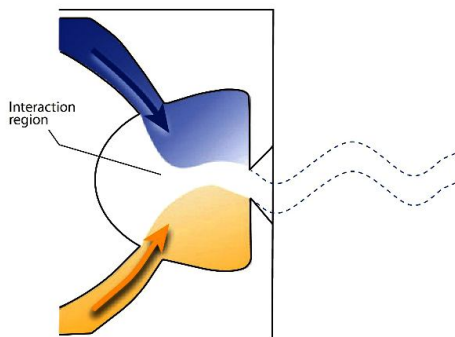
هوای با دانسیته و فشار بالا، خودش را آمادهٔ مجدد به کار در سیکل بعدی می‌نماید. یک سیکل ساده از نحوهٔ کارکرد این عملگر شامل سه مرحلهٔ انتقال انرژی، تخلیه و تازه‌سازی، در شکل ۷ نمایش داده شده است. تصویر نمونه‌ای از این عملگر جت جرقه‌ای در شکل ۸ آمده است. دو کاربرد اصلی عملگرهای جت جرقه‌ای، کنترل جریان مافوق صوت روی حفره‌ای مثل حفره چرخ هواپیما و کنترل جدایش روی بال‌ها و یا بدنه می‌باشد.

یک بال نشان داده شده است. عملگر جت جرقه‌ای یک ابزار دبی جرمی خالص صفر با حالت جامد است که شامل یک محفظهٔ کوچک یا حفره به‌همراه الکترودها و یک اریفیس جت است. فشار بالای محفظه به‌وسیلهٔ گرمایش سریع هوا در داخل جت جرقه‌ای با استفاده از یک تخلیهٔ قوس الکتریکی، خازنی ایجاد می‌شود. تخلیهٔ قوس الکتریکی به‌وسیلهٔ یک جرقه جریان پایین رهاسده با ولتاژ بالا شروع می‌شود. فشار با خروج هوای گرم شده از یک اریفیس، کاهش می‌یابد. این عملگر با کشیدن

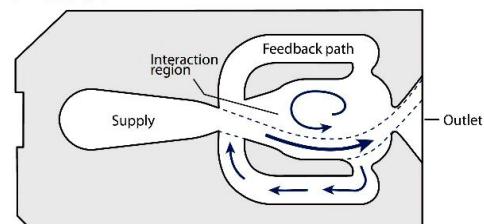


شکل ۳. عملگر جت مصنوعی با دو نوع روزنه خروجی [۸]

b Feedback-free

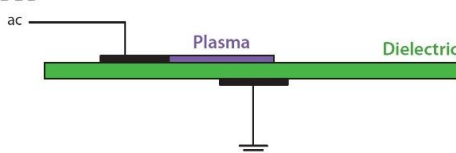


a Feedback

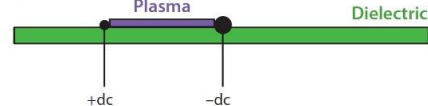


شکل ۴. طرحواره‌ای از دو نوع نوسان‌ساز سیالی دارای بازخورد و بدون بازخورد [۶]

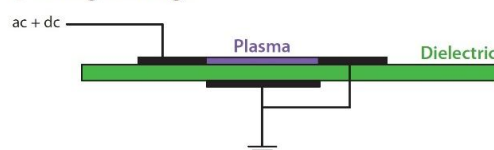
b DBD



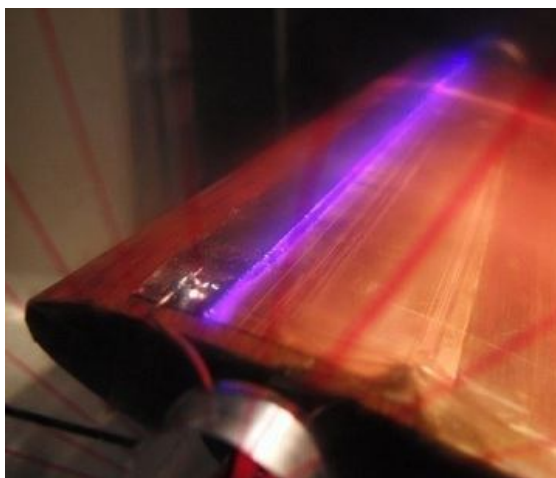
a Corona



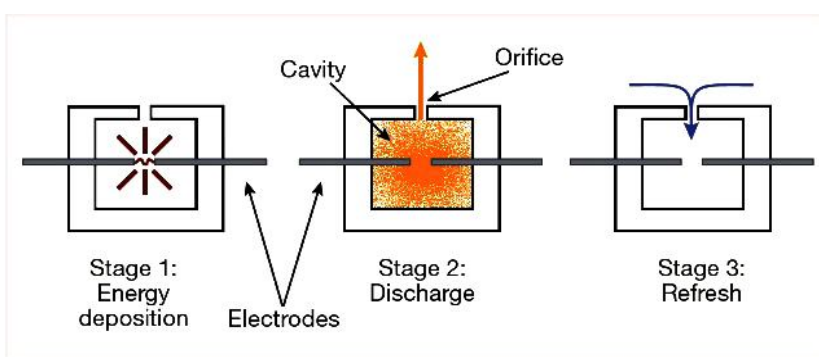
C Sliding discharge



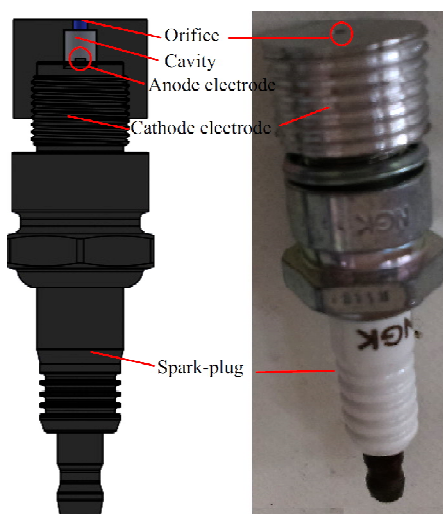
شکل ۵. سه نوع رایج عملگرهای پلاسمایی کرونا، تخلیهٔ سد دی الکتریکی و تخلیهٔ کشویی [۶]



شکل ۶. نحوه قرارگیری عملگر پلاسمایی روی ایرفویل و تشکیل پلازما روی آن [۲۷]



شکل ۷. سیکل کارکرد عملگر جت جرقه‌ای [۲۵]



شکل ۸. تصویر نوعی از عملگر جت جرقه‌ای [۲۸]

که به‌طور ایده‌آل غیرتداخلی هستند، با هم مقایسه می‌کنند. نخست باید یادآور شد که جای ورودی و خروجی در حسگرها و عملگرها عوض می‌شوند. ورودی به یک حسگر ناپایا یک اغتشاش جریان است (به‌طور نمونه نوسانات سرعت) و خروجی

۳. اصول عملگرها

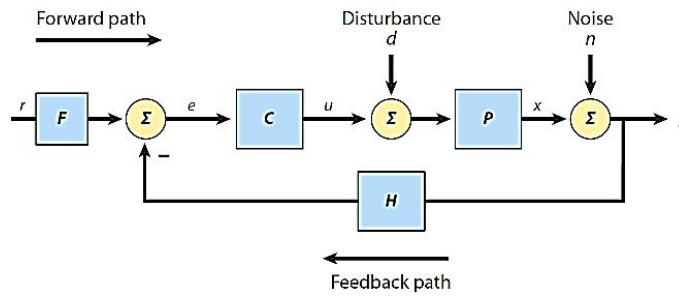
۱-۳. عملگرها در مقابل حسگرها

جدول ۱ مشخصات و مسائل طراحی مربوط به عملگرها، که طبق تعریف در تداخل با جریان هستند، را در مقابل حسگرها،

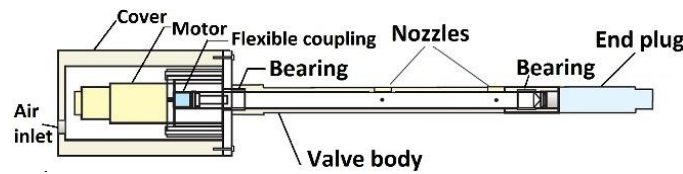
یک کمیت الکتریکی مثل ولتاژ است. برای یک عملگر، یک سیگنال الکتریکی ورودی، تولید یک اغتشاش جریان در خروجی می‌کند. بنابراین بهره عملگر ضرورتاً عکس حساسیت حسگر است. به‌طور نمونه، بهره خروجی یک جت مصنوعی می‌تواند به‌وسیله سرعت بر واحد ولتاژ مقداری شود، در جایی که حساسیت یک حسگر سرعت برحسب ولتاژ خروجی بر واحد سرعت تعریف می‌شود. اگرچه یک حسگر ایده‌آل تنها به کمیت مورد علاقه پاسخ می‌دهد، ممکن است به متغیرهای جریان ورودی دیگر هم حساس باشد. به‌طور نمونه، یک حسگر ممکن است به دما، تداخل الکترومغناطیس یا جنبش و موارد دیگر حساسیت نشان دهد. یک عملگر به‌طور متناوب ممکن است تولید اختلالات پارازیتی مثل تداخل الکترومغناطیس، صوت یا حرارت نماید. یک جنبه منحصر به‌فرد عملگرها، اندرکنش سیال/عملگر است که این مورد را دیکته می‌کند که چطور خروجی فیزیکی عملگرها مثل حرکت سطح یا مومنتوم از طریق سیالی با جریان در حالت خطی یا غیرخطی کوپل می‌شود. اختلالات کوچک می‌تواند ناپایداری‌های جریان را تحریک کند، در جایی که دامنه‌های بزرگ می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای، جریان متوسط و مطابق آن مشخصه‌های پایداری را اصلاح کند [۴]. بسیاری از ترم‌های استفاده‌شده برای مشخص کردن حسگرها به عملگرها هم مربوط می‌شود. در ترم‌های پاسخ دینامیکی، هم حسگرها و هم عملگرها با پاسخ فرکانسی (بزرگی و فاز) و عرض باند مشخص می‌شوند، اما اختلافات مهم و دقیقی هنوز وجود دارد. پاسخ فرکانسی توصیف می‌کند که چطور بهره (برای عملگر)، حساسیت (برای حسگر) و فاز (برای هر دو) برحسب فرکانس در یک سیستم خطی تغییر می‌کند [۵]. عملگرهای غیرخطی تولید یک بهره مختلف برحسب نقشه فرکانسی برای سطوح تحریک مختلف می‌کنند. بسیاری از عملگرهای سیالی و عملگرهای سطح یا شی متحرک که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک پدیده رزونانس را برای تولید یک بهره بزرگ به‌کار می‌گیرند تا صرف انتقال فاز و رفتار غیرخطی کنند. عرض باند یک عملگر به محدوده فرکانسی برمی‌گردد که خروجی وسیله به اندازه قابل قبول بزرگ باشد. این برابر یک حسگر کیفیت بالاست که یک پاسخ فرکانسی تخت روی عرض باند مطلوب مورد علاقه دارد (به‌طور مثال سرعت‌سنج سیم داغ دما ثابت). جنبه دیگر طراحی که اغلب

اشتباه درک شده است، اهمیت پاسخ زمانی است که پاسخ زمانی مشخصه برای یک ورودی مخصوص است (به‌طور مثال پله). ثابت زمانی و تأخیر فاز می‌تواند به یک سیستم خطی ربط داده شود، اما این در یک سیستم غیرخطی، واضح و سراسر نیست. عملگرهای عرض باند بالا در سیستم کنترل فعال جریان مورد نیاز هستند که در آن فرکانس تحریک باید طوری تنظیم شود که تغییر شرایط جریان را تنظیم کند. به هر حال در سیستم‌های کنترل فیدبک (شکل ۹) حسگرها معمولاً برای سیگنال‌های تصادفی فیدبک شایع در جریان‌های آشفتنه استفاده می‌شوند. با فرض اینکه حسگر پاسخ فرکانسی تخت با تأخیر فاز ناچیز دارد، H برابر با یک است. در نتیجه، سیگنال خطا که به کنترلر C داده می‌شود، تصادفی است و شامل چندین جزء فرکانسی است و این موقعیت شبیه سیگنال عملگر u است. این عملگر که بخشی از دستگاه P است، باید قادر باشد تا به یک فرم موج مختلط پاسخ داده شود. این به مفهوم این است که عملگر باید فرکانس کافی و پاسخ زمانی برای تنظیم بزرگی آن، فرکانس و مقدار فاز برای ردیابی u را داشته باشد. به بیانی دیگر، باید قادر به فراهم کردن آبی یک سیگنال تحریک متغیر با زمان شامل چندین مولفه فرکانسی باشد. به‌عنوان مثال، یک شیر روتاری (شکل ۱۰) می‌تواند نیازهای عرض باند را با تغییر سرعت چرخش فراهم کند، اما در هر زمان داده شده شامل فقط یک فرکانس تنها و هارمونیک‌های آن با توجه به اینرسی محدود وسیله می‌شود [۲۹]. نمونه‌های عکس آن شامل پیروالکترونیک یا جت‌های ترکیبی الکتروپدینامیکی - رانشی یا پلاسما هستند که می‌توانند این احتیاجات را فراهم کنند. در طراحی عملگر باید برآورد و ارزیابی ذاتی را لحاظ کنیم. مهمترین مشخصه طراحی عملگر به‌طور مستدل، توانایی کنترل آن یا ماکزیمم بهره در برخی نمونه‌هاست؛ در جایی که عرض باند ممکن است در کاربردهای دیگر مهمتر باشد مثل کنترل حلقه بسته [۵]. متأسفانه این دو نیاز معمولاً در تضاد با هم هستند، که بسیار مشابه عرض باند و بهره شناخته‌شده در آمپلی فایرهای الکترونیکی است. برای یک نوع داده شده، عملگری که بهره بالاتری تولید می‌کند، عرض باند پایین‌تری دارد. به‌طور نمونه، پایپلا و همکاران [۳۰] قانون مقیاس کردن را ارائه کردند که سنجش و ارزیابی بین جابه‌جایی حجمی ماکزیمم و عرض باند در طراحی دیافراگم‌های کامپوزیتی پیروالکترونیک گیره‌دار

استفاده شده در جت‌های مصنوعی را مقاردهی و برآورد می‌کند.



شکل ۹. طرح‌های از دیاگرام بلوکی کنترل بازخورد [۶]



شکل ۱۰. طرح‌های از یک شیر روتاری [۲۹]

یا آزاد $\Delta Vol_{free} = d_a V_{ac}$ است؛ در جایی که $V_{ac} = E_{max} t_p$ به‌وسیلهٔ محصول میدان الکتریکی اجباری و ضخامت پیزوالکتریک محدود می‌شود. به طور مشابه وقتی $\Delta Vol = 0$ است، فشار بلوکه‌شده $P_{blocked} = -d_a V_{ac} / C_{ad}$ است. نقطهٔ کاری عملگر در طول خط داده شده به‌وسیلهٔ معادلهٔ ۱ در جایی بین این دو حد قرار می‌گیرد. هدف طراحی افزایش ΔVol_{free} و $P_{blocked}$ در معرض قیود طراحی ویژه - کاربردی است. ویژگی‌های مطلوب دیگر شامل توان پایین، راندمان بالا، بهای منطقی و استحکام فیزیکی است. عملگر باید الزامات وزنی و سائز برای آن کاربرد ویژه را ارضا کند و به‌طور عمومی وزن کمتر و سائز کوچکتر مطلوب است. علاوه بر این، یک مدل دقیق برای طراحی، مقیاس و طراحی سیستم کنترل کلی مطلوب است. سیفرت [۳۲] روی متریک‌های بی‌بعد دارای اهمیت بحث می‌کند. یکی از آنها شکل عمومی خوبی است:

$$OFM = \left(\frac{F_a^2 U_p}{W_a Power} \right) \quad (2)$$

که F_a نیروی جلوبرنده، U_p سرعت ماکزیمم، W_a وزن سیستم عملگر و $Power$ مصرف انرژی و توان است. شکل عمومی خوبی یا متریک‌های مشابه با آن، یک تابع هدف را که می‌تواند برای بهینه‌سازی طراحی استفاده شود، توصیف می‌کند. به هر حال سخت است که یک متریک عملکردی جهانی

هدف طراحی این است که عملگر بهرهٔ کافی روی محدودهٔ فرکانس‌های تجویز شده را داشته باشد، در این صورت است که عملگر اثر کنترلی مطلوب خواهد داشت. معیار سنجش دیگر، جابه‌جایی عمومی در مقابل نیروی عمومی است. یک عملگر، ماکزیمم جابه‌جایی خروجی را زمانی مهیا می‌سازد که بار دیده‌شده به‌وسیلهٔ عملگر مینیمم شود و عملگر آزاد است. خروجی یک عملگر اغلب وقتی که به ماکزیمم خروجی نزدیک می‌شود، غیرخطی می‌شود. عملگر متناوباً ماکزیمم نیرویش را زمانی که بار ماکزیمم است و عملگر بلوکه شده است تولید می‌کند. برای نشان‌دادن این برآورد، رابطهٔ خطی بین حجم جابه‌جاشده ΔVol با یک دیسک پیزوالکتریک تحت بار با فشار دیفرانسیلی P در مقابل دیافراگم تحریک شده با ولتاژ اعمالی V_{ac} را لحاظ می‌کنیم:

$$\Delta Vol = C_{ad} P + d_a V_{ac} \quad (1)$$

$$C_{ad} = \left(\frac{\Delta Vol}{P} \right)_{V_{ac}=0}$$

$$d_a = \left(\frac{\Delta Vol}{V_{ac}} \right)_{P=0}$$

در جایی که C_{ad} برآورد آکوستیکی مدار کوتاه دیافراگم کامپوزیت و d_a ضریب پیزوالکتریک آکوستیک مؤثر یا ماکزیمم بهره است [۳۱]. وقتی $P=0$ است، جابه‌جایی ماکزیمم

مقیاس‌های لایه مرزی موضعی در مجاورت عملگر را دیکته می‌کند. در نتیجه داریم:

$$C_L = C_L \left(\frac{b}{C}, \frac{\delta^*}{C}, \frac{\delta^*}{\theta}, \frac{U_j}{U_\infty}, \frac{fC}{U_j} \right) \quad (5)$$

تجربه نشان داده است که برخی از پارامترهای بالا می‌توانند اغلب در فرم ضریب مومنتوم جت ریشه مجذور متوسط ترکیب شوند:

$$C_\mu = \frac{\rho_j U_j^2 b}{0.5 \rho U_\infty^2 C} \quad (6)$$

اگر آثار تراکم‌پذیری را به جت یا جریان خارجی اضافه کنیم، به لیست پارامترهای بی بعد اضافه می‌شود. علاوه بر این U_j به وسیله حضور جریان آزاد تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۳۵]. بنابراین C_μ که معمولاً از طریق آزمایش در محیط ساکن تعیین می‌شود، معمولاً اغلب تنها تخمین زده می‌شود. اگر سیگنال تحریک سینوسی نباشد، پارامترهای شکل موج اضافی مهم می‌شوند. در نهایت به این مسئله توجه داریم که محققان مختلف از مقیاس‌های سرعت مختلف برای U_j [۳۶-۳۷] و مقیاس‌های طولی مختلف (به‌طور مثال طول ناحیه جدایش به جای C) استفاده می‌کنند. همه این مسائل و مشخصات پارامتری ناکامل، مقایسه نتایج را سخت می‌کند. این مثال به نیاز آنالیز ابعادی و گزارش کردن دقیق آزمایشات کنترل جریان تأکید دارد.

۴. مقایسه عملگرها

دسته‌بندی‌های مختلفی از عملگرها امکان‌پذیر است. این دسته‌بندی‌ها شامل حلقه باز و حلقه بسته، کاربردی و بر اساس رژیم جریان می‌شود. هر کدام مزیت‌های خود را دارد، اما نوع دسته‌بندی بر اساس شکل ۱ بیشتر مرسوم است. جدول ۲ مزایا و معایب کلیدی عملگرهای معمول را نشان می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

آینده عملگرهای کنترل فعال جریان روشن است، اما تحقیقات روی عملگر کامل ادامه دارد. البته چنین عملگری با توجه به تنوع مسائل طراحی ویژه و کاربرد وجود ندارد. در مقاله حاضر تلاش شد تا مشکلات طراحی عملگرها به‌طور عمومی مطرح

مناسب برای همه عملگرها و همه کاربردها تعریف شود. به‌طور نمونه، عملگرهای پلاسمایی تخلیه سطحی در نانو ثانیه به نظر می‌رسد که کاملاً مؤثر باشد، اما سرعت سیال قابل تشخیص کوچکی را تولید می‌کند [۳۳].

۳-۲. آنالیز ابعادی

این بخش به‌طور مختصر آنالیز ابعادی و ارتباط آن با عملگرهای کنترل جریان را بیان می‌کند. آنالیز ابعادی برای توصیف مناسب آثار عملگرهای کنترل جریان در آزمایشات تونل باد می‌تواند استفاده شود و سپس نتایج را برای کاربردهای مقیاس کامل، مقیاس می‌کند. فقدان آنالیز ابعادی اغلب ارزیابی و برآورد یک عملگر برای توانایی کاربردی را به تأخیر می‌اندازد. نمونه ساده کنترل جدایش با استفاده از عملگرهای فلاکس جرمی صفر برخی از مسائل را نشان می‌دهد. ابتدا کارکرد عملگر در شرایط محیطی رانده شده سینوسی با فرکانس زاویه‌ای $\omega = 2\pi f$ را ملاحظه کنیم [۳۶]. یک عملگر فلاکس جرمی صفر تراکم ناپذیر فرضی که حجم محفظه ΔVol را جابه‌جا می‌کند، یک جت از یک شکاف دوبعدی با ارتفاع b و عرض یا قطر d با یک عدد رینولدزی که تابع سه پارامتر بی‌بعد دیگر است را ترکیب می‌کند.

$$Re_{U_j} = \text{fun} \left(\frac{b}{a}, \frac{\Delta Vol}{d^3}, S \right) \quad (3)$$

در جایی که U_j سرعت ریشه مجذور متوسط^۵ جت مشخصه است [۳۵] و $S = \sqrt{\frac{\omega d^2}{\nu}}$ عدد استوکس است. توجه کنید که

$$\frac{Re_{U_j}}{S^2} = \frac{1}{St}$$

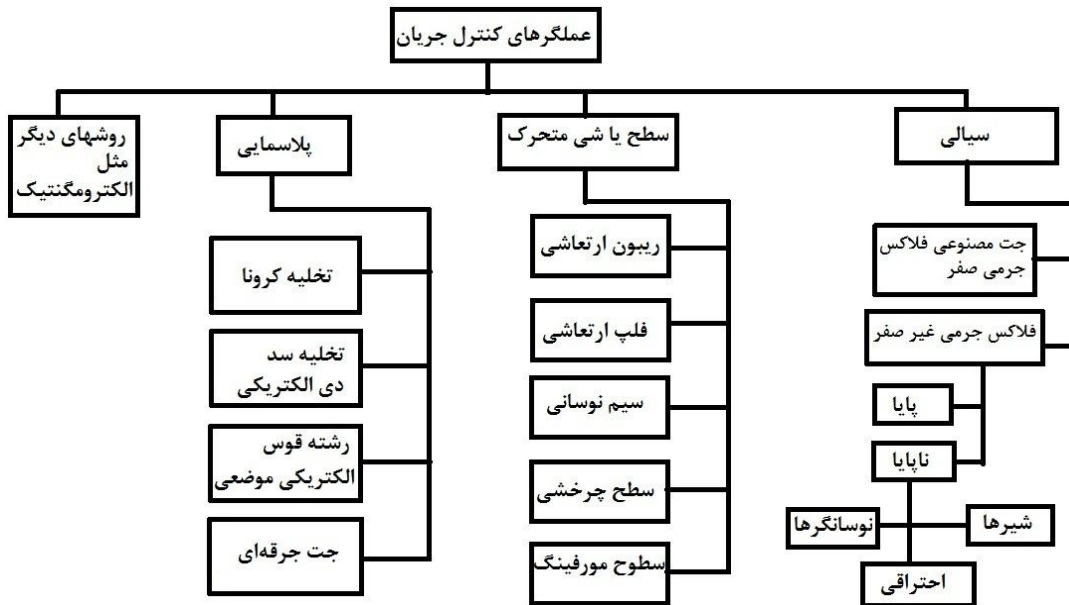
هستند. به‌عنوان چاره‌ای دیگر، طول ضربه بی‌بعد [۳۶] اغلب به جای St استفاده می‌شود اما این پارامترها به هم ربط دارند [۳۴].

$$\frac{1}{St} = \frac{L/d}{2\pi} \quad (4)$$

ضرایب لیفت مبنا یا حالت بدون کنترل C_L و درگ C_D یک ایرفویل در جریان تراکم‌ناپذیر، توابعی از عدد رینولدز وتر $Re_C = \frac{\rho U_\infty C}{\mu}$ و زاویه حمله α هستند. با کنترل عملگر فلاکس جرمی صفر، ضرایب لیفت و درگ توابعی از پارامترهای عملگر، هندسه ایرفویل و عدد رینولدز جریان می‌شوند که

شود تا محققان تشویق شوند که به ارزیابی و برآوردهای ذاتی طراحی عملگرها به شکل وسیع‌تری فکر کنند و چطور عملگر مناسب سیستم خود را انتخاب نمایند. مسیرهای تحقیقاتی آینده حول سه موضوع در حال ارتقا و پیشروی است: الف) توسعه و استفاده از مواد هوشمند بهبود یافته و روش‌های ساخت؛ ب) پایش سلامت عملکرد عملگر برای یکپارچه‌سازی سیستم و سطح مقاوم؛ ج) توسعه ابزارهای طراحی بهینه سلسله‌ای

(عملکرد بر حسب قیمت). این مسئله به تلاش‌های مشترک بین‌رشته‌ای تأکید دارد. محققان کنترل جریان باید بر رویکردهای طراحی فیزیک مینا تمرکز بیشتری داشته باشند و محدودیت‌ها و نواقص عملگرها را به‌خوبی آشکار نمایند. با توجه به بیان مزایا و معایب عملگرها و شرایط کارکردی بیان‌شده می‌توان عملگر کنترل فعال مورد نظر برای کاربرد خاص را مورد ارزیابی و برآورد درست قرار داد.



شکل ۱۱. دسته‌بندی عملگرهای کنترل فعال جریان بر اساس عملکرد [۶]

جدول ۱. مقایسه بین حسگرها و عملگرهای کنترل جریان

عملگرها (باید تداخلی باشند)	حسگرها (در حالت ایده‌آل غیرتداخلی با جریان)
ورودی: سیگنال الکتریکی	ورودی: اختلال جریان؛ مثل فشار، سرعت، تنش برشی و دما
خروجی: اختلال جریان؛ خروجی فیزیکی مثل جابجایی، جرم، مومنتوم، انرژی، صوت، نیروی حجمی، خروجی مطلوب مثل سرعت، فشار و اختلال ورتیسسته	خروجی: سیگنال الکتریکی مثل ولتاژ و جریان
مسائل مورد اهمیت در طراحی پاسخ شبه استاتیکی شامل ماکزیمم خروجی یا جابه‌جایی آزاد، ماکزیمم نیرو، بهره (نسبت خروجی مهندسی به ورودی الکتریکی) و خطی بودن پاسخ دینامیکی شامل پاسخ فرکانسی (بزرگی و فاز)، عرض باند و پاسخ زمانی موارد دیگر: الزامات توان الکتریکی، راندمان الکتریکی، اندازه، قیمت، وزن، استحکام، پاسخ‌دادن به برخی ورودی‌های دیگر مثل ارتعاش، دما، تداخل الکترومغناطیس و غیره معیار ارزیابی و برآورد مثل بهره برحسب عرض باند و جابه‌جایی برحسب نیرو	مسائل مورد اهمیت در طراحی پاسخ استاتیکی شامل ماکزیمم ورودی، مینیمم سیگنال قابل حس، حساسیت (نسبت خروجی الکتریکی به ورودی مهندسی) و خطی بودن پاسخ دینامیکی شامل پاسخ فرکانسی (بزرگی و فاز)، عرض باند و پاسخ زمانی موارد دیگر: الزامات توان الکتریکی، راندمان الکتریکی، اندازه، قیمت، وزن، استحکام، پاسخ‌دادن به برخی ورودی‌های دیگر مثل ارتعاش، دما، تداخل الکترومغناطیس و غیره معیار ارزیابی و برآورد مثل حساسیت برحسب عرض باند و ماکزیمم ورودی برحسب حساسیت

جدول ۲. مختصری از عملگرهای کنترل جریان ناپایای معمول

نوع کلی عملگر	عنوان جزئی عملگر	مزایا	معایب
عملگر سیالی	فلاکس جزئی صفر	عدم نیاز به منبع سیال خارجی، قابل استفاده در همه سازه‌ها و انواع محرک‌ها، مناسب برای کنترل دارای بازخورد	ماکزیمم سرعت تولیدی، پایین و محدود به سرعت‌های زیر صوت پایین و متوسط، دارای رزونانس
	شیره‌های ناپایا	قادر به ایجاد سرعت‌های بالا با پاسخ زمانی سریع یا عرض باند بالا، اما عموماً هر دو با هم امکانپذیر نیست	ممکن است از کنترل دارای بازخورد تبعیت نکند. نیاز به منبع جریان خارجی دارد
	نوسان سازه‌ها	قادر به تولید اغتشاش‌های بزرگ، از محدوده بزرگی از اندازه‌ها و در نتیجه فرکانسها تبعیت می‌کند. پتانسیل توسعه برای کنترل مستقل فرکانس و سرعت وجود دارد	نسخه‌های استاندارد برای کنترل دارای بازخورد مناسب نیستند. نیاز به منبع جریان خارجی دارد.
	احترافی	قادر به تولید اختلالات بزرگ در جریانهای سرعت بالا	در حال حاضر محدود به فرکانسهای نسبتاً پایین (چند صد هرتز)، نیاز به احتراق
سطوح متحرک	فیلپهای بیروالکترونیک	برای محدوده‌های فرکانسی مختلف مورد علاقه طراحی ساده‌ای دارد. می‌تواند تولید ورتیسیت‌های در راستای منظر یا راستای غالب جریان کند. برای کنترل دارای بازخورد مناسب است.	تولید ثابتی از ماکزیمم خمش و عرض باند دارد. حساس به بارهای نیرویی سیالی دارای رزونانس
	حفره‌های فعال	به طور بالقوه برای کنترل دارای بازخورد جریانهای آشفته محدود به دیوار مناسب است.	توسعه بیشتری برای رسیدن به پاسخ فرکانسی و اندازه لازم، نیاز است.
عملگر پلاسمایی	تخلیه سد دی الکترونیک منفرد	قابلیت نصب آسان روی مدل، جرم کوچک، پاسخ زمانی سریع فاقد بخش متحرک	سرعت خروجی محدود نیاز به ولتاژ بالا
	جت جرقه‌ای	همه ابزارهای حالت جامد قادر به تولید اختلالات بزرگ در جریان‌های سرعت بالا هستند.	مشکلاتی که با تداخل الکترومغناطیس سطح آکوستیک و دمای بالا دارد

۶. مآخذ

- [1] M. Gad-el-Hak, *Flow Control*, Cambridge University Press, 2000.
- [2] S. Miranda, Active Control of Separated Flow over a Circular-Arc Airfoil, M.S. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 2-4, May, 2000.
- [3] D. G. MacMynowski, D. R. Williams, *Flow control terminology*, See Joslin & Miller, pp. 59-72, 2009.
- [4] V. Theofilis, *Role of instability theory in flow control*, See Joslin & Miller, pp. 73-114, 2009.
- [5] C. W. Rowley, B. A. Batten, Dynamic and closed-loop control, See Joslin & Miller, pp. 115-48, 2009.

- [6] L. N. Cattafesta, M. Sheplak, Actuators for Active Flow Control, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 43, pp. 247–72, 2011.
- [7] A. Glezer, M. Amitay, Synthetic jets, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 34, pp. 503–29, 2002.
- [8] K. Mohseni, R. Mittal, *Synthetic Jets: Fundamentals and Applications*, CRC Press, 2014.
- [9] A. Seifert, T. Bachar, D. Koss, M. Shepshelovich, I. Wygnanskil, Oscillatory blowing: a tool to delay boundary-layer separation, *AIAA J.*, Vol. 31, pp. 2052–2060, 1993.
- [10] H. Viets, Flip-flop jet nozzle, *AIAA J.*, Vol. 13, pp. 1375–79, 1975.
- [11] T. M. Crittenden, A. Glezer, R. Funk, D. Parekh, Combustion-driven jet actuators for flow control, *Presented at AIAA Fluid Dyn. Conf.*, 31st Anaheim, Calif., AIAA Pap. 2001-2768, 2001.
- [12] F. S. Alvi, C. Shih, R. Elavarasan, G. Garg, A. Krothapalli, Control of supersonic impinging jet flows using microjets, *AIAA J.*, Vol. 41, pp. 1347–55, 2003.
- [13] G. B. Schubauer, H. K. Skramstad, Laminar-boundary-layer oscillations and transition on a flat plate, Tech. Rep., 909, NACA, 1948.
- [14] Y. Katz, B. Nishri, I.J. Wygnanski, The delay of turbulent boundary layer separation by oscillatory active control, *Phys. Fluids A*, Vol. 1, pp. 179–81, 1989.
- [15] L. Cattafesta, S Garg, M. Choudhari, F. Li, Active control of flow-induced cavity resonance, Presented at AIAA Fluid Dyn. Conf., 28th Snowmass, Colo., AIAA Pap. 1997-1804, 1997.
- [16] A. Seifert, S. Eliahu, D. Greenblatt, I.J. Wygnanski, Use of piezoelectric actuators for airfoil separation control, *AIAA J.*, Vol. 36, pp. 1535–1537, 1998.
- [17] C. Kim, W. P. Jeon, J. Park, H. Choi, Effect of a localized time-periodic wall motion on a turbulent boundary layer flow, *Phys. Fluids*, Vol. 15, pp. 265–68, 2003.
- [18] A. Bar-Sever, Separation control on an airfoil by periodic forcing, *AIAA J.*, Vol. 27, pp. 820–21, 1989.
- [19] H. Viets, M. Piatt, M. Ball, Boundary layer control by unsteady vortex generation, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 7, pp. 135–44, 1981.
- [20] C. Thill, J. Etches, I. Bond, K. Potter, P. Weaver, Morphing skins, *Aeronaut. J.*, Vol. 112, pp. 117–39, 2008.
- [21] E. Moreau, Airflow control by non-thermal plasma actuators, *J. Phys. D Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. 605–36, 2007.
- [22] T. Corke, M. Post, D. Orlov, SDBD plasma enhanced aerodynamics: concepts, optimization and applications, *Prog. Aerosp. Sci.*, Vol. 43, pp. 193–217, 2007.
- [23] T. C. Corke, C.L. Enloe, S.P. Wilkinson, Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 42, pp. 505–29, 2010.
- [24] M. Samimy, L. Adamovich, B. Webb, J. Kastner, J. Hileman, Development and characterization of plasma actuators for high-speed jet control, *Exp. Fluids*, Vol. 37, pp. 577–88, 2004.
- [25] S. H. Popkin, T. M. Taylor, B. Z. Cybyk, Development and Application of the Sparkjet Actuator for High-Speed Flow Control, *JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME*, Vol. 32, No. 1, 2013.
- [26] V. Narayanaswamy, L. L. Raja, N. T. Clemens, Characterization of a high-frequency pulsed-plasma jet actuator for supersonic flow control, *AIAA J.*, Vol. 48, pp. 297–305, 2010.
- [27] A. Shams Taleghani, A. Shadaram, M. Mirzaei, Experimental Investigation of Active Flow Control for Changing Stall Angle of a NACA0012 Airfoil Using Plasma-Actuator, *Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal*, Vol. 1, pp. 89-97, 2012.
- [28] M. Seyhan, Y. E. Akansu, F. Karakaya, C. Yesildag, H. Akbiyik, Effect of the duty cycle on the spark-plug plasma synthetic jet actuator, *EPJ Web of Conferences* 114, 02104, 2016.
- [29] K. McManus, J. Magill, Separation control in incompressible and compressible flows using

- pulsed jets, Presented at AIAA Fluid Dyn. Conf., 27th New Orleans, AIAA Pap. 1996-1948, 1996.
- [30] M. Papila, M. Sheplak, L. Cattafesta, Optimization of clamped circular piezoelectric composite actuators, *Sens. Actuators A Phys.*, Vol. 147, pp. 310–23, 2008.
- [31] S. Prasad, Q. Gallas, S. Horowitz, B. Homeijer, B.V. Sankar, An analytical electroacoustic model of a piezoelectric composite circular plate, *AIAA J.*, Vol. 44, pp. 2311–18, 2006.
- [32] A. Seifert, Closed-loop active flow control systems: actuators, *Active Flow Control, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, pp. 85–102., Vol. 95. Berlin: Springer, 2007.
- [33] D. V. Roupasov, A. A. Nikipelov, M. M. Nudnova, A.Y. Starikovskii, Flow separation control by plasma actuator with nanosecond pulsed-periodic discharge, *AIAA J.*, Vol. 47, pp. 168–85, 2009.
- [34] R. Holman, An experimental investigation of flows from zero-net mass-flux actuators, PhD thesis, Univ. Florida, Mech. Aerosp. Eng., 2006.
- [35] R. Raju, E. Aram, R. Mittal, L. Cattafesta, Simple models of zero-net mass-flux jets for flow control simulations, *Int. J. Flow Control*, Vol. 1, pp. 179–97, 2009.
- [36] J. E. Cater, J. Soria, The evolution of round zero-net-mass-flux jets, *J. Fluid Mech.*, Vol. 472, pp. 167–200, 2002.
- [37] B. Smith, A. Glezer, The formation and evolution of synthetic jets, *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp. 2281–97, 1998.

پی نوشت

-
1. Flatt
 2. Fiedler
 3. Zero Net Mass Flux (ZNMF)
 4. Single Dielectric Barrier discharge (SDBD)
 5. Root Mean Square (RMS)