بررسی تجربی تأثیر باد کرونا و محرک پلاسمایی DBD بر رفتار لایه مرزی در حالت استفاده از جریان مستقیم

غلامرضا تطهيرى*	استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، دانشکده فنی و مهندسی
اسماعیل اسماعیل زادہ	استاد، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی مهندسی مکانیک
غلامحسين پوريوسفى	دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی هوافضا
عليرضا دوست محمودى	كارشناس ارشد، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، دانشكده مهندسي هوافضا

چکیدہ

امروزه استفاده از محرکهای پلاسمایی جریان متناوب نسبت به جریان مستقیم، جهت کنترل فعال جریان، متداول تر بوده و تقریباً هیچ کار تحقیقی بر روی پلاسمای جریان مستقیم انجام نگرفته است. در این مقاله با استفاده از یک منبع تغذیه جریان مستقیم و هندسه های گوناگون، خصوصیات پلاسما در هر دو حالت corona و DBD (dielectric barrier discharge) مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از نتایج این پژوهش مشخص شد که جریان القا شده در این نوع محرکها، نسبت به محرکهای جریان متناوب ضعیفتر بوده و دارای مؤلفههای عمود بر جریان نیز میباشد. همچنین جریان القا شده در این نوع محرکها در حالت corona قویتر از حالت DBD میباشد.

واژه های کلیدی: محرک پلاسما، جریان القایی، کرونا، DBD

Experimental Investigation of the Influence of the DC-corona Wind and DC-DBD Plasma Actuator on the Behavior of the Boundary Layer

G. R. Tathiri	Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Zanjan
	Branch, Islamic Azad University, Zanjan,
E. Esmaeilzadeh	Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz
G. Hosein Pouryoussefi	Ph.D., Aerodynamics Lab., Department of Aerospace Engineering, K.N.
	Toosi University of Technology, Tehran
A. R. Doostmahmoudi	M.Sc., Aerodynamics Lab., Department of Aerospace Engineering, K.N.
	Toosi University of Technology, Tehran

Abstract

Nowadays, AC-current plasma actuators are more preferred to the DC-current plasma actuators in active flow control. So far, almost no research work has been done on DC-current plasma actuator. In this paper, using a direct current power supply and different geometries, plasma characteristics of the both corona and DBD, were studied. Using the results of this study, it was found that the induced flow of the DC-current corona is weaker than that caused by AC-current ones, and it has perpendicular components to the flow direction. Also, the induced flow of the DBD actuators is stronger than the corona ones.

Keywords: Plasma actuator, Induced flow, Corona, DBD

[&]quot;نويسنده مكاتبه كننده، آدرس پست الكترونيكي: gh_tathiri@iauz.ac.ir

بررسى تجربى تأثير باد كرونا و محرک پلاسمايى

۱– مقدمه

توسعه طراحی ابزارهای کنترل جریان برای اصلاح کارایی ایرفویلها بر اساس ضرایب برا و پسا، اهمیّت فوق العادهای برای شرکتهای هواپیمایی دارد. روشهای کنترل جریان عمدتاً بر حذف جدایش متمرکز شدهاند. جدایش ممکن است باعث شود که به نوبه خود بر قابلیّت مانور و کنترلپذیری هواپیما تأثیر میگذارد. تلاشها برای تغییر و در نهایت کنترل جدایش، عموماً بر استفاده از یک محرک متناوب خارجی متمرکز هستند. جدایش بطور همزمان توسّط دو مکانیزم ناپایداری مهمتر از آن ناپایداری دنباله که نهایتاً منجر به تشکیل و پرتاب ساختارهای گردابی مقیاس بزرگ در جریان دنباله میشود [1]. مسأله کنترل جدایش لایه مرزی با تکنیک رو به گسترش مسأله کنترل جدایش لایه مرزی با تکنیک رو به گسترش

استفاده از محرکهای الکتروهیدرودینامیکی چندین سال پیش پیشنهاد شد. این محرکها مولکولهای هوا را یونیزه کرده و در طی فرآیند برخورد ذرات باردار در حال حرکت با ذرات خنثی گاز، یک مومنتم محلّی به آنها اضافه میکنند. اساس پديده الكتروهيدروديناميك بر اين استوار است كه شدتت جریانهای الکتریکی موجود به حدّی کم است که نیروهای مغناطیسی در مقایسه با نیروهای الکتریکی بسیار کوچک و قابل صرفنظر کردن هستند. تا کنون انواع مختلفی از محرکها برای کنترل جریان سیال مورد توجّه قرار گرفتهاند که شامل: عايق مانع تخليه الكتريكي (Dielectric Barrier Discharge) [٣و۴]، تخليه روشن مستقيم [٥]، تخليه روشن فركانس رادیویی [۶] و تخلیه شکست الکتریکی رشتهای [۷]، میباشند. ساچومل (Suchomel) و همکارانش [۸]، لیستی از تكنولوژىهاى مختلف پلاسما كه براى كاربردهاى هوايى استفاده می شوند، را تهیه کردهاند. مزیّت عمده محرّکهای الكتروهيدروديناميكي، عدم وجود قطعات متحرّك، زمان پاسخ بسیار کوتاه در حدّ نانو ثانیه و کارایی نسبتاً خوب در تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی می باشد [۹].

محرکهای الکتروهیدرودینامیکی می توانند به سه گروه عمده تقسیم شوند: ابزارهای باد کرونا [۱۹و۱۱]، ابزارهای عایق مانع تخلیه الکتریکی [۱۲و۱۳] و ابزارهای ورقه پلاسما [۹و۴۱و1۵]. در ابزارهای باد کرونا برای جریان گاز، یونیزاسیون به آسانی توسط اعمال یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا بین سیم یا الکترود سوزنی و الکترود صفحهای به وجود میآید. این یونها که توسط نیروی کولمب رانده میشوند، اندازه حرکتی به مولکولهای خنثی اعمال میکنند و در نتیجه یک جریان

حجمی از هوا به وجود میآید. این پدیده (باد یونی یا باد کرونا) میتواند برای افزایش مومنتم به کار رود.

محرکهای پلاسمای عایق مانع تخلیه الکتریکی یکی از انواع جدید محرکهای کنترل جریان برای کاربردهای هوایی چه در سرعتهای پایین و چه در سرعتهای بالا هستند که در حال حاضر نیز در حال توسعه میباشند. پلاسما از طریق اعمال یک میدان الکتریکی قوی به دو الکترود که توسّط یک عایق دی الکتریک از یکدیگر جدا شدهاند، تشکیل میشود [۱۶[۲۷]. میدان الکتریکی قوی، مولکولهای هوا را در ناحیه بالای الکترود عایق شده یونیزه کرده و پلاسمایی را تشکیل میده که از تشکیل پلاسما باعث اعمال یک نیروی بدنی مؤثر بر ذرات هوای محیط میشود. نمایی شماتیک از محرکهای تولید باد کرونا و عایق مانع تخلیه الکتریکی (DBD) در شکل زیر نشان داده شدهاند.



شکل ۱ – مکانیزم ایجاد (a) محرک پلاسمای DBD (b) باد یونی

اگر چه باد کرونا تا به امروز معمولاً از طریق میدان جریان مستقیم ایجاد شده است، ولی اقدامی برای تولید پلاسمای DBD با استفاده از جریان مستقیم نشده است. در این پژوهش، از تکنیک تزریق دود برای آشکارسازی کیفی جریان و از میکرولوله پیتوت و میکرومانومتر برای اندازه گیری کمی سرعت القایی مماسی در لایه مرزی در حالتهای باد کرونا و پلاسما استفاده خواهد شد و جریان القایی لایه مرزی منتجه از طریق آنها را مقایسه خواهیم نمود.

۲- نیروهای الکتریکی وارده بر سیال

مکانیزمهای الکتروهیدرودینامیک میتوانند حرکتهایی برای افزایش آهنگ انتقال جرم در سیستم های تک فازه یا دو فازه به وجود آورند [۱۸]. نیروهای موثّر شناخته شده در این مکانیزمها عبارتند از: نیروی کولمب، نیروی دیالکتروفوریتیک و نیروی الکترواستریکشن [۱۹].

دو حالت ساده برای نحوه توزیع چگالی بار الکتریکی، سانایی تک قطبی و رسانایی اهمی میباشند. همان گونه که ملچر (Melcher) و تیلور (Taylor) [۲۰] اعلام کردهاند بسیاری از پدیدههای EHD را با استفاده از رسانایی اهمی میتوان به درستی مدل کرد. در این روش چگالی کلی جریان J به صورت زیر تعریف میشود:

 $\vec{J} = \sigma \vec{E} + \rho_e \vec{u} + \rho_e \mu_e \vec{E}$ (1)

که در آن جملههای طرف راست تساوی به ترتیب رسانایی، جابجایی و تحرکپذیری یونی را بیان میکنند. نیروی الکتریکی وارده بر مولکولها در حضور میدانهای الکتریکی شامل سه جز است:

$$\vec{f}_{e} = \rho_{e}\vec{E} - \frac{1}{2}E^{2}\nabla\varepsilon + \frac{1}{2}\nabla\left[E^{2}\rho\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)\right]$$
(7)

معادله (۲) توسط ملچر (Melcher) [۲۱]، با روش ترمودینامیکی به دست آمده است. سه جز معادله (۲) سه نوع مختلف از نیروهای موثّر بر ذرّات سیّال را بیان میکند. جز اول، نیروهای موثّر بر بارهای آزاد در حضور میدان الکتریکی (نیروی کولمب) و جمله های دوّم و سوّم نیروی قطبش اعمال شده بر سیّال را بیان میکنند. شکل ۲ چهار نوع از نیروهای وارده بر سیّال دی الکتریک را که ناشی از اعمال میدان الکتریکی ناهمگن میباشند، نشان میدهد [۲۲]. تصویر a نشاندهنده نشان دهنده حرکت انتقالی که معمولاً دی الکتروفورسیس یا دی الکتروفورتیک نامیده میشود، و تصاویر c و b نشاندهنده نیروی الکترواستریکشن هستند.



شکل ۲ – چهار نوع نیروی الکتریکی وارد بر ذرات در میدان الکتریکی [۲۲]

۳- منبع تغذیه جریان مستقیم

منبع تغذیه ساخته شده در این پژوهش میتواند ورودی برق شهری با ولتاژ ۲۴۰۷ -۲۰۰ و فرکانس ۶۰ Hz ۵۰–۵۰ را به خروجی ولتاژ تا مقدار حداکثر ۵۰ kV با فرکانس ریپلی ۱۰۰ هرتز و شدت جریان حداکثری ۲۰ mA تبدیل نماید. نمایی از ترانسفورماتور و مقاومت این دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شكل ۳- (الف) ترانسفورماتور (ب) مقاومت منبع تغذيه مستقيم

۴- هندسه الكترودها

همانطوری که میدانیم چگونگی شکل گیری باد یونی و پلاسما، به میزان زیادی بستگی به هندسه مسأله از جمله نحوه استقرار الكترودها، ضخامت الكترودها و فاصله آنها از يكديگر، شدت و نوع میدان الکتریکی اعمالی به دو الکترود و نوع عایق بین دو الکترود دارد. در این تحقیق، صفحاتی از جنس شیشه معمولی و با ابعاد ۱۰۰ mm در ۲۰۰ mm و با ضخامت ۵ mm جهت نصب الكترودها تهيه شد. جهت ايجاد ميدان الكتريكي، الکترودهایی از جنس ورق چسبی آلومینیوم و به ضخامت ۴۰ میکرون با عرض mm ۵ برای الکترود متصّل به ولتاژ قوی و عرض mm ۲۰ mm برای الکترود متصل به زمین بر روی لبه این صفحه شیشه ای تخت چسبانده شدند. این نمونه ها در دو هندسه با عايق الكتريكي (DBD) و بدون عايق الكتريكي (corona) ساخته شدند، تا بتوان نحوه تشکیل باد یونی و پلاسما را در این دو حالت مقایسه کرد. برای عایق دی الکتریک بین دو الکترود از چسب کپتون استفاده شده است. این دو نمونه در شکل ۴ نشان داده شدهاند.



شكل ۴- هندسه الكترودها براي توليد (الف) DBD (ب) باد كرونا

بررسى تجربى تأثير باد كرونا و محرک پلاسمايى

۵- آشکارسازی جریان القایی

برای آشکارسازی کیفی جریان باد کرونا و پلاسما روی سطح تخت از تکنیک تزریق دود لایه ی استفاده می شود. برای نشان دادن تأثیر وجود میدان الکتریکی بر دود تزریق شده، یک بار آزمایش را در حالت عدم اتصال الکترودها به منبع تغذیه جریان مستقیم (Off) و یکبار دیگر در حالت اتصال الکترودها به منبع تغذیه جریان مستقیم (On) انجام می دهیم. همچنین آزمایش برای هر دو سیستم الکترودهای ساخته شده (بدون عایق الکتریکی و با عایق الکتریکی مابین الکترودها) تکرار می-شود.

ابتدا آزمایشات را برای محرّک بدون وجود عایق دی الكتريك مابين الكترودها (باد كرونا) انجام مىدهيم. با تزريق دود در حالت خاموش بودن محرّک، رشته دود به حرکت کاملاً افقی خود ادامه میدهد تا اینکه از سمت دیگر نمونه خارج شده و از حالت رشتهای خود خارج شود. حال در همین حالت محرّک روشن می شود. با افزایش اختلاف پتانسیل ما بین دو الكترود تا قبل از شكست الكتريكي، مشاهده مي شود كه رشته دود تزریق شده از حالت افقی خود خارج شده و در جهت پایین دست مدل نمونه، يعنى از سمت الكترود متّصل به ولتاژ مثبت به سمت الكترود زمين، شروع به حركت ميكند. اين حركت كه در ادبيّات فن به باد كرونا يا باد يوني معروف است، دقيقاً در امتداد خطوط میدان الکتریکی مابین دو الکترود میباشد. با بالا بردن اختلاف پتانسیل و به محض شروع تخلیه الکتریکی مصرف جریان الکتریکی که قبلاً در حدّ صفر بوده، تا حدود ۱ میلی آمپر بالا رفته و به دلیل تخلیه الکترونها از یک نقطه خاص، باد یونی تضعیف می شود. انحراف رشته دود با اعمال اختلاف پتانسیل ۱۵ kV در شکل زیر کاملاً مشخص شده است.



شکل ۵ – انحراف رشته دود به سمت الکترود زمین در اثر اعمال اختلاف پتانسیل ۱۵ kV در حالت باد کرونا

جهت رؤیت تخلیه کرونا و تشکیل باد یونی، آزمایشات در فضایی کاملاً تاریک و بدون هر گونه روشنایی تکرار میشوند. با افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی مابین دو الکترود تا نزدیکی ولتاژ شکست هوا، هالهای آبی رنگ از الکترود فشار قوی به سمت الکترود زمین تشکیل میشود و بوی زننده اوزون به مشام میرسد. این هاله آبی رنگ همان تخلیه کرونا است و شامل

جریانی از الکترونها و مولکولهای یونیزه شده بین الکترودها میباشد. همانطوری که در شکل ۶ مشخّص است این تخلیه کرونا در امتداد میدان الکتریکی دو الکترود میباشد. با افزایش شدّت میدان الکتریکی اعمالی به الکترودها نهایتاً رژیم تخلیه جزئی یا تخلیه کرونا به رژیم تخلیه مستقیم (تخلیه قوس) از نقاط نوک تیز و دارای انحنای بیشتر تغییر مییابد. این همان شکست عایق دی الکتریک است و در این حالت مصرف جریان الکتریکی بسیار بیشتر میشود. این پدیده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶- تشکیل تخلیه کرونا در فضای ما بین الکترودها با اعمال اختلاف یتانسیل ۱۸ kV



۳۰ kV - شکست عایقی هوا با اعمال اختلاف پتانسیل ۲۰ kV (تخلیه قوس الکتریکی)

در مرحله بعد، همین آزمایشات را برای محرّک با وجود عايق دى الكتريك ما بين الكترودها (DBD) انجام مىدهيم. با افزایش اختلاف پتانسیل ما بین دو الکترود تا قبل از تخلیه الكتريكي (شكست الكتريكي)، مشاهده مي شود كه رشته دود تزریق شده از حالت افقی خود خارج شده و در جهت پایین دست مدل نمونه، يعنى از سمت الكترود متّصل به ولتاژ مثبت به سمت الكترود زمين، شروع به حركت مىكند. با اينكه حرکت رشته دود دقیقاً در امتداد خطوط میدان الکتریکی مابين دو الكترود مىباشد، ولى شدّت حركت آن به اندازه حالت قبلی نیست. بعلاوه، در این حالت، هاله نورانی بنفش رنگ نیز قابل رویت نیست. با بالا بردن اختلاف پتانسیل و به محض شروع تخلیه الکتریکی مصرف جریان الکتریکی که قبلاً در حدّ صفر بوده، تا حدود ۱ میلی آمپر بالا رفته و به دلیل تخلیه الكترونها از يك نقطه خاص، باد يوني تضعيف مي شود. انحراف رشته دود با اعمال اختلاف پتانسیل ۱۸ kV در شکل ۸ کاملاً مشخص شده است.



شکل ۸ – انحراف رشته دود به سمت الکترود زمین در اثر اعمال اختلاف يتانسيل ۱۸ kV در حالت DBD

۶- اندازه گیری سرعت القایی

در این آزمایش برای اندازهگیری سرعت نمیتوان از ابزارهایی چون هات وایر استفاده کرد چراکه به دلیل وجود میدانهای الکتریکی قوی در محدوده آن، امکان تأثیرپذیری دادهها از میدان الکتریکی وجود دارد. بنابراین برای اندازه گیری سرعت القايي، از يک ميکرومانومتر ديجيتال مدل Testo 0560 5126 با دقت + •، ۱ Pa و لوله پيتوت پلاستيکي به قطر خارجی mm و قطر داخلی ۲ mm استفاده شد. برای اندازه-گیری فشارهای کل و استاتیک از دو لوله موئین انعطافپذیر پلاستیکی به قطر خارجی ۱ mm و قطر داخلی ۸ mm استفاده می شود. با قرار گیری این لوله پیتوت بر روی دستگاه تراورس در آزمایشگاه که قابلیّت حرکت در سه بعد و با دقت ۰/۱ mm را دارد، می توان هر گونه سرعتی را در ناحیه پایین دست جریان اندازه گیری کرد. اندازه گیری سرعت با ثابت کردن لوله پیتوت از لبه نمونه تا mm ۱۰ بالاتر از لبه الکترود انجام می شود. نحوه قرار گیری لوله پیتوت برای مدل اول که شامل دو الكترود و يك عايق دى الكتريك مابين أنها (DBD) مى باشد در شکل ۹ مشخص شده است.



شکل ۹- نحوه قرارگیری لوله پیتوت در مقابل مدل نمونه و نحوه اتصال آن به سیستم تراورس در حالت DBD

با قرار دادن این دو مدل ساخته شده در محل آزمایش و اندازه گیری سرعت جریان هوای القا شده توسط آنها تا رسیدن به نقطه شكست عايقي، بيشترين سرعت ايجاد شده توسط هر یک از آنها اندازه گیری شد. این سرعت چه برای مدل اول که شامل دو الکترود و یک عایق دی الکتریک مابین آنها و چه

برای مدل دوم که فقط شامل دو الکترود و بدون عایق دی الکتریک ما بین آنها می باشد، بسیار کم و در حدود کمتر از m/s اندازه گیری شد. این موضوع در صفحه نمایشگر میکرومانومتر در شکل زیر مشخص است.



(ب)

شکل 11- اندازه سرعت القا شده در: (الف) مدل شامل دو الکترود با عايق (ب) مدل شامل دو الكترود بدون عايق

۷- نتیجهگیری

همانطوری که از نتایج آزمایشات مشخص شد، در حالت کلّی سرعتهای القایی ایجاد شده در صورت استفاده از منبع تغذیه جریان مستقیم، در هر دو حالت DBD و corona بسیار کم و در حدود m/s میباشند، اگرچه سرعت ایجاد شده در مدل شامل دو الکترود بدون عایق دی الکتریک مابین آنها، نسبت به مدل شامل دو الكترود با عايق دى الكتريك بيشتر می باشد. در مقایسه، این سرعتها نسبت به سرعتهای القاء شده با منبع تغذیه متناوب فرکانس بالا (در حدود m/s) بسیار کمتر هستند. در هر دو صورت به نظر نمی رسد که این نیروی اعمالی از طریق این ذرّات با سرعتهای پایین بتوانند تأثیر قابلتوجهی را بر سرعت جریان هوای آزاد داشته باشند. درحقیقت، در تولید پلاسما از طریق میدان جریان مستقیم، بحث تعويض قطبها وجود ندارد و بنابراين ميزان يونيزاسيون مولکولها و تولید یون در لحظات ابتدایی به حداکثر میزان خود میرسد و یونهای تشکیل شده بلافاصله بر روی الکترود زمین يا عايق روى أن تجمع ميكنند و ناحيه پلاسما اشباع ميشود. در این پلاسمای اشباع شده جریان بسیار خفیفی از الکترونها و يونها وجود دارد كه عملاً سرعت بسيار كمي را ايجاد ميكند و نمی تواند برای اصلاح جریان بکار برده شود. همانطوری که در آشکارسازی بوسیله دود مشخص شد، این سرعت دقیقاً موازی سطح نمی باشد و دارای مؤلّفه هایی در راستای عمود بر جریان نیز می باشد که باعث آشفتگی جریان در لایه مرزی می شود.

نمادها

- (c/m^2) شار جابجایی الکتریکی (\vec{D}
- \vec{E} (N.m/c) بردار شدت میدان الکتریکی (
 - \vec{J} چگالی کلی جریان الکتریکی(cm/s)

AIAA Journal, vol. 38, Issue 7, pp. 1166-1178, 2000.

[13] Wilkinson, S.P. "Investigation of an oscillating surface plasma for turbulent drag reduction", AIAA Paper 2003-1023, 2003.

[14] Artana, G., Sosa, R., Moreau, E., Touchard, G. "Control of the near wake flow around a circular cylinder with electrohydrodynamic actuators", Exp. Fluids vol. 36, Issue 6, pp. 580-588, 2003.

[15] Sosa, R., Moreau, E., Touchard, G., Artana, G. "Stall control of airfoils at high angle of attack with periodically excited EHD actuators", AIAA Paper 2004-2738, 2004.

[16] Enloe, C.L., McLaughlin, T.E., VanDyken, R.D., Kachner, K.D., Jumper, E.J., Corke, T.C. "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator: Plasma Morphology", AIAA Journal, vol. 42, Issue 3, pp. 589-594, 2004.

[17] Enloe, C.L., McLaughlin, T.E., VanDyken, R.D., Kachner, K.D., Jumper, E.J., Corke, T.C., Post, M., Haddad, O. "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator: Geometric Effects", AIAA Journal, vol. 42, Issue 3, pp. 595-604, 2004.

[18] Owsenek, B.L. "An experimental, theoretical, and numerical investigation of corona wind heat transport enhancement", M.Sc. Thesis, A&M Texas University.

[19] Seyed-Yagoobi, J., Owsenek, B.L. "Theoretical and experimental study of electrohydrodynamic heat transfer enhancement through wire-plate corona discharge", Journal of Heat Transfer, vol. 119, 1997.

[20] Melcher, J.R., Taylor, G.I. "Electrohydrodynamics enhancement of heat transfer and fluid flow", Recovery Systems & CHP, vol.15, Issue 5, pp. 389-423, 1995.

[21] Melcher, J.R. "Continuum electromechanics", Cambridge, Mass, MIT Press.1981.

[22] Seyed-Yagoobi, J., Bryan, J.E. "Enhancement of heat transfer and mass transport in single-phase and two-phase flows with electrohydrodynamics", Advances in Heat Transfer, vol. 33, pp. 95-186, 1999.

$$ho_e$$
 چگالی موضعی بار الکتریکی حجمی (c^m^3) چگالی موضعی بار الکتریکی حجمی $(c^2/N.m^2)$ \mathcal{E}_0 σ ضریب گذردهی فضای آزاد یا خلار $(c^2/N.s)$ σ ضریب قابلیت هدایت الکتریکی $(c.m^3/N.s)$ μ_e

مراجع Wu.

[1] Wu, J.Z., Lu, X.Y., Denny, A. G., Fan, M., Wu, J.M. "Post Stall Flow Control on an Airfoil by Local Unsteady Forcing", J. Fluid Mech., vol. 371, pp. 21-58, 1998.

[2] Corke, T.C., Post, M.L. "Overview of Plasma Flow Control: Concepts, Optimization, and Applications", AIAA Paper 2005-563, 2005.

[3] Corke, T.C., Post, M.L., Orlov, D.M. "Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications", Review Article: Exp. Fluids, vol. 46, pp. 1-26, 2009.

[4] Roth, J.R. "Aerodynamic Flow Acceleration Using Paraelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma", Physics of Plasmas, Vol. 10, Issue 5, pp. 2117-2126, 2003.

[5] Kimmel, R.L., Hayes, J.R., Menart, J.A., Shang, J. "Effect of Surface Plasma Discharges on Boundary Layers at Mach 5", AIAA Paper 2004-0509, 2004.

[6] Merriman, S., Ploenjes, E., Palm, P., Admovich, I. "Shock Wave Control by Nonequilibrium Plasmas in Cold Supersonic Gas Flows", AIAA Journal, vol. 39, Issue 8, 2001.

[7] Samimy, M., Adamovich, I., Webb, B., Kastner, J., Hileman, J., Keshav, S., Palm, P. "Development and Characterization of Plasma Actuators for High Speed Jet Control", Exp. Fluids, vol. 37, Issue 4, pp. 577-588, 2004.

[8] Suchomel, C., Van Wie, D., Risha, D. "Perspectives on Cataloguing Plasma Technologies Applied to Aeronautical Sciences", AIAA Paper 2003-3852, 2003.

[9] D'Adamo, J., Artana, G. Moreau, E., Touchard, G. "Control of the airflow close to a flat plate with electrohydrodynamic actuators", ASME Paper 2002-31041, 2002.

[10] Colver, G., El-Khabiry, S. "Modeling of DC corona discharge along an electrically conductive flat plate with gas flow", IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 35, Issue 2, pp. 387-394, 1999.

[11] Noger, C., Chang, J.S., Touchard, G. "Active controls of electrohydrodynamically induced secondary flow in corona discharge reactor", in: Proceedings of the Second International Symposium on Plasma Technology in Pollution Control, Bahia, pp. 136-141,1997.

[12] Roth, J.R., Sherman, D. "Electrohydrodynamic flow control with a flow discharge surface plasma",