

کنترل جریان هوا در لایه مرزی با استفاده از محرک تخلیه سد دی الکتریک

جعفری، محمد جواد^۱، صفری، مینا^۲، احمدی زاده، یدالله^۳ و شگری، بابک^۴

۱- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده بهداشت

۲- دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

۳- دانشگاه هوایی شهید ستاری، دانشکده علوم پایه

۴- دانشگاه شهید بهشتی، گروه فیزیک و پژوهشکده لیزر و پلاسما

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۸/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۲/۱۶)

چکیده

محرک‌های پلاسمایی آبرودینامیک، قابلیت خود را به عنوان یک ابزار کنترل جریان در کاربردهای متفاوت، نشان داده‌است. مطالعه حاضر نتایج یک طرح ابتکاری را ارائه می‌دهد که در آن از یک منبع تغذیه برای تولید جریان ولتاژ بالا (بیش از ۸ کیلو ولت) و در بسامد بالا (بیش از ۱۰ کیلوهرتز) استفاده شد. سپس این جریان برای یونیزه کردن هوای راکد در فشار اتمسفری در سطح یک قطعه محرک پلاسمایی به کار برده شد. پیکربندی محرک پلاسمایی مورد استفاده در این مطالعه بسیار ساده و شامل دو الکتروود بود که به‌طور نامتقارن چیده شدند. یکی از الکتروودها در معرض هوای محیط و دیگری در طرف دیگر ماده دی الکتریک قرار گرفت. وقتی یک ولتاژ متناوب بالا اعمال می‌شد، تخلیه پلاسمایی روی سطح عایق، بالای الکتروود عایق شده ظاهر می‌گردید و تکانه هدایت شده به درون هوای محیط جفت می‌شد. مقدار جفت شدگی تکانه در تغییر اساسی جریان هوا روی سطح محرک مؤثر بود. جفت شدگی تکانه یک جریان هوای القایی تولید می‌کرد که روی دو طرف لایه دی الکتریک کشیده می‌شد. این جفت شدگی، سرعت هوا را در لایه مرزی از مقدار صفر افزایش می‌داد و باعث اصلاح جریان هوا در لایه مرزی می‌گردید. در این مطالعه سرعت جریان القایی در غیاب جریان هوا اندازه گیری شد. این سرعت القایی را می‌توان به‌وسیله لوله پیتوت اندازه گرفت. در این پژوهش اثر بسامد و جنس ماده دی الکتریک بر میزان افزایش سرعت القایی بررسی شد. نتایج نشان داد که در یک بسامد بهینه (در این مطالعه فرکانس ۷/۵ کیلوهرتز) سرعت جریان القایی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. نتایج همچنین نشان داد که سرعت القایی در ارتفاع ۰/۵ میلی متری بالای دی الکتریک پلکسی گلاس به ۵ متر بر ثانیه و در تفلون نزدیک به ۶ متر بر ثانیه می‌رسد. بنابراین ثابت دی الکتریک در میزان سرعت القایی نقش قابل توجهی ایفا می‌کند. وزن کم، کوچک بودن اندازه، عدم نیاز به اجزای متحرک، قابلیت اطمینان بالا، پایین بودن قیمت، پهنای باند بالا، پاسخ سریع و افزایش چالاکی آبرودینامیکی جزو مزایای عمده قطعه کنترل جریان محرک پلاسما نسبت به قطعات کنترل جریان سنتی است.

کلمات کلیدی: کنترل جریان الکترویدرودینامیکی، تخلیه سد دی الکتریک سطحی، محرک پلاسمایی، جریان هوای القایی

مقدمه

که از رویش عبور می‌کند ترک کند، جدایی لایه مرزی اتفاق می‌افتد. یکی از علل عمده جدایش لایه مرزی وجود گرادیان فشار معکوس است. زمانی که تکانه سیال در لایه مرزی به نقطه صفر کاهش می‌یابد آن وقت لایه مرزی از سطح جدا می‌شود. این پدیده عمدتاً نامطلوب بوده و باعث تلفات انرژی، کاهش برآ و پایین آمدن کارایی سامانه می‌شود که می‌تواند منجر به واماندگی^۳ مقاطع

هنگام عبور یک شیء از میان یک سیال و یا سیال از روی یک جسم، در اثر نیروهای گران‌رو^۱ در نزدیک سطح جسم، لایه نازکی از سیال (لایه مرزی) تشکیل می‌شود که سرعت آن از صفر تا مقدار آن در جریان آزاد سیال تغییر می‌کند. با توجه به مقدار عدد رینولدز، لایه مرزی می‌تواند خطی یا آشفته باشد. زمانی که لایه نازکی از سیال سطح جسمی را

۱- دانشیار

۲- کارشناس ارشد

۳- عضو هیئت علمی - دانشور

۴- استاد و نویسنده پاسخگو، تلفن: ۰۲۱-۲۲۴۳۱۷۷۳، فکس: ۰۲۱-۲۲۴۳۱۷۷۵، پست الکترونیک: B-shokri@sbu.ac.ir

آیرویدینامیکی^۴ شود. بدین ترتیب راهبردهای کنترل جریان بر تصحیح مکان جدایش لایه مرزی و کاهش اثرات تولید شده توسط این پدیده تمرکز دارد [۱]. بیشتر تلاش‌ها و تحقیقات در طراحی سطوح آیرویدینامیکی و هیدرویدینامیکی بر این نکته تمرکز دارد که جدایی جریان را به تعویق انداخته و جریان موضعی را تا حد ممکن پیوسته نگه دارد. این روش‌ها که در زمینه اداره و کنترل جریان‌های سیال در موقعیتی با خواص مطلوب، فعالیت می‌کند و کاربرد دارد کنترل جریان اطلاق می‌شود و عمدتاً به دو نوع کنترل غیر فعال جریان و کنترل فعال جریان تقسیم بندی می‌شود [۲].

کنترل‌های غیرفعال جریان مانند نوارهای لایه مرزی، عناصر ناهموازی، شیپوره‌های^۵ افشانک^۶ و اغتشاشات سطحی به انرژی خارجی نیاز ندارد، در حالی که کنترل فعال جریان همچون تحریک آکوستیکی، مکش و وزش^۷ پالسی یا پیوسته، حرکت سطحی و محرک‌ها به انرژی خارجی نیاز دارد. مزیت کنترل‌های فعال جریان قابل کنترل بودن آن‌ها است که می‌تواند در مواقع لزوم خاموش و روشن شود. در سال‌های اخیر، کنترل فعال جریان مورد علاقه پژوهشگران بسیاری بوده است. هدف اصلی استفاده از محرک‌ها در جریان حول مقاطع آیرویدینامیکی، به تعویق انداختن واماندگی با استفاده از تحریکات ثابت^۸ یا تحریکات متغیر^۹ است [۲].

در تحریکات ثابت، هدف، اعمال تکانه اضافی به سیال عقب مانده درون لایه مرزی و در نتیجه تأخیر در جدایش جریان است. و در تحریکات متغیر، یا به عبارتی تحریک دینامیکی، تکانه تناوبی به لایه‌های سیال در نزدیکی سطح ایرفویل افزوده می‌شود [۲].

محرک‌های پلاسمایی با اضافه کردن تکانه به جای جرم به جریان هوای لایه مرزی، جریان هوا را تصحیح می‌کنند. اساس کنترل جریان الکترو هیدرویدینامیکی^{۱۰} (EHD)، شارش توان از منبع تغذیه رادیویی^{۱۱} (RF) به میدان الکتریکی RF سپس یون‌های پلاسما و نهایتاً به گاز خنثای زمینه، از طریق برخوردهای لورنتسی است [۳]. قطعات کنترل جریان تخلیه سد دی‌الکترونیک^{۱۲} (DBD) که با عنوان «محرک‌های پلاسمایی» شناخته می‌شوند در ده سال گذشته به‌خاطر قابلیت‌ها و توانایی بالقوه‌شان در زمینه کنترل فعال جریان به‌شدت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این

قطعات شامل دو الکتروود است که توسط یک ماده دی‌الکترونیک از هم جدا می‌شوند. معمولاً یکی از الکتروودها در معرض هوا قرار گرفته و الکتروود دیگر با ماده دی‌الکترونیک کاملاً پوشانده می‌شود. زمانی که یک ولتاژ بالای AC به الکتروود روباز اعمال می‌شود هوای روی محرک یونیزه شده و «پلاسما» روی ناحیه الکتروودی که با دی‌الکترونیک پوشانده شده تشکیل می‌شود. مزایای این قطعات عبارت است از الکترونیک بودن آنها بدون داشتن اجزای متحرک، توانایی پاسخ بسیار سریع، جرم بسیار کم، توان ورودی کم و توانایی شبیه‌سازی آسان اثر آن‌ها در حل کننده‌های عددی جریان [۴].

یکی از اجزای مهم محرک‌ها، دی‌الکترونیک بکار رفته در آنهاست که دچار تلفات می‌شود [۵]. تلفات دی‌الکترونیک را با انتخاب درست ماده دی‌الکترونیک می‌توان حداقل کرد. هرچه ثابت دی‌الکترونیک بیشتر باشد، انرژی الکتروستاتیکی که می‌تواند در واحد حجم ذخیره شود بیشتر است و گرمایشی که وقتی میدان‌های الکتریکی RF برعکس می‌شوند می‌تواند رخ دهد بزرگتر است. مقادیر زیاد شدت شکست دی‌الکترونیک نسبی مواد برحسب کیلوولت بر میلی‌متر، نشان می‌دهد که سدهای دی‌الکترونیک سبک و نازک، نسبت به دی‌الکترونیک‌های حجیم و ضخیم‌تر کم اتلاف بوده و گرمای کمتری تولید می‌کنند [۳]. تاکنون مشخص نشده که این تلفات توان دی‌الکترونیک، در محرک‌های پلاسمایی در حد توان ورودی به پلاسماست یا از آن بیشتر است.

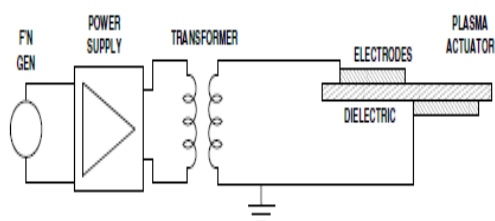
چگالی انرژی الکتروستاتیک انتگرال‌گیری شده روی زمان و فضا در یک دی‌الکترونیک با رابطه ۶ داده شده است [۶]:

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T \int \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2(x, y, z, t) dx dy dz dt \quad (1)$$

رابطه کلی توصیف کننده توان دی‌الکترونیک در یک میدان الکتریکی HV مطابق رابطه ۲ است:

$$P = U_{rms}^2 \frac{2\pi f A}{s} \epsilon_r \epsilon_0 t g \delta \quad (2)$$

صوتی و یک باتری DC است. طرح مدار منبع تغذیه در شکل ۱ نشان داده شده است. این مجموعه قادر است ولتاژی بالغ بر ۸ kV را با بسامدی تا چند ده کیلوهرتز به سیستم تحویل دهد. علاوه بر هزینه پایین این سامانه، حمل و نقل آسان، نگهداری و رفع عیب، جایگزین کردن ساده اجزاء آن و پارامترهای کارکردی قابل قبول آن از مزیت‌های عمده این دستگاه است.



شکل ۱- طرح مدار منبع تغذیه

۲- تقویت کننده‌های صوتی

تقویت کننده‌های صوتی ۳۰۰ واتی برای تقویت ولتاژ ورودی از یک مولد سیگنال که در اینجا یک فانکشن ژنراتور است و می‌تواند سه شکل موج در بسامد ۱ Hz تا ۱ MHz تولید کند، به کار می‌رود. این تقویت کننده مدل Sierra PLUS 502 است و یک خروجی دو کاناله دارد که از هر کانال می‌توان یک سیم پیچ را تغذیه کرد. مدار مدوله‌سازی پهنای پالس (PWM) که برای حداقل کردن تلفات الکتریکی درون هر تقویت کننده استفاده شده با کاهش قابل ملاحظه مصرف توان، آنها را از نظر زیست محیطی سودمند می‌سازد.

۳- سیم‌پیچ‌های احتراق خودرو

سیم‌پیچ‌های احتراق خودرو نیز به همانند مبدل‌های ولتاژ بالا برای تقویت خروجی ولتاژ از تقویت کننده‌های صوتی به کار گرفته می‌شوند. شکل موج ولتاژ خروجی به وسیله یک حسگر که به دستگاه نوسان نگار وصل شده اندازه گیری می‌شود.

۴- باتری DC

در این آزمایش از باتری ۱۲ ولتی DC که در اتومبیل‌ها به کار می‌رود برای روشن کردن تقویت کننده صوتی استفاده شد. این باتری‌ها با میزان آمپرساعتی که می‌توانند

در رابطه ۲، A مساحت الکتروود برحسب مترمربع، S ضخامت الکتروود برحسب متر، f بسامد برحسب هرتز، P توان تلف شده دی‌الکتریک برحسب وات، $tg(\delta)$ ضریب اتلاف ماده دی‌الکتریک، U_{rms} ولتاژ ریشه میانگین مربع دوسر دی‌الکتریک برحسب ولت و ϵ_r, ϵ_0 به ترتیب نفوذپذیری فضای آزاد و نسبی ماده دی‌الکتریک برحسب فاراد برمتر است [۶].

از آنجا که $E = \frac{U}{s}$ ، که در آن E میدان الکتریکی برحسب ولت بر متر است، برای توان تلف شده در دی‌الکتریک رابطه ۳ را داریم:

$$P_V = 2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 tg \delta E^2 \quad (Wm^{-3}) \quad (3)$$

طبق رابطه ۳ اتلاف توان با بسامد متناسب است که در حالت کلی می‌توان رابطه ۴ را نوشت:

$$P_V = B \times f \times V^2 \quad (Wm^{-3}) \quad (4)$$

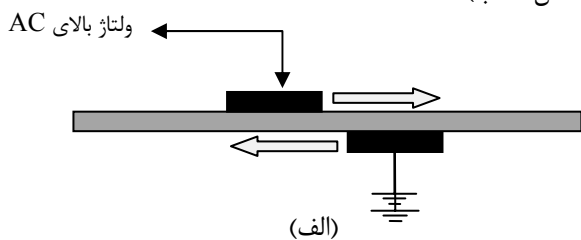
که در رابطه ۴، B ثابت تناسب است.

وسایل مورد نیاز برای آزمایش

۱- منبع تغذیه

به‌خاطر وجود یک سد دی‌الکتریک بین الکتروودها، اعمال ولتاژ بالای AC به آنها الزامی است. بنابراین مهمترین مرحله تولید پلاسما منبع تغذیه است که باید به‌گونه‌ای طراحی شود تا قابلیت تولید ولتاژی بیش از ۱/۵ kV در بسامدهای بالاتر از یک کیلو هرتز را داشته باشد. یکی از روش‌های تولید چنین سیگنالی استفاده از پاورترونها، گران‌قیمتی است که به ترانسفورمرهای سنگینی متصل می‌شوند و باید آنها را در روغن نگهداری کرد. به علت بالا بودن هزینه این منابع تغذیه، تصمیم به تولید یک مدل ساده‌تر و ارزانتر گرفته شد. منبع تغذیه‌ای که برای ایجاد تخلیه پلاسمای سد دی‌الکتریک در این کار استفاده شده است با استفاده از طرح پیشنهادی در پایان نامه یاداف [۷] برای اولین بار در آزمایشگاه پلاسمای پژوهشکده لیزر و پلاسما طراحی و ساخته شد. اجزای عمده این منبع شامل سه مجموعه سیم‌پیچ احتراق خودرو، تقویت کننده‌های

در شکل (۳-الف) ملاحظه می‌شود قطعه محرک پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) یک پیکربندی نامتقارن دارد. این محرک شامل دو الکتروود تخت است که روی دو طرف یک صفحه دی‌الکتریک به‌طور هم‌سطح چسبانده شده‌است. یکی از الکتروودها توسط یک ولتاژ بالای AC (شکل موج سینوسی) تحریک شده و الکتروود دیگر اتصال زمین می‌شود. کمی بالاتر از آستانه ولتاژ اشتعال، یک ورقه پلازما روی دو طرف دی‌الکتریک ظاهر می‌شود، وجود ذرات باردار در پلازما و برخورد‌های آنها با مولکول‌های هوا، باعث انتقال تکانه به مولکول‌های هوا شده در نتیجه یک باد الکتریکی روی هر دو سمت دی‌الکتریک تولید می‌شود (شکل ۳-ب).



شکل ۳-الف) قطعه محرک پلاسمای دی‌الکتریک؛ نمای طرح از جهت باد الکتریکی القایی، (ب) تصویر از پلاسمای تولید شده توسط DBD روی یک ورقه پلی‌کربنات

روش اندازه‌گیری سرعت جریان القایی

برای بررسی عملکرد محرک باید سرعت باد الکتریکی تولید شده توسط پلازما را اندازه‌گیری کرد. برای مطالعه پارامتری روی محرک، اندازه‌گیری سرعت جریان القایی در قسمت بالای سر محرک انجام می‌شود. در ابتدا برای انجام این نوع اندازه‌گیری‌ها با استفاده از یک حسگر فشار کل ساخته شده از شیشه که به یک میکروفشارسنج^{۱۴} نوع کوفرپروفساتز وصل است، اختلاف فشار ایجاد شده روی سطح اندازه‌گیری می‌شود. این سامانه اندازه‌گیری شبیه به سامانه لوله پیتوت^{۱۵} است اما چون لوله پیتوت فلزی است و در صورت نزدیک شدن به تخلیه پلازما امکان جرقه زدن وجود دارد به‌جای آن یک لوله موئین شیشه‌ای به‌کار

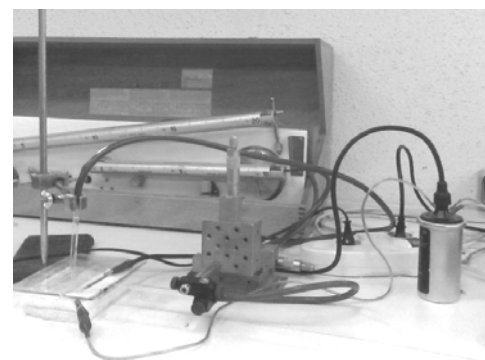
تحویل دهند، مشخص می‌شوند که به معنی بار تخلیه اندازه‌گیری شده برحسب آمپر است. این میزان برای باتری مورد استفاده در اینجا ۶۵ آمپر ساعت است. چون ممکن است بعد از مدتی کارکردن، باتری تخلیه شود بنابراین، برای باردار کردن باتری از یک دستگاه بارگذار استفاده می‌شود.

چیدمان آزمایش

نحوه اتصال اجزاء منبع تغذیه در شکل ۲ (الف و ب) نشان داده شده است. منبع تغذیه شامل سه قسمت است: قسمت اول فانکشن ژنراتور و باتری DC، قسمت دوم تقویت کننده صوتی و قسمت سوم سیم‌پیچ مبدل احتراق خودرو. در ابتدا یک سیگنال از فانکشن ژنراتور به تقویت کننده صوتی که با یک باتری ۱۲ ولتی DC روشن می‌شود، فرستاده می‌شود. چون تقویت کننده دو کانال دارد از هر کانال آن می‌توان یک سیم‌پیچ را تغذیه کرد ولی در این‌جا به علت استفاده از یک سیم‌پیچ از حالت پل تقویت کننده استفاده کردیم و در نهایت، سیم‌پیچ مبدل خودرو یک سیگنال ولتاژ بالا تولید می‌کند که ولتاژ RF لازم برای محرک‌ها را روی صفحه پلازما به‌وجود آورد.



(الف)



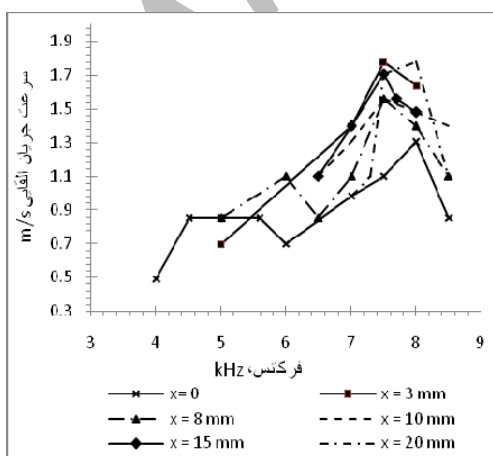
(ب)

شکل ۲- نحوه اتصال اجزاء منبع تغذیه

حال دود، پشت سر الکتروود فعال قرار داده شد و مشاهده گردید که دود به شدت پراکنده و به سمت جلو و کمی به سمت پایین کشیده می‌شود. این بار هویه مولد دود جلوی محرک قرار داده شد (البته با فاصله چون با نزدیک شدن به تخلیه امکان جرقه زدن وجود داشت) و اثری از دود دیده نشد زیرا دود در جهت باد قرار گرفته و پراکنده و محو شده بود. در نتیجه همان‌طور که از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته انتظار می‌رفت جریان القایی از طرف الکتروود فعال به الکتروود زیرین است. در ادامه به بررسی اثر عوامل مختلف ونتایج حاصل از تغییرات آنها بر داده‌های آزمایش می‌پردازیم.

۱- بررسی اثر بسامد

برای بررسی اثر بسامد تحریک روی مقدار سرعت جریان القایی از یک صفحه پلی‌کربنات به ضخامت ۲ mm به جای دی‌الکتریک و ورق‌های مسی به پهنای ۵ mm با ضخامت ۰/۱ mm به جای الکتروودها و شکاف ۳ mm بین الکتروود فعال و الکتروود اتصال زمین استفاده شد. شکل موج ولتاژ اعمالی AC سینوسی بوده و با صرف‌نظر از افت و خیزهای آن می‌توان آن را تقریباً ثابت فرض کرد. در این رشته آزمایش‌ها تمام پارامترها به‌جز بسامد ثابت بود و اندازه‌گیری‌های سرعت با استفاده از لوله پیتوت در فواصل مختلف (\bar{X}) از لبه الکتروود فعال و در ارتفاعات (Y) مختلف بالای سر محرک انجام شد و اطلاعات مربوط به فشار و از طریق آن سرعت جریان بدست آمد.



نمودار ۱- اثر بسامد تحریک روی سرعت جریان القایی در ارتفاع ۱ mm به ازای x های مختلف از لبه الکتروود

می‌رود که توسط یک لوله لاستیکی به میکروفشارسنج وصل شده است. لوله شیشه‌ای مستقیماً در جهت مقابل جریان قرار می‌گیرد و فشار کل (TP) سامانه را برحسب اینچ آب می‌دهد. برای به‌دست آوردن فشار سرعت، اندازه‌گیری فشار ایستایی (SP) سامانه الزامی است. این فشار در جهت عمود بر جریان به‌دست می‌آید بدین منظور فشار ایستایی را به‌وسیله لوله شیشه‌ای دیگری که در جهت عمود بر صفحه قرار گرفته و به سر دیگر میکروفشارسنج وصل است می‌خوانیم. بنابراین مقداری که میکروفشارسنج نشان می‌دهد اختلاف فشار کل و ایستایی و برابر با فشار سرعت است. به کمک دستگاه XYZ می‌توان حسگر را به‌دقت در راستای سه محور روی محرک به‌طور دستی حرکت داد. پروفیل‌های عمودی در مقادیر مختلف X در لبه الکتروود فعال اندازه‌گیری می‌شوند. حسگر را می‌توان با دقت ۰/۱ mm در راستای سه محور بالای سر محرک حرکت داد و پروفیل سرعت جریان القایی را به‌دست آورد. با گذاشتن مقدار سرعت فشار در رابطه ۵ سرعت جریان برحسب fpm (فوت بردقیقه) بدست می‌آید [۸].

$$V_p = \rho_a \left(\frac{V}{1096} \right)^2 \quad (5)$$

در رابطه ۵، ρ_a چگالی واقعی گاز برحسب lbm/ft^3 (پوند جرم بر فوت مکعب) و در شرایط محل آزمایش $0.0638 lbm/ft^3$ است. با ضرب مقدار نهایی سرعت جریان القایی به‌دست آمده از این رابطه درضریب ۰/۰۵۱ مقدار سرعت برحسب متر برثانیه به‌دست آمد و نمودارهای ارتفاع از سطح برحسب سرعت رسم شد.

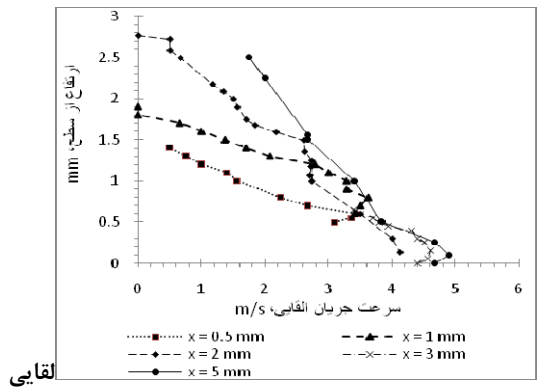
اندازه‌گیری‌ها و ارائه داده‌ها

در ابتدا برای مطمئن شدن از وجود جریان هوای ثانویه و پیدا کردن جهت این جریان یک آزمایش دود ترتیب داده شد تا آشکارسازی جهت جریان انجام شود. با استفاده از یک هویه داغ که به سرش مقداری یونولیت چسبانده شده بود دود تولید شد. ابتدا در غیاب پلاسما اثر دود مشاهده شد تا زمانی که به حالت تعادل برسد، در این حالت همان‌طور که انتظار می‌رفت یک حرکت یکنواخت و به سمت بالا وجود داشت. سپس محرک روشن و هویه در

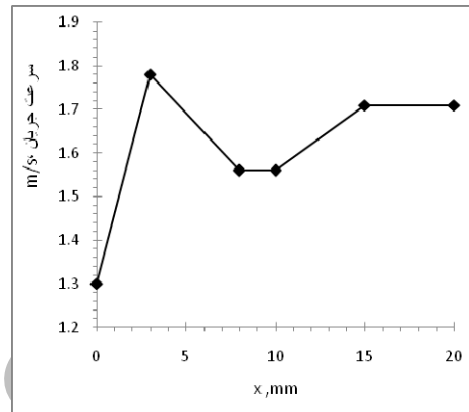
۲- بررسی اثر ماده دی الکتریک

در این قسمت برای بررسی اثر جنس ماده دی الکتریک روی میزان سرعت جریان القایی دو نوع ماده دی الکتریک، پلکسی گلاس (PMMA) و تفلون (PTFE) با ضخامت‌های یکسان (۲ میلی‌متر) به کار برده شده است.

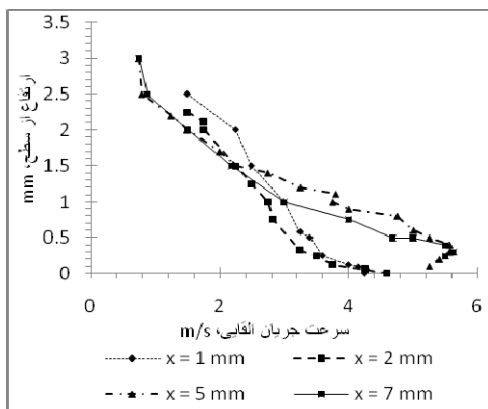
از لبه الکتروود فعال در ارتفاعات مختلفی از سطح محرک اندازه‌گیری شد. شرایط جوی آزمایشگاه حین اجرای آزمایش‌ها عبارت بود از درجه حرارت ۲۸/۷ درجه سانتی‌گراد؛ رطوبت نسبی ۳۴/۳ درصد و فشار مطلق ۸۳۶ میلی‌بار.



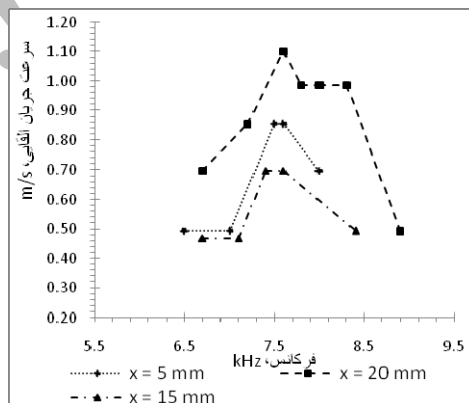
نمودار ۴- نمودار سرعت جریان برای ماده دی الکتریک پلکسی گلاس (PMMA)



نمودار ۲- تغییرات سرعت جریان نسبت به مکان از لبه الکتروود فعال به ازای بسامد بهینه ۷/۵ KHz



نمودار ۵- نمودار سرعت جریان القایی برای ماده دی الکتریک تفلون (PTFE)



نمودار ۳- اثر بسامد تحریک روی سرعت جریان القایی در Y=2mm به ازای xهای مختلف

بحث و تحلیل داده‌ها

در این مقاله رفتار سرعت جریان القایی نسبت به تغییر بسامد بررسی شده. داده‌های تجربی مربوطه به صورت نمودارهای ۱ تا ۳ قابل مشاهده است. در این نمودارها دیده می‌شود که با افزایش بسامد، سرعت جریان القایی افزایش یافته و به یک بیشینه رسیده و با افزایش بیشتر بسامد کاهش می‌یابد. در مقایسه این داده‌ها با جواب‌های به دست آمده در مرجع [۶] نتیجه می‌گیریم که در ولتاژهای کمتر از ۴-۵ kV، سرعت، تابع یکنواختی از بسامد است و با افزایش بسامد زیاد می‌شود. اما به ازای ولتاژهای بالاتر یک

با چیدمان یک پیکربندی ثابت از الکتروودها روی صفحات دی الکتریک و اعمال ولتاژ و بسامد ثابت، اندازه‌گیری‌های سرعت جریان انجام شد. در این حالت پهنای الکتروود فعال ۵ mm، پهنای الکتروود اتصال زمین ۱ cm و شکاف بین الکتروود فعال و زمین ۲ mm انتخاب شد و طبق نتایج به دست آمده از اثر بسامد، بسامد روی ۸/۳ kHz و ولتاژ در حدود ۷ kV ثابت نگه داشته شد. هدف از اجرای آزمایش در این قسمت به دست آوردن نمودارهای سرعت جریان القایی بالای سر محرک پلاسمایی بود. بدین منظور سرعت به ترتیب به ازای فواصل مشخصی

رفتار غیریکنواخت از خود نشان داده و به وضوح یک بیشینه معین دارد که با رسیدن به این مقدار با افزایش بیشتر بسامد، سرعت کاهش یافته تا جایی که به صفر می‌رسد. این دقیقاً همان رفتاری است که در این آزمایش‌ها مشاهده شده است.

دو پدیده می‌تواند سهم مهمی در این مسئله داشته باشند. اول، وقتی بسامد زیاد می‌شود، شیب ولتاژ اعمالی هم زیاد می‌شود که احتمالاً یونیزاسیون را افزایش می‌دهد. ثانیاً متوسط بار منتقل شده با بسامد افزایش یافته و برخوردهای بیشتری بین یونها و گازها صورت می‌گیرد. به ازای افزایش بسامد، سرعت جریان القایی به حد بیشینه می‌رسد که در موارد مورد بررسی در اینجا بسامد حدود $7/5 \text{ kHz}$ است. در زمان اشتعال تخلیه، سطح دی‌الکتریک باردار شده و بلافاصله تخلیه می‌شود. احتمال دارد سطح باردار برای بسامدهای بالاتر از یک حد آستانه، زمان لازم برای رها شدن کامل را نداشته باشد. و این احتمالاً همان علتی است که تخلیه مقداری ناپایداری و فیلامان‌های بزرگ پرنرژی در سطح دی‌الکتریک به ازای چنین بسامدهای بالایی ($4 < f < 9 \text{ kHz}$) اتفاق می‌افتد [۹].

این مسئله در مرجع [۶] این‌طور توضیح داده شده است که با افزایش بسامد، تخلیه از بسامد بحرانی به دام اندازی یون، فراتر می‌رود و همین‌که تخلیه شروع می‌کند تا الکترون‌ها را نیز مانند یون‌ها به دام اندازد، تخلیه قطبیده شده و منجر به ناپایداری رشته رشته‌ای می‌شود.

در مورد آزمایش‌های مربوط به بررسی اثر ماده دی‌الکتریک روی سرعت جریان القایی، به دو مورد پرداخته شده است: یکی به دست آوردن پروفایل‌های سرعت جریان القایی و دیگری بررسی اثر جنس ماده دی‌الکتریک روی حداکثر میزان سرعت جریان القایی.

برای دو ماده دی‌الکتریک مختلف پروفیل‌های سرعت به ازای مکان‌های مختلف X به دست آمده است. همان‌طور که از نمودارهای ۴ و ۵ مشاهده می‌شود حداکثر سرعت جریان القایی در ارتفاع‌های $Y = 0/5 \text{ mm}$ از سطح رخ می‌دهد. مقایسه نتایج به دست آمده با کار انجام شده در [۱۰] نشان می‌دهد که حداکثر سرعت در $X = 10 \text{ mm}$ و $Y = 0/5 \text{ mm}$ به دست می‌آید. نتایجی مشابه نیز در مراجع [۱۱] و [۱۲] به دست آمده که در

مرجع [۱۱] حداکثر سرعت جریان در ارتفاع حدود $0/5 \text{ mm}$ از سطح اما با پیکربندی متفاوت اندازه‌گیری شده است. تفاوت نتایج به دست آمده در پروفایل‌های سرعت نمودار ۴ و ۵ با نمودارهای سرعت به دست آمده در [۱۱] این است که در آن مورد حداکثر سرعت جریان القایی به ازای ولتاژهایی در حدود 20 kV رخ می‌دهد. علت نیاز به چنین ولتاژ بالایی را شاید بتوان به شرایط اولیه ربط داد، به این صورت که در شرایط کاری [۱۰] بسامد از ۳۰۰ تا ۷۰۰ هرتز است ولی بسامد آزمایش‌ها انجام شده در این مطالعه در حد ۸ کیلوهرتز است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش بسامد، ولتاژهای کاری را می‌توان کاهش داد. یکی دیگر از تفاوت‌ها میزان حداکثر سرعت جریان القایی است که در مورد مرجع [۱۰] نزدیک به $3/5 \text{ m/s}$ است ولی در نمودارهای سرعت به دست آمده در این مطالعه به 6 m/s رسیده است. این را می‌توان به ضخامت ماده دی‌الکتریک مورد استفاده مربوط دانست که ضخامت ماده دی‌الکتریک مورد استفاده در مرجع [۱۰] حدود ۴ میلی‌متر است و بیشتر از ضخامت ماده دی‌الکتریک مورد استفاده در آزمایش‌های انجام شده در اینجا است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت دی‌الکتریک نیاز به ولتاژ اعمالی بیشتری وجود خواهد داشت تا به سرعت جریان القایی بالاتری دست یابیم.

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که به ازای توان‌های ورودی برابر، حداکثر سرعت هوای القایی در دی‌الکتریک تفلون (PTFE) بیش از پلکسی‌گلاس (PMMA) می‌باشد. با توجه به اینکه شرایط آزمایش و طرح هندسی هر دو دی‌الکتریک مشابه بوده است لذا از مقایسه و حل معادله ۲ برای دی‌الکتریک‌های مورد آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت ضریب اتلاف انرژی و نفوذپذیری الکتریکی نسبی ماده دی‌الکتریک یعنی $\epsilon_r \tan(\delta)$ سبب این اختلاف می‌شود. با توجه به اینکه مقدار $\epsilon_r \tan(\delta)$ برای پلکسی‌گلاس مساوی $2/04 \times 10^{-2}$ فاراد بر متر و برای تفلون مساوی $4/2 \times 10^{-5}$ فاراد بر متر می‌باشد، این مقایسه نشان می‌دهد تفلون که ضریب اتلاف کمتری دارد میزان کمتری از توان ورودی را تلف می‌کند بنابراین مقدار توان بیشتری برای تبدیل به توان مکانیکی در دسترس محرک خواهد بود. محاسبات توان مکانیکی از روی پروفیل سرعت برای این دو ماده نیز همین نکته را تأیید می‌کند. با محاسبه

- 2005.
- [2] Sosa, R., Artana, G., Moreau, E., Touchard, G., "Flow control with EHD actuators in middle post stall regime", J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. No.2 Vol. XXVIII, 2006, pp. 200-207.
- [3] Thomas, C., Corke, Martiqua, L., Post, Dimitry, M., "SDBD plasma enhanced aerodynamics: concepts, optimization and applications", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 43, Issue 7-8, 2007, pp. 193-217.
- [4] Roth, J.R., "Industrial plasma engineering. volume II application to non-thermal plasma processing" Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, ISBN 0-7503-0545-2, 2001, Section 18.6.
- [5] لوکنس گراد، اریک، "پلاستیکها فرایندها و قالبها"، مترجم جعفر و طنخواه دولت سرا، نشر علوم زمین، ۱۳۸۷.
- [6] Roth, J., R., Dai, X., "Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an EHD electrical device", AIAA Meeting, Reno, USA, 2006. pp. 2006-1203.
- [7] Manish, Yadav., Master of science thesis, The University of Tennessee, Knoxville, August 2005.
- [8] کمیته تهویه صنعتی انجمن بهداشت صنعتی آمریکا، "تهویه صنعتی"، مترجم محمد جواد جعفری، انتشارات فدک ایستاتیس، تهران، ۱۳۸۷، جلد ۱، فصل اول
- [9] Forte, M., Jolibois, J., Moreau, E., Touchard, G., "Electric wind induced by sliding discharge in air at atmospheric pressure", AIAA Meeting, San Francisco, USA, 2006, pp. 107-114.
- [10] Jerome, Jolibois, Maxime, Forte, Eric, Moreau, "Application of an AC barrier discharge actuator to control airflow separation above a NACA 0015 airfoil: Optimization of the actuation location along the chord", Journal of Electrostatics, vol. 66, 2008, pp. 496-503.
- [11] pons, J., Moreau, E., Touchard, G., "Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics", J. Phys. D. Appl. Phys. Vol. 38, 2005, pp. 3635.
- [12] Thomas, corke, C., Lon, Enloe, Stephen, P., Wikinson, "Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for flow control", Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 42, 2010, pp. 505-529.

تقریبی توان تلف شده توسط دی الکتریکها از رابطه ۲ و با فرض $U_{RMS} = 8000$ ولت، $A = 5 \times 10^{-4}$ مترمربع، $S = 2 \times 10^{-3}$ متر، $f = 8/3 \times 10^3$ هرتز و $\epsilon_0 = 8/85 \times 10^{-12}$ فاراد بر متر، مقدار توان برای پلکسی گلاس $P = 0/15$ وات و برای تفلون $P = 0/31$ میلی وات به دست می آید. با همین محاسبه مشخص می شود که تفلون مقدار توان کمتری را به صورت گرما تلف می کند.

نتیجه گیری

این مطالعه نشان داد که:

- با افزایش بسامد، سرعت جریان القایی افزایش می یابد و به بیشینه خود می رسد. با افزایش بیشتر بسامد سرعت جریان القایی کاهش می یابد.
- برای هر دو ماده دی الکتریک، مقدار سرعت در فاصله ۰/۵ میلی متری از سطح دی الکتریک بیشترین مقدار خود را دارد.
- به ازای توان های ورودی برابر، حداکثر سرعت هوای القایی در دی الکتریک تفلون (PTFE) بیش از پلکسی گلاس (PMMA) می باشد.
- در صورت استفاده از دی الکتریک هایی که ضریب اتلاف کمتری دارند به طور مؤثرتری می توان توان ورودی محرک را تبدیل به توان تولید جریان القایی کرد.

پی نوشت:

- ۱-Viscous
- ۲- Lift
- ۳- Stall
- ۴-Airfoil
- ۵- Nozzle
- ۶- Spray
- ۷- Blowing
- ۸- Steady
- ۹-Unsteady
- ۱۰ -Electrohydrodynamics
- ۱۱-Radio Frequently
- ۱۲-Dielectric Barrier Discharge
- ۱۳-Yadav
- ۱۴- Mikromanometer Kofferprufsatz type

مراجع:

- [1] Jeffrey, M., Degree of master Thesis, "Air force institute of iechnology", Newcamp Lieutenant USAF, September