

# بررسی تجربی تاثیر عملگر پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک بر توزیع فشار در مجاورت سطح

سروش حریمی<sup>۱</sup>، روح الله خوشخو<sup>۲\*</sup>، محمود مانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱)

## چکیده

در دهه‌های گذشته، استفاده از عملگرهای پلازما جهت کنترل جریان بسیار مورد توجه بوده است. یکی از انواع عملگرهای پلازما، عملگر پلاسمایی تخلیه سد دی الکتریک (DBD) می‌باشد. از ویژگی‌های آن می‌توان به ساده بودن ساختار آن، زمان پاسخ‌گویی سریع، توان مصرفی کم و نداشتن بخش‌های متحرک اشاره نمود. در این تحقیق، تغییرات توزیع فشار قبل و بعد از تشکیل پلازما در فرکانس‌ها و ولتاژهای مختلف در مجاورت سطح در انتهای مدل صفحه تخت و مکان قرارگیری آخرین عملگر پلازما در دو چیدمان مختلف مورد بررسی قرار گرفت، همچنین تاثیر تغییر ولتاژ و فرکانس بر توزیع فشار بررسی شده است. نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی دلالت بر این نکته دارد، که پلازما باعث بوجود آمدن جت القایی در مجاورت سطح می‌شود. در حقیقت، می‌توان بیان نمود، که عملگرهای پلازما منجر به تولید ممنتوم در لایه مرزی گردیده و باعث تولید باد یونی می‌شود و با افزایش ولتاژ و فرکانس - بیشتر از ولتاژ شکست - در ابتدا جریان ممنتوم در راستای نصب عملگر پلازما ایجاد می‌گردد و با افزایش ولتاژ و مرئی شدن پلازما، جریان گردابه‌ای بر روی صفحه تخت تشکیل می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** کنترل جریان، عملگر پلاسمای DBD، بررسی تجربی، باد یونی.

## Experimental Investigation of DBD Plasma Actuator Effect on Pressure Distribution Just above the Surface

Soroush Harimi, Roohollah Khoshkhoo\*, and Mahmood Mani

### Abstract

In the last decade, the use of plasma actuators for the application of flow control has been very interested. One of plasma actuators types is the Dielectric Barrier discharge (DBD) plasma actuator. Its properties include simple structure, fast response time, low power consumption and lack of moving parts. In this study, the changes of pressure distribution before and after plasma formation at different frequencies and voltages were investigated just above surface at the bottom of the flat plate model and the location of the last plasma actuator. Also the effect of voltage and frequency changes on the pressure distribution has been surveyed. The results of the experimental tests indicate that the plasma produces the ionic jet just above surface, in fact, the plasma actuators produce momentum flow in the boundary layer and produce ionic wind. By increasing the voltage and frequency - more than the breakdown voltage - the momentum flow is created in the direction of the plasma actuator. As the voltage increases and the plasma becomes visible and vortexes are formed on the flat plate.

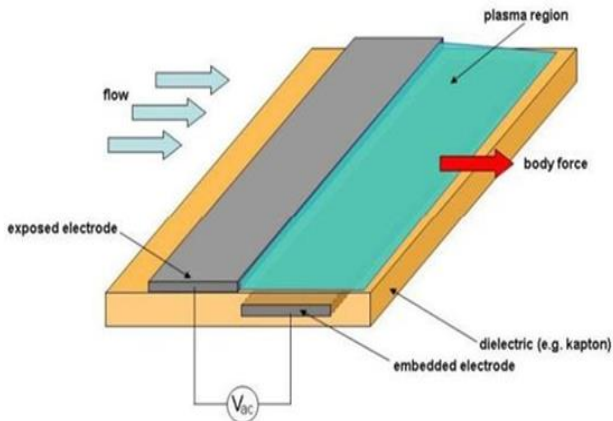
**Keywords:** Flow Control, DBD plasma Actuator, Experimental Investigation, Ionic Wind.

## مقدمه

سودمندی توسعه سیستم‌های کنترل جریان از صرفه جویی میلیارد دلاری سوخت در وسایل زمینی، دریایی و هوایی تا دستیابی به صنایع سازگارتر با محیط زیست را شامل می‌شود. کنترل جریان، می‌تواند منجر به تغییرات مطلوبی شامل کاهش پسا، کاهش نویز، تأخیر انتقال جریان از آرام به مغشوش، بهبود نیروی برآ، به تعویق انداختن جدایش و... شود. بنابراین همواره سعی شده تا با ایجاد توزیع فشار مناسب بر روی سطح، از جدایش جریان جلوگیری به عمل آمده و طبیعتاً میزان ضریب برآ افزایش و در مقابل میزان ضریب پسا کاهش یابد، که این امر تاثیر بسزایی در بهبود کارایی و عملکرد وسیله پرنده خواهد داشت.

کنترل جریان با توجه به مصرف انرژی یا استفاده از توان کمکی به دو دسته فعال و غیرفعال دسته‌بندی می‌شود. در کنترل فعال، از انرژی یا توان کمکی برای دست‌کاری جریان استفاده می‌شود، در حالی که در کنترل جریان غیرفعال از هیچ توان کمکی (خارجی) استفاده نمی‌شود. لازم بذکر است که روش‌های کنترلی می‌توانند به صورت ترکیبی از روش‌های فعال و غیرفعال در نظر گرفته شوند. در طول دهه گذشته، تمرکز بیشتر در بکارگیری روش‌های فعال بوده است.

یکی از روش‌های کنترل جریان، استفاده از عملگرهای پلاسمای DBD<sup>۱</sup> می‌باشد. عملگرهای پلاسمای DBD، پیکربندی بسیار ساده‌ای دارند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد، این نوع عملگرها شامل دو صفحه فلزی به عنوان الکتروده هستند که با آرایش خاصی در دو طرف یک ماده عایق دی‌الکتریک قرار گرفته‌اند، یکی از این الکترودها در معرض هوا قرار داده شده و به راحتی دیده می‌شود و الکتروده دیگر، در داخل ماده عایق پنهان شده است. جنس دی‌الکتریک اغلب، کاپتون یا تفلون است. عملگر پلاسمای به هیچ‌وجه سطح مقطع زیادی در مقابل جریان ندارد و لذا قرار دادن آن بر روی سطوح آیرودینامیک، موجب به وجود آمدن مقاومت بیشتر از حد نمی‌شود.



شکل ۱ - شماتیک از عملگر پلاسمای DBD

عملگرهای پلاسمای، نوعی از عملگرهای کنترل جریان می‌باشند که پلاسمای در دمای پایین در آن‌ها تشکیل می‌شود. چشم‌انداز استفاده از این عملگرها برای به تاخیر انداختن جدایش، افزایش برآ، کاهش پسا و حتی به عنوان جایگزین برای سطوح کنترل سنتی از قبیل فلپ و ایلرون می‌باشد. به طور کلی، عملگر پلاسمای، جریان عبوری از روی بال که در ناحیه مرزی قرار دارند، را یونیزه کرده و تاحدودی به پلاسمای تبدیل می‌کند. این امر منجر می‌شود که پلاسمای ایجاد شده تحت تاثیر میدان الکتریکی، تولید نیروی الکتریکی نموده و منجر به تولید باد یونی در جهت جریان گردد.

استفاده از عملگرهای پلاسمای به عنوان ابزار کنترل جریان مفهومی به نسبت جدید است. در واقع تحقیقات بسیار زیادی در طول دهه‌های گذشته در ارتباط با عملگرهای پلاسمای DBD صورت گرفته و نتایج امیدبخشی در مورد استفاده از آن برای کنترل جریان به دست آمده است. در سال ۱۹۹۸، راد و همکاران، اولین نتایج مربوط به عملگر پلاسمای DBD را منتشر کردند [۱]. تحقیقات اولیه درباره عملگر پلاسمای پیشرفت این عملگرها، راه را برای محققین دیگر در زمینه آیرودینامیک برای بررسی جامع‌تر اثرات این نوع عملگر بر کنترل جریان، گشود [۲]. ژاکوب و همکارانش در سال ۲۰۰۴، به بررسی تاثیر عملگر پلاسمای DBD بر جریان لایه مرزی در سرعت‌ها، فرکانس‌ها و توان‌های تحریک مختلف به صورت تجربی پرداختند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سیال بلافاصله در مجاورت عملگر پلاسمای شتاب می‌گیرد و جت آشفته در پایین دست عملگر پلاسمای DBD تولید می‌شود که جت القائی ناشی از مکش سیال از جریان بالادست می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از تحقیق، نشان می‌دهد که علاوه

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

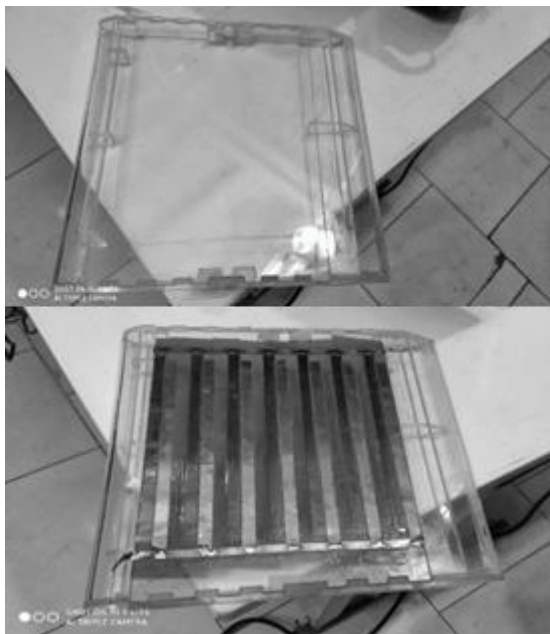
بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می یابد [۳].

صورت قرار گرفتن مدل در جریان، لایه مرزی بهتری تشکیل شود و جدایش جریان، در ابتدای مدل رخ ندهد، همچنین قسمت بالای صفحه بصورت جداشونده طراحی شد تا بتوان مدل‌های عملگرها پلاسما را راحت‌تر تعویض کرد. در زیر تصاویری از مدل با عملگرهای پلاسما و بدون آن در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲ - مدل صفحه تخت مورد استفاده جهت تست آزمایشگاهی

### تجهیزات تولید و نظارت پلاسمای سرد غیر تعادلی

منبع تغذیه متناوب مورد استفاده در این تست‌ها یک منبع تغذیه کاملاً خاص با حداکثر توان خروجی یک کیلووات و طیف گسترده‌ای از پارامترهای الکتریکی برای تشکیل پلاسما توسط عملگرهای پلاسمایی مختلف می‌باشد. بازه‌ی ولتاژ خروجی و محدوده‌ی فرکانس حامل<sup>۲</sup> منبع تغذیه به ترتیب ۱ تا ۳۰ کیلوولت و ۱ تا ۳۰ کیلوهرتز است. فرکانس تحریک ناپایا<sup>۳</sup> در بازه ۰/۲ تا ۱/۲ کیلوهرتز و سیکل کاری<sup>۴</sup> از ۱٪ تا ۹۹٪ قابل تنظیم است. میزان توان مصرفی عملگر پلاسمایی با استفاده از مدار الکتریکی واسط، که به همین منظور طراحی و در خروجی منبع تغذیه تعبیه شده، اندازه‌گیری شده‌است. برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیسی<sup>۵</sup> و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیسی<sup>۶</sup> ناشی از عملکرد منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً

بر بهبود ضرایب آیرودینامیکی، با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد [۱۶].

در سال ۲۰۲۰، حریمی و همکاران، به بررسی تأثیر آرایش‌های مختلف عملگر پلاسما بر میزان نیروهای آیرودینامیکی تولیدی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که فاصله بین عملگرهای پلاسما تأثیر بسزایی در میزان افزایش نیروی آیرودینامیکی تولیدی دارد [۱۷].

در کلیه تحقیقات صورت گرفته تاکنون، به طور دقیق، نحوه تأثیر عملگر پلاسما بر توزیع فشار در ناحیه مجاور سطح و در حقیقت نحوه تولید ممنوم به‌طور متمرکز، بررسی نشده است، همچنین وجود تئوری‌های مختلف در رابطه با نحوه تولید ممنوم، نشان از وجود ابهام در نحوه عملکرد عملگر پلاسما بر جریان سیال دارد.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر تغییرات ولتاژ و فرکانس بر نحوه توزیع فشار در مجاورت سطح با دو چیدمان مختلف عملگر پلاسما در انتهای صفحه تخت می‌باشد و در حقیقت نحوه تأثیر عملگر پلاسما بر جریان هوا در مجاورت سطح مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، میزان دقت و صحت تئوری‌های موجود در این زمینه، با توجه به نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده، مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور، تغییرات توزیع فشار قبل و بعد از تشکیل پلاسما در ۵ نقطه در راستای قائم در محل انتهای مدل صفحه تخت و مکان قرارگیری آخرین عملگر پلاسما بررسی شده است. در این تحقیق، دو آرایش مختلف عملگرهای پلاسما مورد استفاده قرار گرفت و در تمامی مراحل انجام آزمایش، تونل باد خاموش است.

### تجهیزات آزمون

در این بخش، مجموعه‌ی تجهیزات و ابزار مورد نیاز برای آزمون‌ها و سیستم داده برداری به طور خلاصه ارائه شده است.

### مدل صفحه تخت

مدل مورد بررسی ساخته شده از پلکسی‌گلس با ضخامت ۵ میلی‌متر و دارای ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد که در قسمت لبه حمله و لبه فرار آن پس از بررسی مقالات تصمیم گرفته شد که از ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ الگو برداری شود تا در

### عملگرهای پلاسما

آرایه عملگرهای DBD با چهار لایه دی الکتریک کاپتون با ضخامت ۰/۴ میلی متر بر روی قسمت جداشونده صفحه تخت ساخته شدند. طول هر الکتروود ۲۰ سانتی متر و عرض آن ها ۱ سانتی متر در نظر گرفته شده، همچنین ضخامت الکتروودها ۰/۱ میلی متر می باشد. عکس هایی از دو آرایش متفاوت ساخته شده در شکل ۳ قابل مشاهده می باشد. در آرایش اول تعداد ۸ عملگر پلاسما نصب شد که فاصله بین آن ها، جهت جلوگیری از بهمکنش میدان های الکتریکی آن ها بر یکدیگر، ۵ میلیمتر در نظر گرفته شد. در آرایش دوم، تعداد ۷ عملگر پلاسما روی مدل نصب گردید که فاصله بین آن ها ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شد، تا میزان تاثیر فاصله ی بین عملگرها و تعداد آنها در تست ها مورد بررسی قرار گیرد.



الف) فاصله بین عملگرهای پلاسما ۵ میلی متر



ب) فاصله بین عملگرهای پلاسما ۱۰ میلی متر

شکل ۳ - چیدمان های مختلفی از نحوه قرارگیری عملگر پلاسما روی صفحه تخت

### نتایج و بحث

در این بخش، دو آرایش اول و دوم ذکر شده در قسمت قبل مورد بررسی پارامتریک از نظر تغییر ولتاژ و فرکانس قرار گرفت و نحوه توزیع فشار در فاصله یک سانتیمتری از انتهای آخرین عملگر پلاسما بر حسب فاصله از صفحه تخت به دست آمد.

تجهیزات اندازه گیری و داده برداری، از کابل های دارای پوشش محافظ الکتریکی و همچنین ملاحظات تطبیق امپدانس در طراحی منبع تغذیه استفاده شده است. همچنین حداکثر فاصله بین منبع تغذیه و ابزارهای اندازه گیری در تست مدنظر قرار گرفته است. در این تحقیق، جریان الکتریکی به صورت پایا در نظر گرفته شده است.

### لوله پیتوت

در این تحقیق از لوله پیتوت عادی به ابعاد ۱۰ سانتی متر دارای سوراخ به قطر ۰/۵ میلی متر ساخته شده از جنس شیشه با دقت بالا برای اندازه گیری فشار کل استفاده شده است.

### تراورس

برای جابه جایی لوله پیتوت در طول و عرض نمونه های تحت آزمایش از دستگاهی با عنوان تراورس استفاده شده است. دستگاه موجود در سه جهت X, Y, Z قابلیت جابه جایی با دقت ۱ میلی متر را داراست که توسط نرم افزاری مخصوص، کنترل می شود.

### سنسورهای فشار

بسته ی مانیتورینگ فشار ۸۰ کاناله به طور خاص به منظور اندازه گیری، نمایش و ذخیره سازی داده های فشار جهت اندازه گیری های تونل باد استفاده شده است. این بسته شامل دو بخش ابزار دقیق و سیستم داده برداری است که به صورت تجمیع شده درون یک بسته طراحی و جانمایی شده است. سنسورهای این دستگاه از نوع هانیول بوده و قادر به اندازه گیری حداقل فشار تا ۰/۰۱ پاسکال و حداکثر تا ۱۳۵۰ پاسکال است. همچنین دقت این سنسورها ۰/۰۲۵ ولت و کل تغییرات ولتاژ آن ۵ ولت است. سخت افزار داده برداری از نوع نشنال اینسترومنت بوده و دارای ۸۰ کانال با تفکیک پذیری ۱۶ بیت با بازه ورودی آنالوگ  $V \pm 0.2$  و  $1V \pm$  و  $5V \pm$  و  $10V \pm$  و دمای کاری ۰ تا ۴۵ درجه سانتی گراد که بوسیله یو اس بی به کامپیوتر متصل است. عدم قطعیت محاسبه شده برای سنسور مورد نظر  $\pm 0.2$  پاسکال می باشد.

تحلیل عملکرد عملگرهای پلاسما، کار بسیار سخت و دشواری است و تاکنون نظریات مختلفی در این زمینه بیان شده است، تا بتوانند براساس آنها، نحوه تاثیر عملگرهای پلاسما را تجزیه و تحلیل نمایند. اما هیچ کدام از نظریات به طور کامل، به نتیجه قطعی و مسلمی نرسیده و همواره، مسائل ناشناخته زیادی برای بیان نحوه تشکیل پلاسما وجود دارد.

دو تئوری برای تحلیل نحوه تاثیر عملگرهای پلاسما بر جریان سیال در این میان از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. تئوری اول به تئوری رانش-رانش و تئوری دوم به تئوری رانش-کشش معروف است. چون منبع تغذیه با جریان الکتریکی متناوب به عملگر پلاسما متصل می‌باشند. جریان الکتریکی متناوب را می‌توان به دو نیم‌سیکل مثبت و منفی تقسیم نمود، که میزان نیروی ممنتوم ایجاد شده در یک نیم-سیکل قوی و در دیگری ضعیف می‌باشد.

در تئوری رانش-رانش، در نیم‌سیکل اول جریان الکتریکی، باد یونی با سرعت کم در راستای جریان سیال و در نیم‌سیکل دوم جریان الکتریکی، باد یونی با سرعت بیشتری در همان راستای جریان سیال ایجاد می‌شود. یعنی نیروهای تولید شده در هر نیم‌سیکل‌های مختلف هر دو به سمت جریان پایین دست هستند.

در تئوری دوم که به تئوری رانش-کشش معروف است، مقدار ممنتوم تولید شده در نیم‌سیکل‌های مختلف باید در جهت مخالف باشند، زیرا میدان‌های الکتریکی خارجی اعمالی بین نیم‌سیکل مثبت و منفی مخالف هستند. جایی که در آن نیروی رانش از نیروی کشش بزرگتر است و در پایان با یک نیروی رانش خالص به پایان می‌رسد. در نتیجه این امر منجر به تولید جریان گردابه‌ای در نزدیک سطح گردیده و گردابه اول منجر به تولید گردابه ثانویه‌ای در جهت جریان هوا می‌گردد [۱۸].

### بررسی تاثیر ولتاژ بر میزان توزیع فشار

جهت بررسی تاثیر ولتاژ، ابتدا نمونه اول مورد مطالعه قرار گرفت. منظور از نمونه ۱، آرایش اول عملگرهای پلاسما در شکل ۳ الف) می‌باشد که در آن فاصله بین عملگرها، نیم سانتی‌متر و تعداد عملگرها، ۸ عدد در نظر گرفته شد.

در شکل ۴ پروفیل توزیع تغییرات فشار در راستای عمود بر سطح نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده شد، به

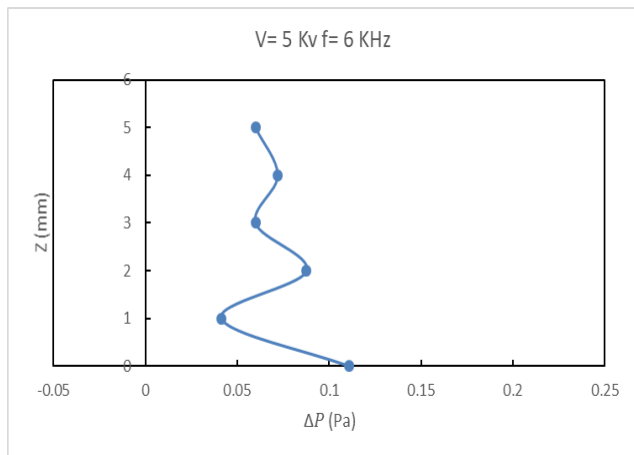
علت پایین بودن میزان ولتاژ از ولتاژ شکست، تشکیل پلاسما بر روی سطح صفحه تخت تشکیل نشده است و ارتفاع سه میلیمتری به بعد، سرعت بسیار کمی در بالای سطح وجود دارد که احتمال می‌رود به علت وجود باد در درون تونل باد خاموش باشد. زیرا به دلیل مدار باز بودن تونل باد و شرایط آزمایشگاهی وجود چنین جریان هوایی منطقی می‌باشد.

با افزایش ولتاژ به  $3/5$  کیلوولت، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، تاثیرات پلاسما به مقدار کمی دیده می‌شود که منجر به تغییر فشار و تولید مقدار بسیار کمی سرعت در راستای جریان نموده است. ممنتوم تولیدی در نقاط نزدیک سطح، کم‌کم به ناحیه دورتر از سطح در حال انتقال می‌باشد و نمودار به صورت نوسانی نشان داده شده است.

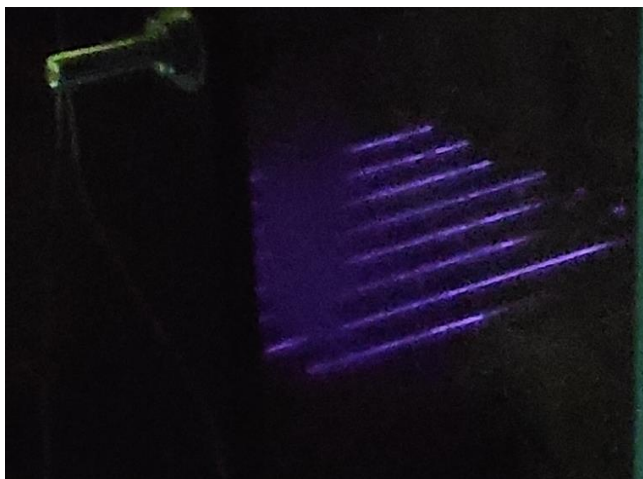
در شکل ۶، نمودار تغییرات فشار بر حسب ارتفاع از سطح صفحه در ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز مشاهده می‌گردد. همان‌طور که می‌دانیم تا زمانی که پلاسما آشکار نشده باشد همچنان باد یونی با سرعت زیاد ایجاد نمی‌شود ولی طبق نمودار، جریان به صورت نوسانی درآمده و در حال تشکیل پلاسما می‌باشد.

در شکل ۷، ناحیه سفیدرنگی به صورت کم‌رنگ مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده تشکیل پلاسما به صورت تابش در ناحیه مربوطه می‌باشد. البته لازم بذکر است که در همه سطح الکتروود، به طور کامل هنوز پلاسما ایجاد نگردیده است و رنگ واقعی پلاسمای ایجاد شده به صورت بنفش رنگ می‌باشد. در شکل ۶، نمودار توزیع فشار بر حسب ارتفاع برای ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد به علت ایجاد ممنتوم در نقاط نزدیک سطح، که از طریق مکش جریان ارتفاع‌های دورتر از سطح صورت می‌گیرد، این امر منجر به کاهش سرعت اولیه در نقاط دورتر از سطح جریان شده و میزان سرعت تا ارتفاع ۲ میلیمتری زیاد شده و سپس جریان به حالت اولیه خود برمی‌گردد. ایجاد ممنتوم اولیه می‌تواند باعث کاهش سرعت در ارتفاع بالاتر از ۲ میلیمتر گردد.

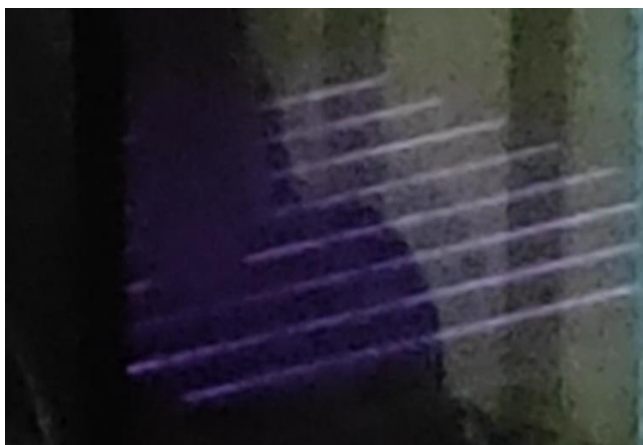
در شکل ۸، پلاسما به طور کامل به صورت تابشی و به طور سفیدرنگ با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. در این حالت، این اطمینان وجود دارد که پلاسما به طور کامل در همه سطح الکتروودها تشکیل شده است، چون کاملاً پلاسما دیده می‌شود. در شکل ۹، نمودار اختلاف فشار بر حسب ارتفاع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف فشار به صورت



شکل ۶ - توزیع تغییرات فشار در راستای محور قائم بر سطح تخت نمونه ۱ در ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.

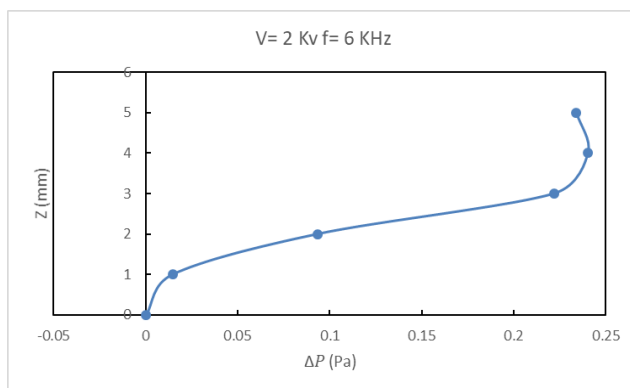


شکل ۷ - شروع تشکیل پلاسمای در ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز به صورت کم رنگ و ناقص.

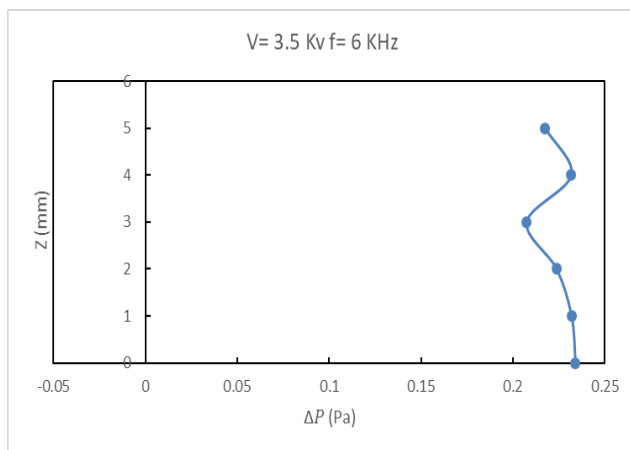


شکل ۸ - تشکیل پلاسمای در ولتاژ ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز به صورت کامل.

منفی است. این امر براساس تئوری رانش-کشش، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. زیرا جریان الکتریکی AC دارای رفتار رفت و برگشتی و متناوب می‌باشد، این امر منجر به تولید گردابه‌ای کوچک در نقاط نزدیک سطح شده و گردابه اولیه منجر به تولید گردابه بزرگتری در راستای جریان شده که با افزایش فاصله از الکتروود، بادیونی در راستای جریان سیال تولید می‌کند. بنابراین با توجه به تئوری بیان شده، به نظر می‌رسد، اختلاف فشار منفی به علت تولید جریان گردابه‌ای باشد.

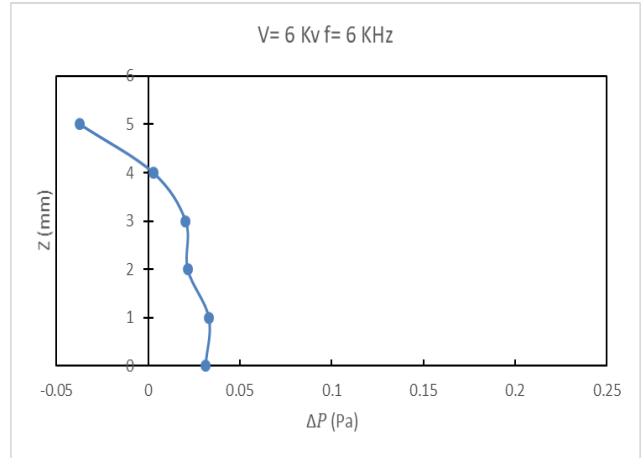


شکل ۴ - توزیع تغییرات فشار در راستای محور قائم بر سطح تخت نمونه ۱ در ولتاژ ۲ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.

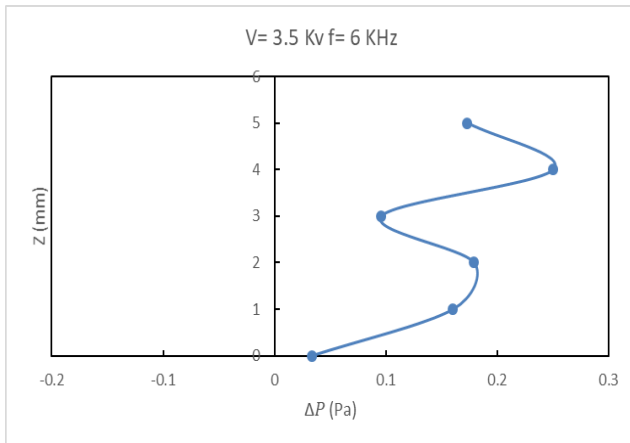


شکل ۵ - توزیع تغییرات فشار در راستای محور قائم بر سطح تخت نمونه ۱ در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.

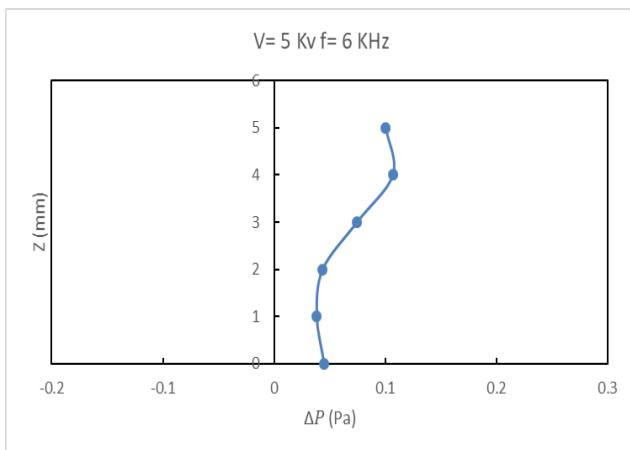
منجر به تولید ممنوم اولیه و تغییر فشار جزئی در یک الی دو میلیمتری نزدیک سطح می‌نماید. با افزایش ولتاژ، یک جریان برگشتی در ارتفاع نزدیک سطح تولید می‌شود و با توجه به تئوری رانش-کشش به نظر می‌رسد، گردابه‌ای در مجاورت سطح تولید شده که این امر منجر به تولید یک گردابه بزرگتر و در جهت جریان می‌گردد و در نتیجه تولید نیروهای برآ و رانش می‌گردد.



شکل ۹ - توزیع تغییرات فشار در راستای محور قائم بر سطح تخت نمونه ۱ در ولتاژ ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.



شکل ۱۰ - توزیع تغییرات فشار در راستای محور قائم بر سطح تخت نمونه ۲ در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.



شکل ۱۱ - توزیع تغییرات فشار در راستای محور قائم بر سطح تخت نمونه ۲ در ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.

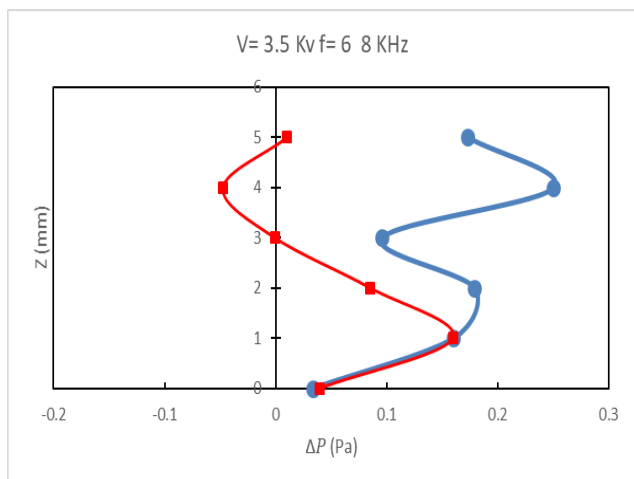
در مرحله بعد، رفتار عملگر پلاسما با استفاده از نمونه دوم مورد بررسی قرار گرفت. منظور از نمونه دوم، همان آرایش دوم عملگرهای پلاسما در شکل ۳ (ب) می‌باشد، که در آن فاصله بین عملگرها یک سانتی‌متر و تعداد عملگرها، ۷ عدد در نظر گرفته شده است.

در شکل شماره ۱۰ و ۱۱، نمودار توزیع تغییرات فشار بر حسب ارتفاع برای نمونه دوم نشان داده شده است. در این اشکال، به ترتیب، میزان ولتاژ ۳/۵ کیلوولت و ۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. در ابتدا، به علت وجود پلاسما در نقاط نزدیک سطح، ممنوم اولیه بر روی سطح در همان یک میلیمتری اول، تشکیل که منجر به تاثیر بر فشار جریان در ارتفاعات دور از سطح می‌گردد. با افزایش ولتاژ به ولتاژ ۵ کیلوولت، کاهش میزان فشار در نزدیکی سطح مشاهده می‌گردد که مقدار آن کوچک می‌باشد. همان‌طور که در شکل شماره ۱۲، قابل مشاهده می‌باشد، با افزایش ولتاژ به ۶ کیلوولت، میزان جریان برگشتی افزایش یافته و به نظر می‌رسد که گردابه‌ای در ارتفاع نزدیک سطح تشکیل می‌گردد، همان‌طور که در نمونه اول در این ولتاژ ذکر گردید، به نظر می‌رسد، جریان گردابه‌ای در ارتفاع بالای گردابه اول در راستای جریان می‌گردد و این امر منجر به ایجاد ممنوم بیشتر و تولید نیروهای برآ و رانش زیادتری می‌شود.

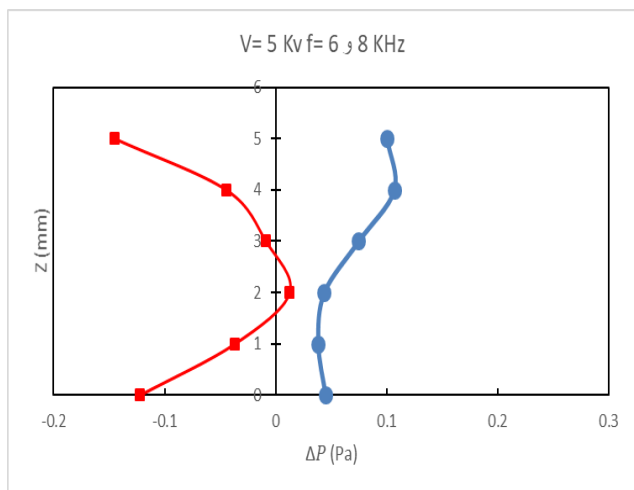
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ولتاژ کم و نزدیک به ولتاژ شکست، پلاسما، با وضوح خیلی کم تشکیل شده که



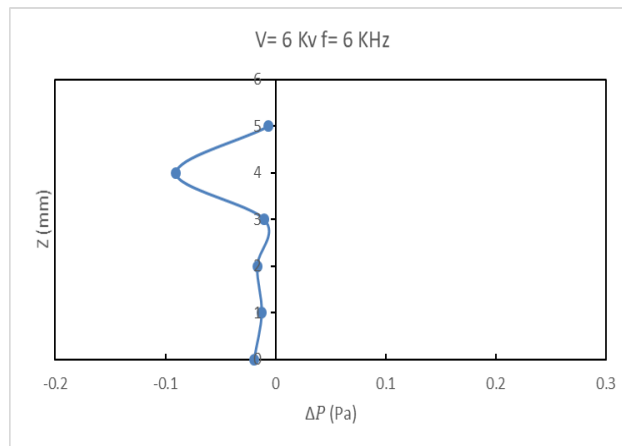
که با حرکت گردابه به سمت پایین دست جریان، گردابه اولیه حذف و گردابه ثانویه، به صورت ممنتوم ظاهر می شود.



شکل ۱۳ - تغییرات فرکانس روی نمونه ۲ در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت (نمودار دایره‌ای مربوط به فرکانس ۶ و نمودار مربعی مربوط به فرکانس ۸ کیلوهرتز می باشد).



شکل ۱۴ - تغییرات فرکانس روی نمونه ۲ در ولتاژ ۵ کیلوولت (نمودار دایره‌ای مربوط به فرکانس ۶ و نمودار مربعی مربوط به فرکانس ۸ کیلوهرتز می باشد).



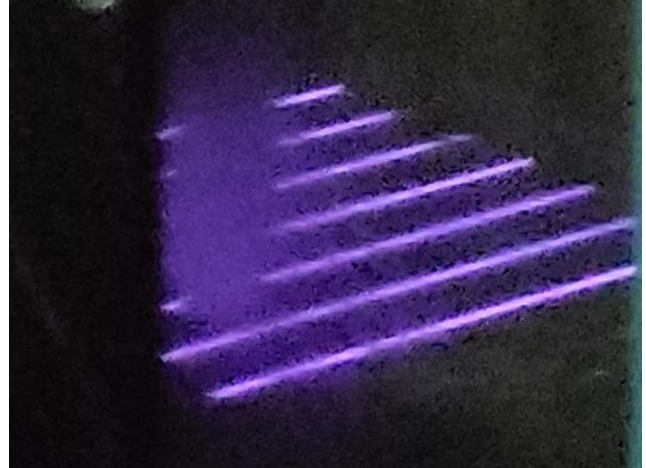
شکل ۱۲ - توزیع تغییرات فشار در راستای محور قائم بر سطح تخت نمونه ۲ در ولتاژ ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.

### بررسی تاثیر فرکانس بر میزان توزیع فشار

در این بخش، با استفاده از چیدمان دوم، به بررسی تاثیر تغییر فرکانس بر میزان توزیع فشار پرداخته شد. در شکل ۱۳، میزان تغییرات فشار برحسب ارتفاع برای دو حالت ولتاژ ۳/۵ کیلوولت و دو فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز مقایسه شده است. هدف از انجام این آزمایش، بررسی تاثیر فرکانس جریان الکتریکی بر روی میزان تغییر فشار و جریان سیال می باشد. همان طور که انتظار می رفت، افزایش فرکانس، منجر به تولید ممنتوم در نقاط نزدیک سطح شده و این امر منجر به مکش جریان از نقاط دور از سطح می گردد که باعث کاهش فشار در نقاط دور از سطح می شود.

در شکل ۱۴، میزان تغییرات فشار برحسب ارتفاع برای دو حالت ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس های ۶ و ۸ کیلوهرتز مقایسه شده است. در این ولتاژ، پلاسما به صورت تابشی بر روی سطح به صورت یک ناحیه سفید رنگ (در واقع بنفش رنگ) قابل مشاهده است که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان طور که قبلا ذکر گردید، با توجه به تئوری رانش-کشش به نظر می رسد، در صورت تشکیل پلاسما به صورت تابشی، جریان به صورت گردابه‌ای در ارتفاع نزدیک سطح تولید که با افزایش ولتاژ و یا فرکانس، زمان تولید گردابه و میزان سرعت و شدت گردابه نیز افزایش می یابد و همان طور که قبلا نیز ذکر گردید، تشکیل گردابه کوچک در جهت عکس جریان، منجر به تولید گردابه بزرگتر در ارتفاع دورتر از سطح در جهت جریان می شود

تشکیل شده در خلاف جهت نصب عملگر، منجر به تشکیل گردابه ثانویه قوی‌تری در جهت نصب عملگر پلاسما می‌گردد. در نهایت می‌توان اظهار داشت که با افزایش فرکانس جریان الکتریکی، به دلیل تشکیل پلاسما در ولتاژ پایین‌تر و تشکیل سریع‌تر آن نسبت به فرکانس کمتر، تغییرات بیشتری در توزیع فشار مشاهده می‌گردد. در پایان، نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که چیدمان‌های مختلف تأثیری بر تئوری‌های حاکم بر نحوه تشکیل باد یونی ندارد.



شکل ۱۵ - تشکیل پلاسما در ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۸ کیلوهرتز به صورت کامل.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دو چیدمان مختلف از عملگر پلاسما DBD بر روی صفحه تخت در هوای ساکن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر ولتاژ و فرکانس جریان الکتریکی بر نحوه توزیع فشار و ایجاد ممنوم در نقاط نزدیک سطح بر روی صفحه تخت پرداخته شده است.

نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی در هر دو چیدمان دلالت بر این نتایج دارد که عملگرهای پلاسما منجر به تولید ممنوم در نقاط نزدیک سطح گردیده و باعث تولید باد یونی می‌شود و با توجه به میزان افزایش ولتاژ - بالاتر از ولتاژ شکست - و فرکانسی جریان الکتریکی که با آن پلاسما تشکیل می‌شود، سرعت باد یونی افزایش می‌یابد. با افزایش ولتاژ و تشکیل پلاسما به صورت واضح، شاهد بوجود آمدن تغییرات در توزیع فشار می‌باشیم و همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در ابتدا، با افزایش ولتاژ، تا قبل از ولتاژ شکست، پلاسمایی تشکیل نشده و تغییرات محسوسی در ایجاد ممنوم در نقاط نزدیک سطح مشاهده نمی‌گردد و با افزایش ولتاژ بیشتر از ولتاژ شکست، در ابتدا ممنوم در ارتفاع نزدیک سطح افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که تئوری دوم مبنی بر تولید دو نیروی الکتریکی در راستای نصب عملگر پلاسما بیشتر صادق است، اما با افزایش ولتاژ به بالاتر از مقدار مشخصی، که پلاسما قابل وضوح بر روی سطح باشد، تئوری اول صادق بوده و تولید گردابه در هر دو چیدمان ایجاد می‌گردد و گردابه کوچکتر

از محرک تخلیه سد دی الکتریک"، مجله مهندسی هوانوردی، سال دوازدهم، شماره اول، صفحات ۵۹-۶۷، ۱۳۸۹.

#### پی نوشت

1. Dielectric Barrier Discharge
2. Carrier frequency
3. Excitation frequency
4. Duty cycle
5. Electromagnetic compatibility (EMC)
6. Electromagnetic interference (EMI)

#### منابع و مراجع

- [11]. Bouchmal, A. "Modeling of Dielectric Barrier Discharge Actuator", Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2011.
- [12]. Cooney, J.A., Szlatenyi, C., Fine, N.E., "The Development and Demonstration of a Plasma Flow Control System on a 20 Kw Wind Turbine", AIAA paper, No. 1302, 2016.
- [13]. Cai, J., Tian, Y., Meng, X., Han, X., and Zhang, D. "An Experimental Study of Icing Control Using DBD Plasma Actuator", Journal of Experiments in Fluids, Vol.58, No.102, 2017.
- [14]. Güler, A.A., Seyhan, M. Akansu, Y.E. "Effect of Signal Modulation of DBD Plasma Actuator on Flow Control Around NACA 0015", Journal Of Thermal Science and Technology, Vol.38, No.1, pp.95-105, 2018.
- [15]. Hu, X. Gao, C., Hao, J., Zhang, Z., Xue, M. Yan, R. "Experimental Study of Rotor Flow Separation Control Using a New Type of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator", Journal of Thermal Science, Vol.28., No.2, pp.354-359, 2019.
- [۱۶]. عبدی زاده، غلامرضا، سجاده، قاسم‌لو "بررسی عددی اثر عملگر پلاسمایی بر ضرایب آیرودینامیکی یک ایرفویل تحت نوسان انتقالی"، مجله مهندسی مکانیک، پیاپی ۸۸، جلد ۴۹، شماره ۳، صفحه ۲۴۸-۲۳۹، ۱۳۹۸.
- [۱۷]. حریمی، سروش، خوشخو، روح الله، شمس، محمدحسین، "بررسی تجربی تاثیر آرایش‌های مختلف عملگرهای پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک بر میزان نیروهای آیرودینامیکی تولید شده بر روی صفحه تخت"، مجله دانش و فناوری هوافضا، دوره ۹، شماره ۳، ۱۳۹۹.
- [18]. Font. G., Morgan, W. "Plasma Discharge in Atmospheric Pressure Oxygen for Boundary Layer Separation Control", Journal of AIAA, No.4632, 2005.
- [1]. Roth, J., Sherman, D., Wilkinson, S., "Boundary Layer Flow Control with a one Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma", 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1998.
- [2]. Van Dam, C., Berg, D.E., and Johnson, S.J. "Active Load Control Techniques for Wind Turbines", Technical Report, Sandia National Laboratories, 2008.
- [3]. Jacob, J., Rivir, R., Carter, C. "Boundary Layer Flow Control Using AC Discharge Plasma Actuators", AIAA paper, No. 2128, 2004.
- [4]. Jacob, J., Ramakumar, K., Anhony, R., Rivir, R.B., "Control of Laminar and Turbulent Shear Flows Using Plasma Actuators", 4th International Symposium on Turbulence and Shear-flow Phenomena, June 2005.
- [5]. Post, M.L., Corke, and T.C., "Flow Control with Single Dielectric Barrier Plasma Actuators", AIAA Paper, No.4630, 2005.
- [6]. Ramakumar, K., Jacob, J.D., "Flow Control and Lift Enhancement Using Plasma Actuators", AIAA paper, No. 4635, 2005.
- [7]. Suzen, Y.B., Huang, P.G., Jacob, J.D., Ashpis, D.E. "Numerical Simulation of Plasma Based Flow Control Applications", AIAA paper, No. 4633, 2005.
- [8]. Suzen, Y.B., Huang, P.G., "Simulation of Flow Separation Control Using Plasma Actuators", AIAA paper, No. 887, 2006.
- [9]. Santhanakrishnan, A., Jacob, J.D., "Flow Control Using Plasma Actuators and Linear Annular Plasma Synthetic Jet Actuator", AIAA paper, No. 3033, 2006.
- [۱۰]. جعفری، محمدجواد، صفری، مینا، احمدی زاده، یدالله، شکری، بابک "کنترل جریان هوا در لایه مرزی با استفاده