

# بررسی تجربی تأثیر آرایش‌های مختلف عملگرهای پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک بر میزان نیروهای آیرودینامیکی تولیدشده روی صفحه تخت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۶

سروش حریمی<sup>۱</sup>، روح‌الله خوشخو<sup>۲</sup>، محمدحسین شمس<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، ایران

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران، r.khoshkhoo@mut-es.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده الکتروسرام و مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

## چکیده

در دهه گذشته، استفاده از عملگرهای پلاسمای برای اعمال مکانیزم کنترلی بسیار مورد توجه بوده است. یکی از انواع عملگرهای پلاسمای عملگر پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) است. از ویژگی‌های آن می‌توان به ساده بودن ساختار آن، زمان پاسخ‌گویی سریع، توان مصرفی کم و نداشتن بخش‌های متحرک اشاره کرد. در این تحقیق، تأثیر استفاده از چند عملگر پلاسمای DBD در فواصل و تعداد مختلف برای تولید نیروهای آیرودینامیکی به صورت آزمایشگاهی روی صفحه تخت بررسی شد، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که عملگرهای پلاسمای می‌توانند باعث ایجاد نیروی برآ و رانش شوند که به طور مستقیم با میزان ولتاژ و فرکانس جریان الکتریکی در ارتباط است و با افزایش ولتاژ از میزان ولتاژ شکست، نرخ تولید نیروهای برآ و رانش نیز افزایش می‌یابد. همچنین، میزان فرکانس جریان الکتریکی بر میزان ولتاژ شکست تأثیر بسزایی دارد. در نهایت در آزمایش‌ها مشاهده شد که فاصله بین عملگرهای پلاسمای می‌تواند تأثیر مهمی در میزان تولید نیروهای آیرودینامیکی داشته باشد و تأثیر فاصله بین عملگرها از تعداد عملگرهای پلاسمای مورد استفاده در تولید نیروهای آیرودینامیکی مهم‌تر است.

واژه‌های کلیدی: کنترل جریان، عملگر پلاسمای DBD، نیروهای آیرودینامیکی، بررسی تجربی

## Experimental Survey of Different Configurations of DBD Plasma Actuator on Aerodynamic Forces on Flat Plate

Soroush Harimi<sup>1</sup>, Rouhollah Khoshkhoo<sup>2</sup>, Mohammad Hoseyn Shams<sup>3</sup>

1- Graduated Student, Faculty of mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Malek ashtar University of Technology, Iran, r.khoshkhoo@mut-es.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Electroseram and Electrical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

### Abstract

Plasma actuators application in flow control was a focus of attention in recent decade. DBD plasma actuators are a subgroup of plasma actuators owing simple structure, fast response time, low power consumption and lack of moving parts. In this study, the effects of using multiple DBD plasma actuators at different distances and numbers to produce aerodynamic forces were experimentally evaluated on a flat plate. DBD plasma actuator performance was directly related to the voltage and frequency of the electric current; by raising the voltage above the breakdown voltage, the rate of thrust and lift forces will increase while the frequency of electric current significantly influences the breakdown voltage. Furthermore, the study reveals that the distance between the plasma actuators has a major role on the amount of aerodynamic forces, offering more impact in comparison with number of plasma actuators.

**Keywords:** Flow control, DBD plasma actuator, Aerodynamic forces, Experimental survey

۱۰۳

سال ۱۰- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

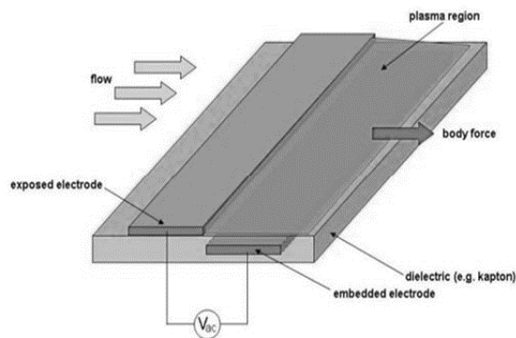
نشریه علمی دانش و

فناوری هوا فضا



## ۱. مقدمه

موجب به وجود آمدن مقاومت بیشتر از حد نمی‌شود [۱].



شکل ۱- شماتیکی از عملگر پلاسمای DBD

عملگرهای پلاسمای، نوعی از عملگرهای کنترل جریان هستند که پلاسمای در دمای پایین در آنها تشکیل می‌شود. چشم‌انداز استفاده از این عملگرها برای به تأخیر انداختن جدایش، افزایش برآ، کاهش پسا و حتی به‌عنوان جایگزین برای سطوح کنترل سنتی از قبیل فلپ و ایلرون است. به‌طور کلی، عملگرهای پلاسمای، جریان عبوری از روی بال که در ناحیه مرزی قرار دارند، یونیزه کرده و تا حدودی به پلاسمای تبدیل می‌کند. این امر موجب می‌شود که پلاسمای ایجاد شده تحت تأثیر میدان الکتریکی، تولید نیروی الکتریکی نموده و به تولید باد یونی در جهت جریان منجر شود.

استفاده از عملگرهای پلاسمای به‌عنوان ابزار کنترل جریان مفهومی به نسبت جدید است. در واقع تحقیقات بسیار زیادی در طول دهه 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، رود و همکارانش، اولین نتایج مربوط به عملگر پلاسمای DBD را منتشر کردند [۱]. تحقیقات اولیه درباره عملگر پلاسمای و پیشرفت این عملگرها، راه را برای محققان دیگر در زمینه آیرودینامیک برای بررسی جامع‌تر اثرات این نوع

کنترل جریان، به معنای دست‌کاری در میدان جریان اطراف جسم، برای به‌دست آوردن تغییرات مطلوب است که از نظر تکنولوژیکی اهمیت بسیار زیادی دارد. این تغییرات مطلوب، شامل کاهش پسا، کاهش نویز، تأخیر انتقال، بهبود نیروی برآ، به تعویق انداختن جدایش و... است. سیستم‌های کنترل جریان می‌تواند به کاهش مصرف سوخت در وسایل زمینی، دریایی و هوایی و در نتیجه کاهش هزینه و ایجاد وسایل سازگارتر با محیط‌زیست منجر شود.

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. روش‌های کنترلی می‌تواند به‌صورت ترکیبی از روش‌های فعال و غیرفعال در نظر گرفته شود. در طول دهه گذشته، تمرکز بیشتر در به‌کارگیری روش‌های فعال بوده است.

یکی از روش‌های کنترل جریان، استفاده از عملگرهای پلاسمای DBD است. عملگرهای پلاسمای DBD، پیکربندی بسیار ساده‌ای دارند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این نوع عملگرها شامل دو صفحه فلزی به‌عنوان الکترود 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 به‌راحتی دیده می‌شود و الکترود دیگر، در داخل ماده عایق پنهان شده است. جنس دی‌الکتریک اغلب، کاپتون یا تفلون است. عملگر پلاسمای به‌هیچ‌وجه سطح مقطع زیادی در مقابل جریان ندارد و قرار دادن آن روی سطوح آیرودینامیک،

۱۰۴

سال ۱۰ - شماره ۲  
پاییز و زمستان ۱۴۰۰  
نشریه علمی دانش و فناوری هوا فضا



بررسی تجربی تأثیر آرایش‌های مختلف عملگرهای پلاسمای  
تخلیه سد دی‌الکتریک بر میزان نیروهای آیرودینامیکی...

عملگر بر کنترل جریان، گشود [۲]. ژاکوب و همکارانش در سال ۲۰۰۴، تأثیر عملگر پلاسما *DBD* بر جریان لایه مرزی در سرعت‌ها، فرکانس‌ها و توان‌های تحریک مختلف به صورت تجربی را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سیال بلافاصله در مجاورت عملگر پلاسما شتاب می‌گیرد و جت آشفته در پایین دست عملگر پلاسما تولید می‌شود که جت القایی ناشی از مکش سیال از جریان بالادست است. همچنین نتایج به دست آمده از تحقیق، نشان می‌دهد که علاوه بر این، مومنتوم سیال نزدیک سطح افزایش یافته و لایه مرزی پایین دست عملگر کاهش می‌یابد [۳].

ژاکوب و همکارانش در ادامه تحقیقات خود، در سال ۲۰۰۵ به کنترل جریان برشی آرام و آشفته به وسیله عملگر پلاسما *DBD* به صورت تجربی پرداختند. در این تحقیق ابتدا جریان ساکن روی صفحه تخت که با عملگر پلاسما تحریک می‌شد، بررسی شد. در ادامه، لایه مرزی به وجود آمده روی صفحه تخت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد، عملگر باعث تولید جت در نزدیک دیوار می‌شود؛ هرچند نوسان‌هایی در مشخصات جریان در نزدیک عملگر نیز به وجود می‌آورد. این اثرات نوسانی در شرایطی که سرعت تولید شده به وسیله عملگر به دلیل وجود سرعت در جریان آزاد کم می‌شود، نیز به چشم می‌آید. هرچند در این شرایط، جابه‌جایی و ضخامت مومنتوم در ناحیه پایین دست عملگر *DBD*، کاهش می‌یابد [۴].

پست و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۵ با بررسی آزمایشگاهی، توانایی‌های عملگر پلاسما *DBD* را در کنترل جریان بازگشتی در کاربردهای مختلف از قبیل کنترل جریان جدا شده از لبه حمله ایرفویل، کنترل واماندگی

دینامیکی در یک ایرفویل در حال نوسان اثبات کردند [۵].

راماکومار و ژاکوب در سال ۲۰۰۵، نقش عملگرهای پلاسما را به عنوان وسیله‌های مؤثر در کنترل جریان به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این تحقیق، پروفیل سرعت القاشده برای شکل‌های مختلف موج جریان الکتریکی اعمالی به عملگر بررسی شد. بیشینه سرعت خروجی برای موج ولتاژ ورودی به شکل سینوسی، مربعی و دندان‌اره‌ای و با تغییر فرکانس ورودی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد، هرچند که شکل کلی پروفیل سرعت القایی در شکل موج‌های مختلف، مشابه یکدیگر است، اشکال مختلف موج جریان الکتریکی اعمالی، ساختارهای مختلف جریان را نتیجه می‌دهد [۶].

سوزن و همکارش در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶، مدلی عددی برای شبیه‌سازی عملگر پلاسما *DBD* معرفی کردند. در این مدل الکترواستاتیکی که بر پایه داده‌های تجربی به دست آمده است، آن‌ها اثر عملگر پلاسما بر میدان جریان را به کمک یک بردار نیروی بدنی، مدل‌سازی کردند. برای محاسبه این نیرو، دو معادله در شبکه محاسباتی مورد نظر حل شد. معادله اول، معادله‌ای برای به دست آوردن توزیع میدان الکتریکی بر اثر ولتاژ اعمالی به الکترودها و معادله دوم، معادله‌ای برای تعیین غلظت ذرات باردار در هوای یونیزه شده بود. این مدل برای جریان ساکن روی صفحه تخت، اجرا و نتایج آن با کار تجربی مشابه به دست آمده توسط ژاکوب اعتبارسنجی شد [۷-۸].

سانتاناکریشن و همکارانش در سال ۲۰۰۶، سه هندسه مختلف عملگر پلاسما *DBD* را در عدد رینولدز پایین برای کنترل جریان روی سطح استوانه بررسی کردند. یک هندسه، عملگر



پلاسمای *DBD* معمولی، یکی عملگر پلاسمای جت مصنوعی<sup>۲</sup> و هندسه سوم، ترکیب عملگر پلاسمای معمولی و عملگر پلاسمای جت مصنوعی بود. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که عملگر پلاسمای متداول، کنترل جدایش جریان بهتری نسبت به دو هندسه دیگر دارد [۹].

بوچمال نیز در سال ۲۰۱۱ در تحقیق خود، مدل سوزن را به کمک *UDF* در نرم‌افزار فلوئنت مدل‌سازی کرد و با اعمال تغییراتی، مدل سوزن را بهبود داد [۱۰].

شمس طالقانی و همکاران در سال ۱۳۹۱، به بررسی تجربی تأثیر عملگر پلاسمای *DBD* در کنترل جریان روی سطح ایرفویل ناکا ۰۰۱۲، تا زاویه ۶ درجه پرداختند. عملگر پلاسمای به صورت ناپایا استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیکل وظیفه در حدود ۱۴ درصد، بهترین نتیجه را در کنترل جدایش جریان دارد. [۱۱].

شمس طالقانی و همکاران در سال ۱۳۹۱، به بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی در مشخصه‌های جریان یونی القایی با عملگر پلاسمای در هوای ساکن پرداختند، پروفیل‌های سرعت متوسط باد یونی القایی نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک، موقعیت سرعت بیشینه به سطح نزدیک‌تر می‌شود، همچنین با افزایش درصد سیکل کاری، قدرت گردابه‌های تولیدی از عملگرها نیز افزایش می‌یابد [۱۲].

در سال ۲۰۱۶، کونی و همکارانش به منظور افزایش راندمان توربین‌های بادی ۲۰ کیلوواتی، از ۳ مدل مختلف عملگر پلاسمای بر سطح پره‌های توربین استفاده نمودند. نتایج حاصله نشان داد که با استفاده از بهترین مدل، در سرعت باد بین ۷-۸ متر بر ثانیه، راندمان توربین باد در حدود ۲/۱ درصد و در سرعت باد در حدود ۹-۸ متر بر ثانیه،

راندمان آن در حدود ۵/۹ درصد افزایش می‌یابد [۱۳].

کای و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی تجربی کنترل پدیده یخ‌زدگی با استفاده از عملگرهای پلاسمای *DBD* پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با قرار دادن عملگر پلاسمای روی سطح، می‌توان از یخ‌زدگی سطح جلوگیری کرد. همچنین در صورت وجود یخ با ضخامت ۵ میلی‌متر بر سطح، با روشن شدن عملگر پلاسمای در مدت‌زمان ۱۵۰ ثانیه، یخ به‌طور کامل ذوب می‌شود [۱۴].

گولر و همکارانش در سال ۲۰۱۸، تأثیر عملگر پلاسمای *DBD* در حالت ناپایا بر کنترل جریان اطراف ایرفویل ناکا ۰۰۱۵<sup>۲</sup> بررسی کردند. نتایج نشان داد که فرکانس تحریک در حدود یک می‌تواند، بیشترین میزان افزایش برآ و کمترین میزان جدایش جریان روی سطح ایرفویل ایجاد نماید [۱۵].

شمس طالقانی و همکاران در سال ۲۰۱۸، مطالعه پارامتریک یک عملگر پلاسمای در تحریک ناپایدار و اندازه‌گیری سرعت جریان القایی در جهت کنترل جریان را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش چرخه وظیفه به‌طور متناوب باعث افزایش قدرت ریختن گردابه‌های تولیدی می‌شود، همچنین فرکانس تحریک و ضخامت تعداد لایه‌های دی‌الکتریک کاپتون تأثیری بر این فرکانس بهینه نداشته، ولی روی پایداری پلاسمای سرعت بیشینه تولیدشده تأثیرگذار است [۱۶].

هو و همکاران در سال ۲۰۱۹، به مطالعه تجربی کنترل جدایش جریان روی پره روتور بالگرد با استفاده از نوع جدید عملگر پلاسمای *DBD* پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جدایش جریان روی سطح پره در سرعت‌های چرخش ۶۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، از بین

۱۰۶

سال ۱۰ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

نشریه علمی دانش و فناوری هوا فضا



تجربه سد دی‌الکتریک بر میزان نیروهای آبرودینامیکی...  
بررسی تجربی تأثیر آرایش‌های مختلف عملگرهای پلاسمای

می‌رود، اما در سرعت‌های ۳۰۰ دور بر دقیقه و کمتر، ناحیه جدایش به مساحت کوچکی وجود دارد [۱۷].

رودسری و همکاران، به بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر عملگر پلاسمای DBD بر جریان هوا روی صفحه تخت با استفاده از شبیه‌سازی پرداختند. سرعت جریان هوا روی سطح صفحه تخت، ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشینه سرعت متوسط جریان در پایین دست محرک و در نزدیکی سطح اتفاق می‌افتد [۱۸].

ساتو و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی تأثیر استفاده از دو مدل مختلف از عملگرهای پلازما به صورت چندگانه پرداختند، نتایج آن‌ها حاکی از این مسئله است که در صورت استفاده از مدل جدید عملگر پلازما، افزایش چشم‌گیری در میزان نیروهای هیدرودینامیک، سرعت باد یونی و نیروی رانش را شاهد خواهیم بود [۱۹].

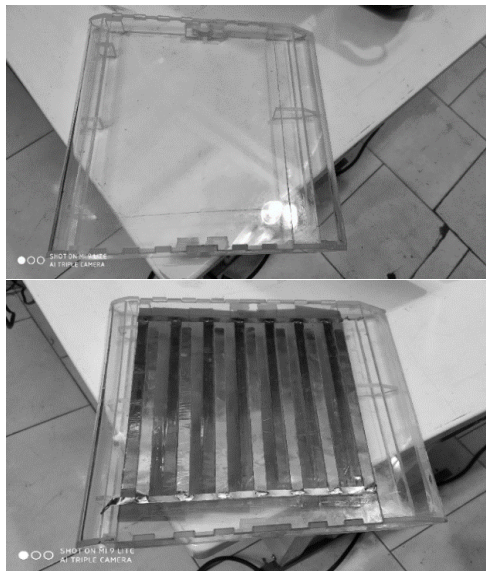
در تحقیقات صورت گرفته تاکنون، تأثیر اهمیت فاصله و تعداد عملگر پلاسمای DBD متعارف، با توجه به تغییرات ولتاژ و فرکانس جریان الکتریکی مدنظر قرار نگرفته بود. بیشتر آرایش‌های موردبررسی در حدود ۳ تا ۴ عملگر بوده که بدون بررسی تأثیر فاصله عملگرها بر میزان نیروهای برآ و رانش بود. در این تحقیق، به بررسی تجربی میزان نیروی‌های برآ و رانش به‌دست‌آمده با استفاده از عملگر پلازما روی صفحه تخت و بررسی تأثیرات این دو نیرو نسبت به تغییر ولتاژ و فرکانس جریان الکتریکی در دو آرایش متفاوت نحوه قرارگیری عملگرهای پلازما پرداخته شده است، هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر اهمیت فاصله و تعداد عملگرهای پلازما بر میزان تولید نیروهای آیرودینامیکی است. همچنین میزان مؤثر بودن ولتاژ و فرکانس نیز بر میزان نیروهای آیرودینامیکی بررسی شد.

## ۲. تجهیزات آزمون

در این بخش، مجموعه تجهیزات و ابزار موردنیاز برای انجام آزمایش و سیستم داده برداری ارائه شده است.

### ۲-۱. مدل صفحه تخت

مدل موردبررسی از پلکسی‌گلس با ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده است و دارای ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع است که در قسمت لبه حمله و لبه فرار آن پس از بررسی مقاله‌ها تصمیم گرفته شد که از ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ الگوبرداری شود تا در صورت قرار گرفتن مدل در جریان، لایه‌مرزی بهتری تشکیل شود و جدایش جریان، در ابتدای مدل رخ ندهد، همچنین قسمت بالای صفحه به صورت جداشونده طراحی شد تا بتوان مدل‌های عملگرهای پلازما را راحت‌تر تعویض کرد. در زیر تصاویری از مدل با عملگرهای پلازما و بدون آن در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- مدل صفحه تخت مورد استفاده برای انجام تست آزمایشگاهی

### ۲-۲. تجهیزات تولید و نظارت پلاسمای سرد غیرتعادلی

منبع تغذیه متناوب استفاده شده در این

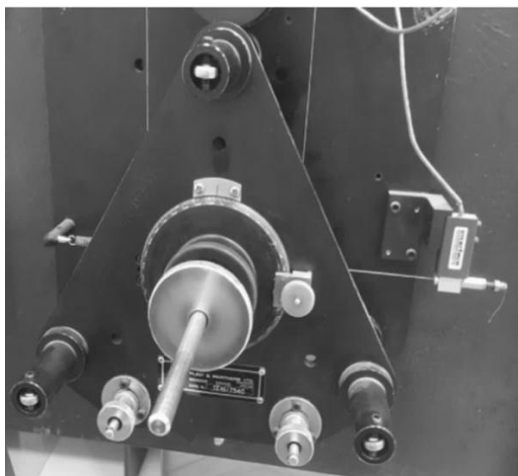


آزمایش‌ها یک منبع تغذیه با حداکثر توان خروجی یک کیلووات و طیف گسترده‌ای از پارامترهای الکتریکی برای تشکیل پلازما توسط عملگرهای پلاسمایی مختلف است. بازه ولتاژ خروجی و محدوده فرکانس حامل<sup>۴</sup> منبع تغذیه به ترتیب ۱ تا ۳۰ کیلوولت و ۱ تا ۳۰ کیلوهرتز است. فرکانس تحریک ناپایا<sup>۵</sup> در بازه ۰/۰۲ تا ۱/۲ کیلوهرتز و سیکل کاری<sup>۶</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 شده است. برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیس<sup>۷</sup> و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیس<sup>۸</sup> ناشی از عملکرد منبع تغذیه ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی به‌خصوص تجهیزات اندازه‌گیری و داده برداری، از کابل‌های دارای پوشش محافظ الکتریکی و ملاحظات تطبیق امپدانس در طراحی منبع تغذیه استفاده شده است. فاصله بین منبع تغذیه و ابزارهای اندازه‌گیری، دو و نیم متر مدنظر قرار گرفت. در این تحقیق، جریان الکتریکی به‌صورت پایا در نظر گرفته شد.

### ۲-۳. بالانس سه مؤلفه‌ای تونل باد TE44

دستگاه بالانس سه مؤلفه‌ای پلینت برای تونل باد آموزشی 460 mm × 460 mm TE44 تهیه شده است. اما می‌تواند برای هر تونل باد با سایز یا پیکربندی مناسب، استفاده شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. چارچوب اصلی دستگاه بالانس شامل صفحه نصب است که به دیواره مقطع آزمون تونل باد نصب می‌شود که صفحه مثلثی نیرو بر این قسمت سوار است. صفحه نیرو و صفحه نصب با سه عدد بازوی حمایتی به هم متصل شده‌اند که از سه قسمت

گوشه صفحه نیرو خارج شده است. هر بازو به صفحه نیرو و صفحه نصب از طریق مفصل‌های کره‌ای نصب شده است. تأثیر این موضوع بدین صورت است که صفحه نیرو محدود به حرکت صفحه‌ای موازی با صفحه نصب می‌شود. در عین اینکه آزادانه حول محور افقی می‌چرخد. بنابراین سه درجه آزادی الزامی فراهم می‌شود. صفحه نیرو می‌تواند به‌صورت مکانی با دو عدد گیره مرکزی قفل شود و این گیره‌ها همواره مادامی که از بالانس استفاده نمی‌شود، یا در هنگام تغییر مدل، باید قفل بمانند. نیروهای اعمال شده به صفحه نیرو به‌وسیله کابل‌های انعطاف‌پذیر به لودسل‌های استرین گیج منتقل می‌شود که به ترتیب، نیروی برای پشت، جلو و نیروی پسا را اندازه‌گیری می‌کند. کابل پسا به‌صورت افقی است. درحالی‌که دو کابل برآ، به‌صورت عمودی است. مجموع نیروی پشت و جلو تقسیم بر ۲، نیروی کل برآ را می‌دهد، درحالی‌که اختلاف این دو نیرو، زمانی که ضرب در ۰/۱۲۷ می‌شود، گشتاور خمشی را به واحد نیوتن-متر نشان می‌دهد. نیروی برآ و پسا مستقیماً به واحد نیوتن است. عدم قطعیت داده‌ها، برابر  $\pm 1$  گرم که معادل  $\pm 0/00980665$  نیوتن است، گزارش شده است.



شکل ۳- بالانس سه مؤلفه‌ای تونل باد TE44

## ۲-۳-۱. کالیبراسیون بالانس سه مؤلفه‌ای تونل

### باد TE44

بالانس در طول ساخت، به صورت دقیق کالیبره شده است. با وجود این، به صورت دوره‌ای، دستگاه بالانس کالیبره می‌شود. پروسه کالیبراسیون، شامل استفاده از نیروهای برآ، پسا معین و مشخص با استفاده از وزنه‌هاست. کالیبراسیون دستگاه، زمانی که بالانس از تونل برداشته شده باشد، بهتر انجام می‌شود. بالانس دارای یک بازوی کالیبره کننده به قطر  $mm$  12 است که در گیره مدل جا می‌خورد. برای کالیبراسیون لودسل‌های برآ، قلاب چرخشی در موقعیت روی محور بازوی کالیبراسیون تنظیم می‌شود. وزنه‌ها از طریق یک قلاب روی زنجیر بارگذاری اعمال می‌شوند. به دلیل اینکه لودسل‌های برآ به صورت متقارن روی هر طرف محور بالانس قرار گرفته است، فرض می‌شود که بارهای اعمال شده به صورت مساوی بین دو سل تقسیم می‌شود. برای کالیبراسیون لودسل پسا، نیروی افقی به بازوی کالیبراسیون به وسیله بارگذاری با وزنه‌ها، سیم نایلونی و قرقره اعمال می‌شود.

## ۲-۴. عملگرهای پلاسما

آرایه عملگرهای DBD با چهار لایه دی‌الکتریک کاپتون با ضخامت  $0/4$  میلی‌متر روی قسمت جداشونده صفحه تخت ساخته شدند. طول هر الکتروود  $20$  سانتی‌متر و عرض آن‌ها  $1$  سانتی‌متر در نظر گرفته شده است، همچنین ضخامت الکتروودها  $0/1$  میلی‌متر است. دو آرایش متفاوت ساخته شده از عملگرهای پلاسما در شکل ۴ مشاهده می‌شوند. در آرایش اول، تعداد ۸ عملگر پلاسما نصب شد که فاصله بین آن‌ها، برای جلوگیری از برهم‌کنش میدان‌های الکتریکی آن‌ها بر یکدیگر،  $5$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. در

آرایش دوم، تعداد ۷ عملگر پلاسما روی مدل نصب شد که فاصله بین آن‌ها  $10$  میلی‌متر در نظر گرفته شد تا میزان تأثیر فاصله بین عملگرها در آزمایش‌ها نیز بررسی شود.



(الف) فاصله بین عملگرهای پلاسما  $5$  میلی‌متر



(ب) فاصله بین عملگرهای پلاسما  $10$  میلی‌متر

شکل ۴- چیدمان‌های مختلف از نحوه قرارگیری عملگر پلاسما

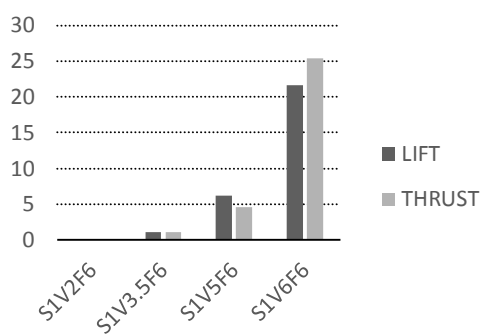
## ۳. بررسی تکرارپذیری و شرایط آزمایش

در این تحقیق، برای اطمینان از دقت نتایج و تکرارپذیری آن، مقدار نیروهای برآ و رانش برای آرایش اول چهار بار تکرار شد که نتایج آن برای فرکانس  $6$  کیلوهرتز و ولتاژهای  $2$ ،  $3$ ،  $5$  و  $6$  کیلوولت، برای نیروی برآ در شکل  $5$  و برای نیروی رانش در شکل  $6$  نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در  $4$  تکرار برهم هم‌پوشانی دارند.

همه آزمایش‌های اندازه‌گیری نیروهای برآ و رانش روی مدل صفحه تخت و با استفاده از تجهیزات معرفی شده (بالانس سه مؤلفه‌ای) انجام شده است. عددماخ، صفر در نظر گرفته شد و



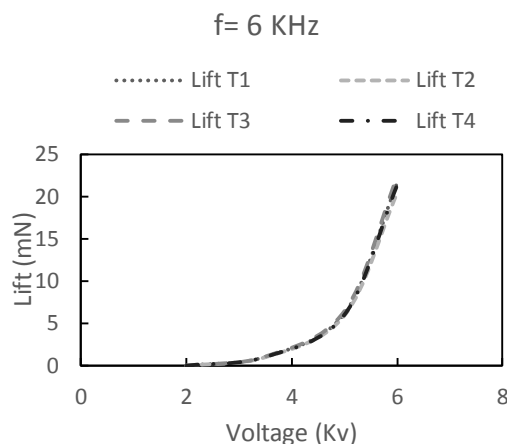
در همه موارد، میزان فرکانس جریان الکتریکی در حدود ۶ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. علت انتخاب فرکانس ۶ کیلوهرتز، این است که در مقاله‌های متعدد اشاره شده که بهترین فرکانس برای ایجاد پلاسما در عملگرهای پلاسما DBD در حدود ۶ کیلوهرتز است. با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹ با افزایش ولتاژ، نیروی برآ و رانش افزایش می‌یابد. تا قبل از تشکیل پلاسما-ولتاژ ۲ کیلوولت- نیروهای برآ و رانش مشاهده نمی‌شود. زیرا ولتاژ شکست برای تشکیل پلاسما در حدود ۳ کیلوولت است.



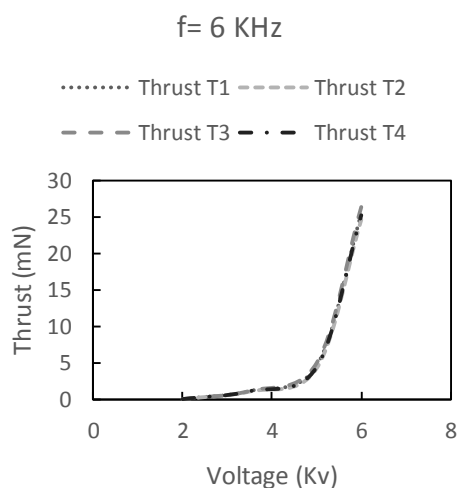
شکل ۷- تغییرات نیروی‌های برآ و رانش در آرایش اول (در ولتاژهای ۲، ۳، ۵ و ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز)

پس‌از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل پلاسما شاهد افزایش هر دو نیرو هستیم. ابتدا در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت تقریباً میزان هر دو نیرو باهم برابرند، در ولتاژ ۵ کیلوولت که در شکل ۱۱، میزان تشکیل پلاسما نشان داده شده است، نیروی برآ بیشتر از نیروی رانش و در نهایت در ولتاژ ۶ کیلوولت که در شکل ۱۲، میزان تشکیل پلاسما با وضوح بیشتری قابل مشاهده است، نیروی رانش بیشتر از برآ می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که میزان افزایش نیروهای برآ و رانش نسبت به ولتاژ، هر دو به صورت خطی نمی‌باشند. بلکه با افزایش ولتاژ، میزان نیروهای تولیدی نیز با شدت بیشتری، افزایش می‌یابد.

مدل نیز در زاویه حمله صفر نصب شد. ولتاژ اعمالی برای تولید پلاسما، ۲ تا ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز در نظر گرفته شد.



شکل ۵- نتایج تکرارپذیری نیروی برآ مربوط به آرایش اول



شکل ۶- نتایج تکرارپذیری نیروی رانش مربوط به آرایش اول

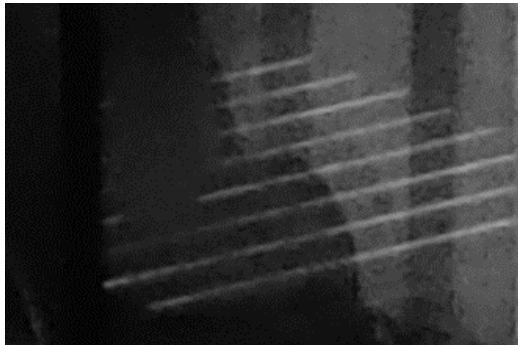
#### ۴. بحث و بررسی نتایج

##### ۴-۱. بررسی تأثیر ولتاژ بر میزان نیروی آیرودینامیکی تولیدی

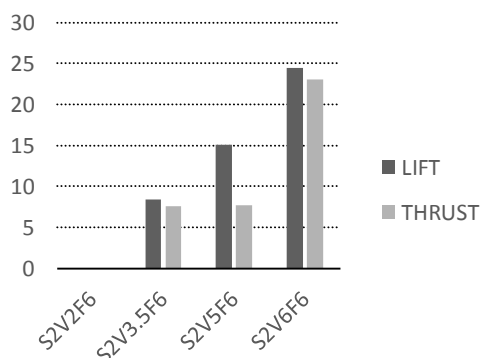
آرایش اول عملگرهای پلاسما در شکل ۴ الف) مشاهده می‌شود، که در آن فاصله بین عملگرها، نیم سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۸ تا ۱۰، نمودار، نیروی برآ و رانش تولیدی بر حسب تغییر ولتاژ نشان داده شده است.



عملگرها یک سانتی متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲، نموداری برای ارزیابی میزان نیروهای رانش و برآ برحسب ولتاژ برای آرایش دوم مشاهده می شود. هر دو نیروی برآ و رانش، با افزایش ولتاژ، میزان آن‌ها افزایش می یابد.



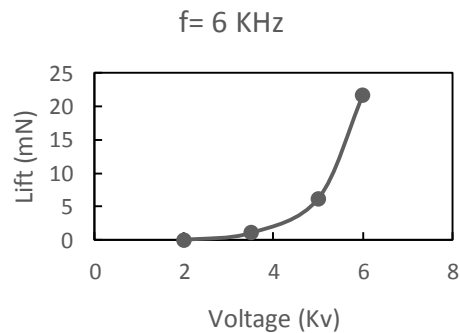
شکل ۱۱. تشکیل پلاسما در ولتاژ ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز قابل مشاهده با وضوح بیشتر و ضخیم تر



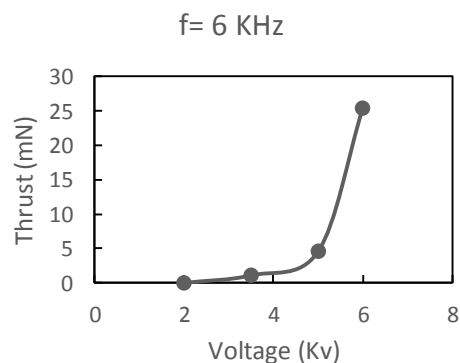
شکل ۱۲- تغییرات نیروی برآ و رانش در آرایش ۲ (در ولتاژهای ۲، ۳، ۵ و ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز)

با توجه به شکل های ۱۳ و ۱۴، در تمامی ولتاژها پس از تشکیل پلاسما و عبور از ولتاژ شکست یا ولتاژ بحرانی، نیروی برآ سیر صعودی را طی می کند، نیز در تمامی ولتاژ میزان آن از نیروی رانش هم بیشتر است. نیروی رانش هم تا ولتاژ ۳/۵ کیلوولت سیر صعودی داشته، پس از آن با قوی تر شدن پلاسما ابتدا کمی روند نزولی و سپس دوباره روند صعودی را در پیش می گیرد.

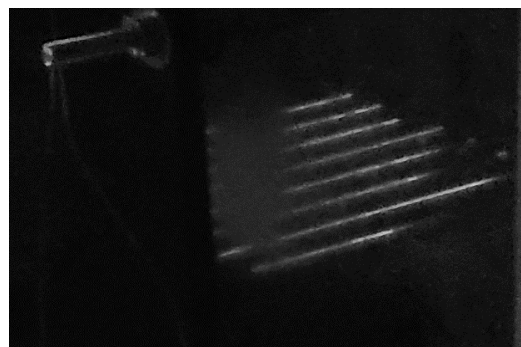
همچنین همان گونه که در شکل های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود، با افزایش ولتاژ در یک فرکانس ثابت، میزان پلاسما شکل شده، در ابعاد و ضخامت بیشتر است.



شکل ۸- نمودار نیروی برآ نسبت به تغییرات ولتاژ آرایش ۱ در فرکانس ۶ کیلوهرتز



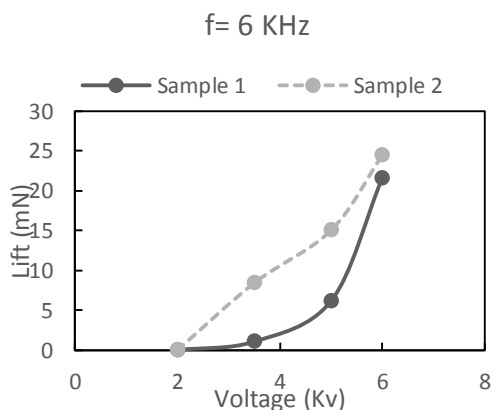
شکل ۹- نمودار نیروی رانش نسبت به تغییرات ولتاژ آرایش ۱ در فرکانس ۶ کیلوهرتز



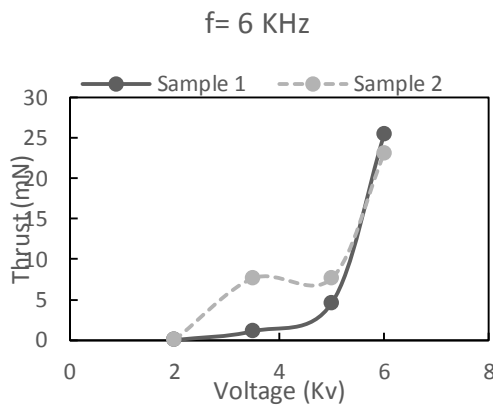
شکل ۱۰- تشکیل پلاسما در ولتاژ ۵ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز به صورت کم رنگ و ناقص

آرایش دوم عملگرهای پلاسما در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است که در آن، فاصله بین

امر، به کاهش تولید پلاسمای کامل منجر می-شود. زیرا منبع تغذیه موردنظر با ولتاژ بالا با مشکل محدودیت توان مصرفی یک کیلووات روبرو است. بنابراین، فاصله بین عملگرها، تأثیر زیادی بر میزان نیروی تولیدی دارد و باید در هنگام نصب عملگرهای متعدد روی یک سطح، فاصله بهینه‌ای بین عملگرها در نظر گرفت.



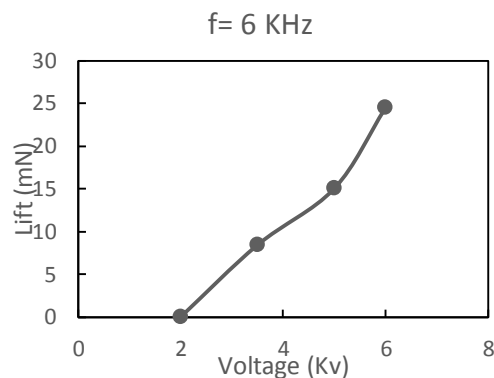
شکل ۱۵- مقایسه بین نیروی برآی آرایش ۱ و ۲ در فرکانس ۶ کیلوهرتز



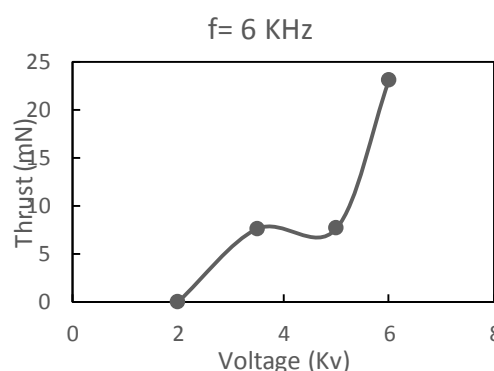
شکل ۱۶- مقایسه بین نیروی رانش آرایش ۱ و ۲ در فرکانس ۶ کیلوهرتز

#### ۴-۲. بررسی تأثیر فرکانس بر میزان نیروی ایرودینامیکی تولیدی

برای بررسی تأثیر فرکانس، آرایش دوم مورد استفاده قرار گرفت و میزان فرکانس از ۶ کیلوهرتز به ۸ کیلوهرتز تغییر داده شد. همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود، در فرکانس ۸ کیلوهرتز، در ولتاژ ۲



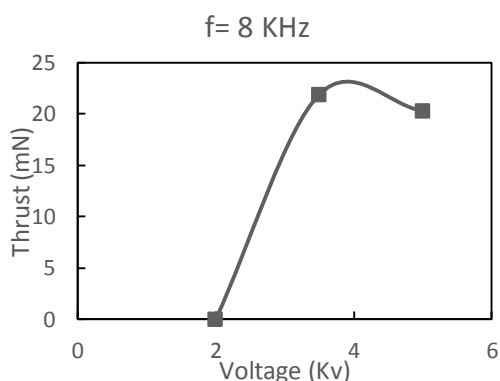
شکل ۱۳- نمودار نیروی برآ نسبت به تغییرات ولتاژ آرایش ۲ در فرکانس ۶ کیلوهرتز



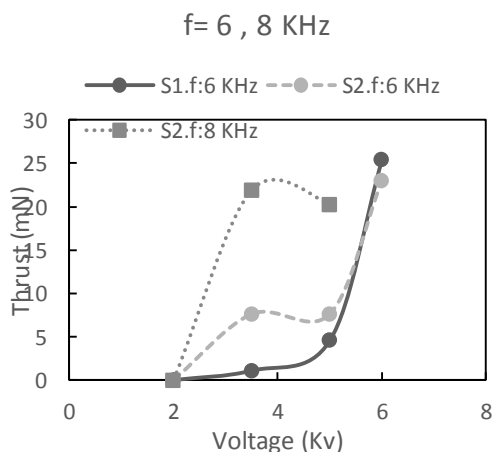
شکل ۱۴- نمودار نیروی رانش نسبت به تغییرات ولتاژ آرایش ۲ در فرکانس ۶ کیلوهرتز

در شکل ۱۵، با مقایسه نمودارها مشاهده می‌شود که آرایش دوم میزان نیروی برآی بیشتری نسبت به آرایش یک تولید می‌کند. همچنین با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که در رابطه با نیروی رانش نیز می‌توان به همین نکته اذعان داشت که به جز در ولتاژ ۶ کیلووات که در این ولتاژ میزان نیروی رانش در آرایش اول در حدود آرایش دوم است، در سایر موارد، میزان نیروی تراست آرایش دوم از آرایش اول بیشتر است. به نظر می‌رسد، علت این امر، کم بودن فاصله بین الکترودها در آرایش اول می‌باشد که به برهم‌کنش جریان‌های الکتریکی بین الکترودها با یکدیگر منجر می‌شود. از طرفی، چون طول الکترودهای آرایش اول بیشتر است، میزان برق مصرفی نیز در آرایش اول افزایش یافته و همین

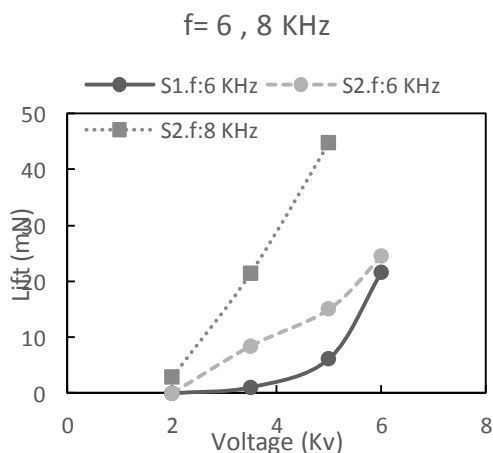
مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۹- نمودار میزان رانش نسبت به تغییرات ولتاژ آرایش ۲ در فرکانس ۸ کیلوهرتز

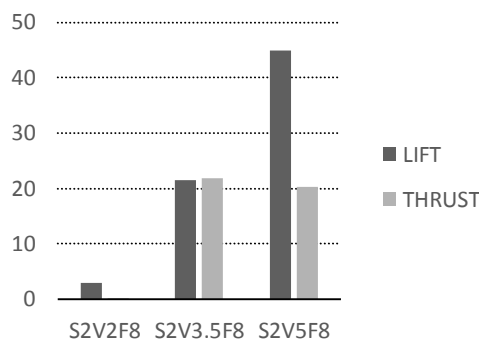


شکل ۲۰- مقایسه بین نیروی برآی آرایش ۱ و ۲ در فرکانس ۶ کیلوهرتز و آرایش ۲ در فرکانس ۸ کیلوهرتز

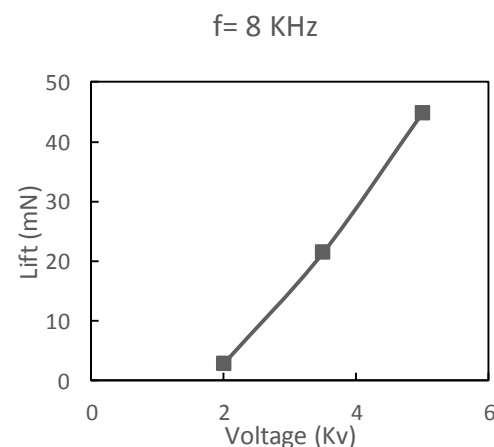


شکل ۲۱. مقایسه بین نیروی رانش آرایش ۱ و ۲ در فرکانس ۶ کیلوهرتز و آرایش ۲ در فرکانس ۸ کیلوهرتز

کیلوولت هم شاهد تولید نیروی برآ و رانش هستیم و این امر نشان می‌دهد که از تأثیر فرکانس در تولید نیرو بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس، میزان ولتاژ لازم برای تشکیل پلازما یا ولتاژ شکست، کاهش می‌یابد. پس‌از آن، در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت، افزایش نیروی برآ و رانش را خواهیم داشت، سپس در ولتاژ ۵ کیلوولت افزایش زیادی در نیروی برآ مشاهده می‌شود، اما نیروی رانش به میزان نامحسوسی نسبت به حالت قبل، کاهش می‌یابد. اما میزان نیروی برآ به‌طور مستمر در حال افزایش است.



شکل ۱۷- تغییرات نیروی برآ و رانش در آرایش ۲ (در ولتاژ ۲، ۳ و ۵) و فرکانس ۸ کیلوهرتز



شکل ۱۸- نمودار نیروی برآ نسبت به تغییرات ولتاژ آرایش ۲ در فرکانس ۸ کیلوهرتز

در شکل‌های ۲۰ و ۲۱، نیروی برآی مربوط به آرایش اول در فرکانس ۶ کیلوهرتز و آرایش دوم در فرکانس‌های ۶ و ۸ کیلوهرتز با یکدیگر

- for wind turbines, *Technical Report*, Sandia National Laboratories, 2008.
- [3] J. Jacob, R. Rivir, C. Carter, Boundary layer flow control using AC discharge plasma actuators, *AIAA paper*, No. 2128, 2004.
- [4] J. D. Jacob, K. Ramakumar, R. Anthon, R. B. Rivir, Control of laminar and turbulent shear flows using plasma actuators, *4th International Symposium on Turbulence and Shear-flow Phenomena*, June 2005.
- [5] M. L. Post, T. C. Corke, Flow control with single dielectric barrier plasma actuators, *AIAA Paper*, No. 4630, 2005.
- [6] K. Ramakumar, J. D. Jacob, Flow control and lift enhancement using plasma actuators, *AIAA paper*, No. 4635, 2005.
- [7] Y. B. Suzen, P. G. Huang, J. D. Jacob, D. E. Ashpis, Numerical simulation of plasma based flow control applications, *AIAA paper*, No. 4633, 2005.
- [8] Y.B. Suzen, P.G. Huang, Simulation of flow separation control using plasma actuators, *AIAA paper*, No. 887, 2006.
- [9] A. Santhanakrishnan, J.D. Jacob, Flow control using plasma actuators and linear annular plasma synthetic jet actuator, *AIAA paper*, No. 3033, 2006.
- [10] A. Bouchmal, *Modeling of dielectric barrier discharge actuator*, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2011.
- [11] S.A. Sayyed-shams Taleghani, A. Shaderam, M. Mirzaei, Experimental investigation of active control for changing stall angle of a NACA0012 airfoil, using plasma actuator, *Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*, Vol.1, No.1, 2012. (in Persian)
- [12] S.A. Sayyed-Shams Taleghani, A. Shaderam, M. Mirzaei, Experimental investigation of geometric and electrical characteristics by measurements of the induced flow velocity, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No.5, pp.132-145, 2013. (in Persian)
- [13] J. A. Cooney, C. Szlatenyi, N. E. Fine, The development and demonstration of a plasma flow control system on a 20 kW wind turbine, *AIAA paper*, No. 1302, 2016.

نتایج به دست آمده نشان می دهد، افزایش فرکانس، تأثیر بسزایی در میزان نیروهای برآ و رانش تولیدی توسط عملگرهای پلاسما دارد و به افزایش بیشتر نیروی به دست آمده از پلاسما، نسبت به تغییر ولتاژ منجر می شود.

## ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر تعداد و فاصله عملگر پلاسما DBD در دو آرایش مختلف برای تولید نیروهای آیرودینامیکی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. از مقایسه نیروهای آیرودینامیکی در دو آرایش مورد نظر می توان نتیجه گرفت که عملگرهای پلاسما می تواند باعث ایجاد نیروی برآ و رانش شود که به طور مستقیم با میزان ولتاژ و فرکانس آن در ارتباط است. رابطه بین تغییرات ولتاژ با نیروهای برآ و رانش به صورت خطی نیست، بلکه نمودارهای مربوطه به صورت منحنی شکل نیستند و افزایش ولتاژ باعث نرخ رشد بیشتر نیروهای برآ و رانش می شود، همچنین، فاصله بین عملگرها در هنگام استفاده از چند عملگر بسیار مهم است و در صورت استفاده از چند عملگر، باید به دنبال انتخاب فاصله بهینه بود، همچنین، فاصله بین عملگرهای پلاسما حتی از تعداد عملگرهای پلاسما در تولید نیروهای آیرودینامیکی مهم تر است و در نهایت، افزایش فرکانس باعث افزایش بیشتر این دو نیرو می شود و به نظر می رسد که تأثیر افزایش فرکانس از تأثیر افزایش ولتاژ در تولید نیروهای آیرودینامیکی در ولتاژهای کمتر از ۶ کیلوولت بیشتر است.

## ۶. مآخذ

- [1] J. Roth, D. Sherman, S. Wilkinson, Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma, *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1998.
- [2] C. Van Dam, D.E. Berg, and S.J. Johnson, Active load control techniques



- [14] J. Cai, Y. Tian, X. Meng, X. Han, D. Zhang, An experimental study of icing control using DBD plasma actuator, *Journal of Experiments in Fluids*, Vol.58, No.102, 2017.
- [15] A. A. Güler, M. Seyhan, Y. E. Akansu, 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, 2.18.
- [16] S.A. Sayyed-Shams Taleghani, A. Shaderam, M. Mirzaei, S. Abdolahipour, Parametric study of a plasma actuator at unsteady actuation by measurements of the induced flow velocity for flow control, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol.40, No.4, pp.1-13, 2018.
- [17] X. Hu, C. Gao, J. Hao, Z. Zhang, M. Xue, R. Yan, 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.
- [18] M. Ahmadpour Roudsari, H. Parhizkar, G.H. Poryoussefi, A. Tarabi, Numerical investigation of factors affecting in the steady and unsteady plasma actuators performance on the airflow through the flat plate, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol.18, No.01, pp.111-121, 2018. (in Persian)
- [19] S. Sato, H. Furukawa, A. Komuro, M. Takahashi, N. Ohnishi, Successively accelerated ionic wind with integrated dielectric-barrier-discharge plasma actuator for low-voltage operation, *Journal of Nature, Scientific Reports*, Vol. 9.1, No.5813, pp. 1-11, 2019.

## پی نوشت

- 
- 1- Dielectric Barrier Discharge
  - 2- Plasma Synthetic Jet Actuator
  - 3- NACA0015
  - 4- Carrier frequency
  - 5- Excitation frequency
  - 6- Duty cycle
  - 7- Electromagnetic compatibility (EMC)
  - 8- Electromagnetic interference (EMI)

