

## Experimental investigation of the effect of DBD plasma actuator and boundary layer on the axial compressor cascade performance

S. Mohammadi Sahebdivan 

R. Khoshkhoo 

M. Mani 

H. Eshraghi\* 

Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2024/03/31, Revised: 2024/05/29, Accepted: 2024/06/23, Published: 2024/07/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.6.2>


### ABSTRACT

The DBD Plasma actuator consists of two electrodes which exert the body force resulting from the electrical excitation and is used as a tool for active flow separation control. In the current research, the control of flow separation in a linear cascade of axial compressor blades has been experimentally investigated using a DBD plasma actuator and boundary layer suction. The experimental results show that using the DBD plasma actuator in the chord position of 30%, leads to 31% decrease in the energy dissipation, and also improves the performance of the compressor cascade blades. Likewise, applying the DBD plasma actuator in the velocity of 10 m/s results in the decrement of 19.1% in total pressure loss parameter. Also, utilizing the boundary layer suction device in the same velocity, leads in elimination of low energy part of the flow, and then decreases the total pressure loss parameter up to 14%. The performance of the linear axial compressor cascade blades using a DBD plasma actuator and boundary layer suction has been investigated and reported.


**Keywords:** Axial Compressor- Cascade-Plasma-Dielectric Barrier Discharge (DBD) Actuator- Boundary Layer-Flow Separation

## مطالعه تجربی تأثیر عملگر پلاسمای DBD و مکش لایه مرزی بر روی عملکرد کسکید کمپرسور محوری




حمزه اشراقی\* 




محمودمانی 



روح اله خوشخو 



سجاد محمدی صاحب‌دیوان 

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

### چکیده

عملگر پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک از دو الکتروود تشکیل شده که نیروی حجمی حاصل از اعمال ولتاژ الکتریکی به دو سر آن، به‌عنوان ابزار کنترل فعال جریان به کار گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر، کنترل جدایش جریان در یک کسکید کمپرسور محوری به‌وسیله عملگر پلاسمای و مکش لایه مرزی به‌صورت تجربی مطالعه شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد استفاده از عملگر پلاسمای در موقعیت ۳۰ درصد از طول وتر پره، منجر به کاهش ۳۱ درصدی اتلاف انرژی و بهبود عملکرد کسکید کمپرسور خواهد شد. همچنین عملگر پلاسمای در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، باعث کاهش ۱۹/۱ درصدی افت فشار کل می‌شود. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مکش لایه مرزی با حذف جریان کم‌انرژی از سیستم می‌تواند در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به میزان ۱۴ درصد افت فشار کل را کاهش دهد. همچنین عملکرد کسکید کمپرسور در استفاده عملگر پلاسمای و مکش لایه مرزی به‌صورت هم‌زمان و با تغییر توان مکش لایه مرزی بررسی و گزارش شده است.

**واژه‌های کلیدی:** کمپرسور محوری، کسکید، پلاسمای، عملگر تخلیه سد دی‌الکتریک، لایه مرزی، جدایش جریان

۱- کارشناسی ارشد: sjj.mohammadi@gmail.com

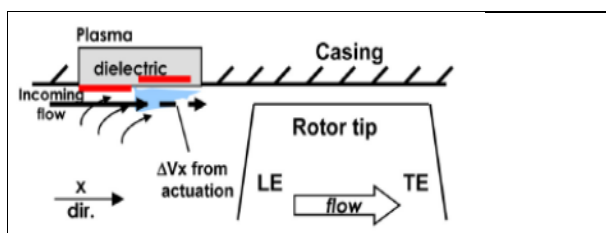
۲- استادیار: r.khoshkhoo@aut.ac.ir

۳- استاد: mani@aut.ac.ir

۴- دکتری (نویسنده پاسخگو): eshraghi@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

یعنی حدفاصل نوک پره تا پوسته می‌گذارد و سبب حذف جریان در فاصله بالایی پره و بهبود ناحیه واماندگی می‌شود. آزمایش برای سرعت‌های متفاوت ارائه شد و ثابت شد که عملگرهای پلاسما می‌تواند برای سرعت‌های متفاوت، حاشیه واماندگی را بهبود دهد.



شکل (۱): شماتیک قرارگیری عملگر پلاسما روی پوسته به منظور حذف گردابه ریزشی [۲]

ناپایداری‌های آیرودینامیکی در تشکیل واماندگی دوار و پدیده سرج<sup>۱</sup> که فاکتورهای محدودکننده در محفظه کمپرسور و گسترش توربین‌ها گازی مدرن هستند، دخالت دارند. واماندگی چرخشی یک ناپایداری به‌خوبی شناخته‌شده است و همین‌طور جریان جرمی عبوری از کمپرسور را در سرعت چرخشی ثابت، کاهش می‌دهد و باعث یک افت در نسبت فشار می‌شود. واماندگی چرخشی، اغلب یک ناپایداری شدید آیرودینامیکی را به شکل سرج ایجاد می‌کند. پدیده سرج یک جریان محوری نوسانی است که بسته به شدت آن می‌تواند باعث جریان برگشتی عبوری از موتور شود و همچنین باعث افت شدید در توان موتور و به‌علاوه خطرات مکانیکی خواهد شد. صدوقی و همکاران [۳] به‌منظور کنترل ناپایداری در یک کمپرسور گذر صوت و کنترل جریان نشتی پره از چندین عملگرهای پلاسما استفاده کردند که می‌تواند جت القایی با سرعت بالایی را در جریان ساکن، در آزمایشگاه تولید کنند که باعث حذف موفقیت‌آمیز ناحیه واماندگی، در کمپرسورهای گذر صوت می‌شود. اشرفی و همکاران [۴] به بررسی تأخیر بر روی واماندگی چرخشی در کمپرسورهای محوری و شعاعی پرداختند. نتایج استفاده از شبیه‌سازی با استفاده از عملگر پلاسما نشان داد که در هر دو کمپرسور، عملگر پلاسما سبب تأخیر در شروع واماندگی به‌وسیله القای جریان نشتی

یکی از حوزه‌های تحقیقاتی در طراحی ماشین‌های دوار، تلاش بر تأمین بهبود عملکرد آیرودینامیکی (بدون تحمیل اتلاف بیشتر و با حفظ حاشیه ناپایداری) بوده که این موضوع منجر به افزایش نسبت فشار در تعداد طبقات کمتر و با صرف توان کمتر می‌گردد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه کنترل جدایش جریان در پره‌های کمپرسور محوری صورت گرفته است که هرکدام از آن‌ها، دارای مزایا و معایبی هستند. اهمیت استفاده از روش‌های کنترل جدایش به دلیل کاهش کنترل جدایش گوشه در پره، کاهش یا حذف جریان نشتی در نوک پره به علت جلوگیری از واماندگی دورانی و بالابردن حاشیه ناپایداری در نمودار عملکردی کمپرسور به‌منظور بالابردن نسبت فشار کل می‌باشد و همچنین استفاده از آن به‌منظور کاهش افت فشار کل و بهبود افزایش ضریب فشار استاتیک در ردیف پره‌های استاتور است. یکی از راهکارهای دستیابی به این هدف، استفاده از عملگرهای پلاسما DBD بر روی کسکید کمپرسور بوده که یک روش کنترل فعال لایه‌مرزی تلقی می‌گردد. بدین منظور، انواع موقعیت‌های مختلف عملگرهای پلاسما روی پره میانی کسکید قرار داده شده است تا میزان تأثیر این عملگرها بر عملکرد آیرودینامیکی کسکید کمپرسور بررسی شود. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به‌منظور مطالعه و بررسی مشخصه‌های مختلف استفاده از عملگرهای پلاسما بر روی کسکید ماشین‌های دوار انجام شده است. سید شمس طالقانی و همکاران [۱] به مطالعه تجربی اثر به‌کارگیری عملگر پلاسما بر روی عملکرد واماندگی ایرفویل NACA-0012 پرداخته و با تأمین نیروی حجمی ناشی از تحریک الکتریکی، ضمن کنترل جدایش جریان پس از بروز واماندگی، افزایش ۱۴ درصدی ضریب نیروی برای ایرفویل متقارن را گزارش نمودند. لی گانگ و همکاران [۲] به‌منظور افزایش محدوده و گستره پایداری در کمپرسورها و انرژی‌دادن به جریان نشتی روی نوک پره، با استفاده از عملگرهای پلاسما تلاش کردند. نتایج نشان داد که استفاده از عملگر پلاسما ناپایا در پوسته حول پره کمپرسور - شکل ۱- سبب بهبود محدوده پایداری کمپرسور از ۱۵۰۰ تا ۲۴۰۰ دور در دقیقه می‌شود، همچنین جت القایی تولیدشده توسط عملگر پلاسما با اضافه کردن مومنتوم به سیال تأثیر قابل توجهی روی ناحیه نوک پره

<sup>1</sup> Surge

عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل متقارن NACA-0012 پرداخته؛ نتیجه پژوهش افزایش قابل توجه بازده آیرودینامیکی ایرفویل متقارن را در زوایای حمله بالاتر از ۸ درجه را نشان داد.

مطالعه حاضر، به بررسی تجربی و آزمایشگاهی کنترل جدایش جریان در یک کسکید خطی پره کمپرسور محوری پرداخته که طی آن تأثیر عملگر پلاسمای و مکش لایه‌مرزی بر کنترل جریان، در حضور عملگر پلاسمای و بدون آن، در موقعیت، ولتاژ، فرکانس و سرعت‌های مختلف، و همچنین تأثیر مکش لایه‌مرزی در میزان مکش‌های مختلف، به صورت جداگانه و هم زمان بر روی پارامترهای عملکردی پره بررسی شده است.

## ۲- آزمون تجربی

سکوی آزمون کسکید خطی موجود در آزمایشگاه دانا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر برای تحقیقات در مورد پره‌های توربوماشین در رژیم جریان فروصوتی طراحی شده است. این سکو، شامل یک دیفیوزر با زاویه باز، یک محفظه آرام‌کننده، یک فضای انقباض یا تراکم، یک فضای ورودی و یک فضای مربوط به تست با سیستم مکش لایه‌مرزی است. سکوی آزمون در شکل ۲ نشان داده شده است و نیز مشخصات فنی و ابعاد سکوی آزمون در جدول ۱ ارائه گردیده است.



شکل (۲). نمایی از سکوی آزمون کسکید خطی آزمایشگاه دانا به همراه سیستم مکش لایه‌مرزی

### جدول (۱). مشخصات فنی کلی تونل باد کسکید خطی

آزمایشگاه دانا

حداکثر سرعت در مقطع آزمایش	۶۰ متر بر ثانیه
نوع تونل	مدار باز دمشی
ابعاد مقطع آزمایش	۱۳ در ۷۴ سانتی‌متر
سطح مقطع آزمایش	۰/۹۶۲ مترمربع
حداکثر دبی جرم	۸ کیلوگرم بر ثانیه
تعداد پره‌های مقطع آزمایش	۷ عدد

نوک پره به مسیر جریان عبوری از روی پره خواهد شد. لو و همکاران [۵] به بررسی عددی تأثیر ایجاد حفره و موقعیت آن بر کنترل جریان بر روی یک ردیف کسکید کمپرسور محوری پرداختند. جریان به صورت تراکم‌پذیر در ماخ ۰/۷ در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از حفره در ۳۲-۱۰ درصد طول وتر، میزان افت فشار استاتیک را تا ۱۸/۸ درصد می‌تواند کاهش می‌دهد. کدیور و همکاران [۶ و ۷] به بررسی عددی تأثیر عملگر پلاسمای بر کنترل جدایش جریان بر روی ردیف کسکید کمپرسور محوری پرداختند. این مطالعه به بررسی جریان تراکم‌ناپذیر در رینولدز پایین پرداخته و با اعمال یک عملگر بر روی سطح مکش، به این نتیجه رسیدند که با افزایش ولتاژ عملگر پلاسمای، عملکرد آن به صورت توانی افزایش می‌یابد. ستوده و خوشخو [۸] طی یک مطالعه عددی دوبعدی و تراکم‌پذیر بر روی کسکید پره کمپرسور جریان محوری و اعمال عملگر پلاسمای باهدف کنترل جدایش بر روی استاتور، به این نتیجه رسیدند که در زوایای برخورد مثبت، به کارگیری عملگر پلاسمای بر ناحیه جدایش گوشه مؤثرتر بوده، نیز در زوایای برخورد منفی، به کارگیری عملگر پلاسمای بر سطح پوسته، همچنین جریان عبوری از سطح فشار به سمت سطح مکش مؤثرتر است. در صورت استفاده هم‌زمان از عملگر پلاسمای بر روی پره و پوسته در زوایای برخورد صفر و ۴- می‌تواند به ترتیب منجر به کاهش ۱۲/۵ و ۲۲ درصدی ضریب افت فشار کل گردد.

وانگ و همکاران [۹] به بررسی عددی تأثیر عملگر پلاسمای نانوئانه‌ای بر کنترل جدایش جریان بر روی کسکید کمپرسور مافوق صوت پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از عملگر پلاسمای نانوئانه‌ای بر روی کسکید یک کمپرسور مافوق صوت، علاوه بر کاهش افت فشار کل، محل ایجاد شوک را نیز می‌توان به تعویق انداخت. وانگ و همکاران در پژوهش دیگری [۱۰] به بررسی عددی تأثیر استفاده از عملگر پلاسمای نانوئانه‌ای بر کنترل جدایش جریان بر یک کمپرسور محوری با رینولدز کم پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از عملگر پلاسمای نانوئانه‌ای، علاوه بر به عقب انداختن جدایش جریان، می‌تواند بر جلوگیری از ناپایداری جریان ناشی از جدایش جریان تأثیرگذار باشد. وزیری و همکاران [۱۱] به بررسی عددی تأثیر جانمایی عملگر پلاسمای بر

**جدول (۲):** مشخصات فن مکش کسکید خطی آزمایشگاه

دانا دانشگاه صنعتی امیرکبیر و موتور آن

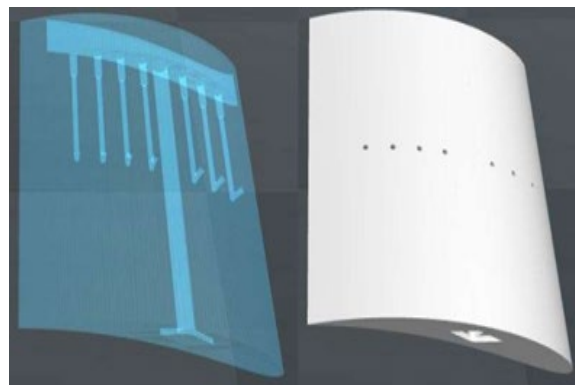
قدرت موتور فن	۱/۱ کیلووات
دبی فن در نقطه طراحی	۱۵۰۰ مترمکعب بر ساعت
نوع فن	جریان شعاعی

**شکل (۴):** سیستم مکش لایه‌مرزی در سکوی تست کسکید خطی

در مسیر جریان مکش لایه‌مرزی کسکید خطی آزمایشگاه دانا دانشگاه امیرکبیر ابتدا جریان لایه‌مرزی دیواره مکیده شده، سپس جریان بعد از عبور از توری‌ها داخل محفظه مکش می‌شوند و با عبور از ۵ عدد شیر دستی (مکش توزیع‌شده در جهت جریان) به داخل یکی از هفت سوراخ با قطر ۸ سانتی‌متر روی محفظه مکش می‌روند که با لوله‌هایی از جنس پی‌وی‌سی با قطر ده سانتی‌متر به داخل دمپره‌های دستی می‌روند. این دمپرها ۱۴ عدد بوده که هفت‌ها متعلق به یکی از دیواره‌های مکش است و هفت‌تای دیگر مربوط به مکش در راستای لبه حمله پره‌ها می‌باشند. باید اشاره شود که سوراخ‌های مکش روی محفظه مکش هستند و روبه‌رو به لبه حمله پره‌ها قرار دارند تا لایه‌مرزی بهتر مکیده شود، چرا که لایه‌مرزی به علت وجود فشار سکون در مقابل لبه حمله پره‌ها در آن ناحیه ذکر شده ضخامت بیشتری دارد. در ادامه هر دو دمپر دستی مربوط به سوراخ‌های مکش دو دیواره‌های کناری روبه‌روی هم داخل یک دوراهی شده و این دو جریان با هم ترکیب می‌شوند. سپس این هفت عدد دوراهی به یک محفظه همگرایی جریان متصل شده و همه جریان‌ها پس از عبور از محفظه همگرا به یک لوله اصلی وارد می‌شوند. این لوله به طول ۱/۵ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است تا جریان

در مقطع آزمون، ۷ عدد پره بین دو صفحه نصب شده و کل مجموعه جهت تنظیم زاویه حمله و تناسب با شرایط طراحی یا عدم طراحی قابل چرخش است. این چرخش از صفر تا ۵۲ درجه در دو جهت مثبت و منفی می‌تواند متغیر باشد. دو دیواره موسوم به دیواره‌های انتهایی در بالا و پایین برای مکش لایه‌مرزی و دو دیواره موسوم به دیواره‌های کناری که قسمت تست را تشکیل می‌دهند و پره‌ها روی آن‌ها نصب می‌شوند.

پره مورد استفاده پره دو بعدی ایرفویل NACA-9512 می‌باشد. در شکل ۳ نمای سه بعدی از پره مورد استفاده قابل مشاهده است. پره مورد بررسی با استفاده از پرینتر سه بعدی با دقت ۱۰۰ میکرون ساخته شده و مجراهای اندازه‌گیری فشار با استفاده از لوله مسی آب‌بندی شده و به بیرون منتقل شده است. سوراخ‌های اندازه‌گیری فشار در فواصل ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ از نوک پره و در وسط پهنای پره قرار گرفته‌اند.

**شکل (۳):** نمای سه بعدی از ایرفویل مورد آزمایش ناکا ۹۵۱۲

سیستم مکش لایه‌مرزی سکو شامل یک سیستم از نوع مکش توزیع‌شده در دو جهت است. این سیستم مکش شامل یک فن با قدرت ۱/۱ کیلووات و کانال‌ها و ۱۴ دمپر دستی است که به محفظه مکش متصل هستند. دمپره‌های دستی برای مکش توزیع شده در راستای لبه حمله پره‌ها در نظر گرفته شده‌اند. محفظه مکش به‌عنوان عضو دیگری از سیستم مکش از جنس همان دیواره‌های کناری یعنی پلکسی گلس طراحی شده و به آن‌ها پیچ شده است. داخل محفظه مکش پنج شیر است که با طراحی خاصی قرار گرفته است. این شیرها برای کنترل مکش در جهت جریان در نظر گرفته شده است. در جدول ۲، مشخصات فن مکش و موتور آن و همچنین در شکل ۴ نمایی از این فن مشاهده می‌شود.

**جدول (۳):** تنظیمات سیستم کنترل مکش در جهت پره‌ها با همان دمپره‌های دستی [۱۲]

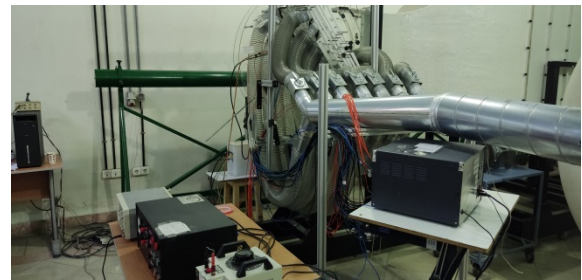
شماره دمپره‌های دیواره کناری سمت راست	درصد باز بودن	شماره دمپره‌های دیواره کناری سمت چپ	درصد باز بودن
R1	۸۷/۵	L1	۱۲/۵
R2	۰	L2	۱۲/۵
R3	۳۷/۵	L3	۵۰
R4	۳۷/۵	L4	۵۰
R5	۳۷/۵	L5	۵۰
R6	۰	L6	۱۲/۵
R7	۰	L7	۱۲/۵

در این سکوی آزمون، وسایل اندازه‌گیری مختلفی استفاده شده است که به شرح ذیل می‌باشند. این سیستم‌ها شامل لوله پیتوت و سرعت‌سنج KIMO 120 MP، سنسورهای فشار ۱۲/۵ و ۲۵ میلی بار و نیز ریک فشاری می‌باشد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خروجی جریان در کسکید از ریک فشاری با ۳۱ مجرای اندازه‌گیری فشار به طول ۱۶ سانتی‌متر استفاده شده است که ۲۷ کانال از ۳۱ کانال به منظور اندازه‌گیری فشار کل و ۴ کانال دیگر مربوط به اندازه‌گیری فشار استاتیک است. ریک فشاری دقیقاً به اندازه ۲ وتر پره و در پشت پره میانی کسکید که اندازه‌گیری‌ها روی آن انجام می‌گیرد نصب شده است که تصویر آن در شکل ۸ قابل مشاهده است.



**شکل (۸):** نمایی از ریک فشاری در حالت نصب روی سکوی کسکید آزمایشگاه دانا دانشگاه صنعتی امیرکبیر

خالی از گردابه و توسعه‌یافته گردد و سپس بتوان در میانه آن فشار یا سرعت را اندازه گرفت. در انتهای مسیر یک دمپیر برای کنترل جریان اصلی فن موجود است و با به‌کارگیری آن می‌توان جریان جرمی را تغییر داد. این جریان به یک دوراهی متصل می‌شود و دوراهی به ورودی اصلی فن مکش اتصال دارد و در سر دیگر دوراهی یک دمپیر دیگر برای کنترل میزان کنارگذر وجود دارد. چون کنترل دبی فن با دمپیر صورت می‌گیرد، کنترل جریان روی منحنی عملکرد فن صورت می‌پذیرد؛ لذا با کنترل جریان کنارگذر، به نقاط موردنظر دسترسی پیدا می‌شود. دوراهی و این دو دمپیر دستی قطر بیست سانتی‌متری دارند. در شکل‌های ۵ تا ۷، نمای کلی از سیستم مکش و شیرهای کنترل جریان و همچنین تنظیمات دمپره‌های دستی در هر دو جهت مشاهده می‌شود. تنظیمات سیستم کنترل مکش در جهت لبه حمله در جدول ۳ ارائه شده است.



**شکل (۵):** نمای کلی از سیستم مکش

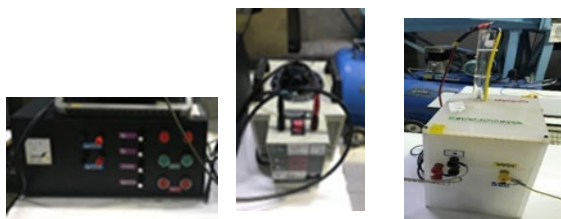


**شکل (۶):** شیرهای کنترل جریان



**شکل (۷):** دمپره‌های دستی در زوایای مختلف

تعبیه شده است، متصل می‌گردد. برای به دست آوردن ولتاژ بالا باید ولتاژ خوانده شده از خروجی اسیلوسکوپ را در ۳۰۰۰ ضرب کرد. مقدار ولتاژ مورد نظر به وسیله دستگاه تبدیل و تنظیم ولتاژ قابل تغییر می‌باشد. این ولتاژ با توجه به توانایی عملگر تا مقدار ۷۰ کیلوولت قابل تغییر می‌باشد. جعبه کنترل منبع تغذیه دارای ابزار کنترلی جهت تنظیم فرکانس اعمالی، فرکانس تحریک، و همچنین سیکل وظیفه می‌باشد. به علاوه، دارای خروجی اسیلوسکوپ یا مولتی متر برای اندازه گیری فرکانس اعمالی نیز می‌باشد. بازه تغییر فرکانس از ۵ کیلوهرتز تا ۳۰ کیلوهرتز می‌باشد. در این آزمایش فرکانس تحریک و سیکل وظیفه در حالت حداکثری خود تنظیم شده‌اند. برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیس و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیس ناشی از عملکرد منبع تغذیه ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً تجهیزات اندازه گیری و داده برداری، از کابل های دارای پوشش محافظ الکتریکی و همچنین ملاحظات تطبیق امپدانسی در طراحی منبع تغذیه استفاده شده است. همچنین حداکثر فاصله بین منبع تغذیه و ابزارهای اندازه گیری تست مدنظر قرار گرفته است.



(الف) (ب) (ج)

**شکل (۹):** مجموعه منبع تغذیه ولتاژ بالا: الف) جعبه تولیدکننده ولتاژ بالا، ب) جعبه تنظیم و تبدیل ولتاژ اعمالی، ج) جعبه کنترل منبع تغذیه

#### ۴- بررسی تکرارپذیری و عدم قطعیت

در این بخش، به بررسی عدم قطعیت تجهیزات اندازه گیری پرداخته شده است که در جدول ۵ محدوده عدم قطعیت دستگاه های سرعت سنج و سنسورهای فشار بیان شده است. تکرارپذیری در آزمایش های فشاری به طور مکرر انجام شد و نتایج آزمایش های تکراری به طور تقریباً دقیق باهم برابر شدند که می تواند به دلیل دقت بسیار بالای سنسورهای فشار و عدم ایجاد نویز به وسیله منبع تغذیه پلاسما باشد. در شکل ۱۰، نمونه ای از تکرار نتایج آزمایشگاهی ارائه شده

جعبه سنسور فشار ۸۰ کاناله استفاده شده در پژوهش جاری، شامل دو بخش ابزار دقیق و سیستم داده برداری است که به صورت مجتمع درون یک بسته طراحی و جانمایی شده است. مشخصات کلی سنسورهای به کاررفته در بسته در جدول ۴ ارائه شده است.

**جدول (۴):** مشخصات سنسورهای فشار

تعداد سنسور	۸۰ عدد
بازه عملکرد	۵ to +5 bar -5 to ۱۰ عدد ۱۰-12.5 to +12.5 mbar عدد ۲۵ to +25 bar -2۸ عدد ۳۰-69 to +69 mbar عدد
دمای کاری	۲۰- تا ۸۵ درجه سانتی گراد
ولتاژ تغذیه	5 Vdc
اضافه فشار	850 mbar تا 675 Mbar
فشار ترکیدگی	1350 mbar تا 1000 Mbar
برند	Honeywell
دمای کاری سنسور	۰ تا ۴۵ درجه سانتی گراد
تحت لیسانس	National Instrument (NI)

#### ۳- تجهیزات تولید و نظارت پلاسما

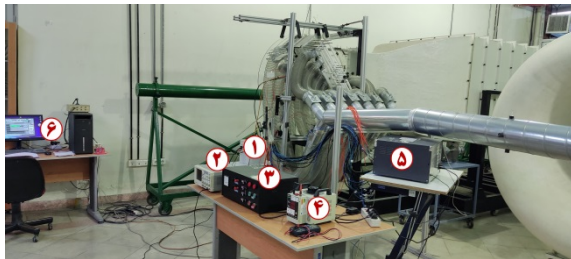
شکل ۹، نمایی از قسمت های مختلف منبع تغذیه پلاسمای مورد استفاده نشان داده شده است. مشخصات اسمی منبع تغذیه پلاسمای استفاده شده در این پروژه، به شرح زیر است:

- منبع تغذیه جریان متناوب HVAC (ماکزیمم ولتاژ اعمالی تا 30 kV پیک تا پیک)
- شکل موج سیگنال حامل از نوع موج سینوسی (ماکزیمم فرکانس حامل تا 30 kHz)
- ماکزیمم فرکانس تحریک تا 1000 Hz (با توانایی تنظیم سیکل وظیفه)
- ماکزیمم توان الکتریکی خروجی تا 1000 w.

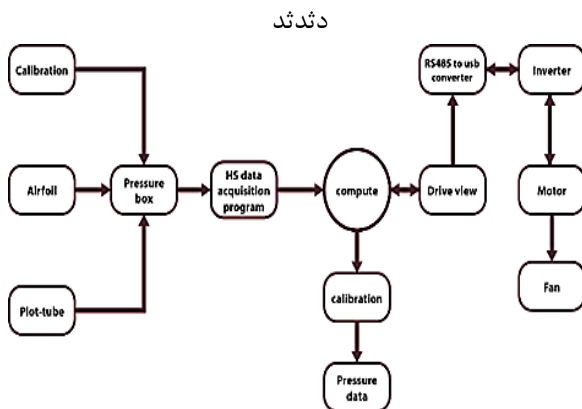
این دستگاه شامل سه قسمت تنظیمات فرکانس و سیکل وظیفه، تنظیم و تبدیل ولتاژ، و تولیدکننده ولتاژ بالا می‌باشد. هر سه قسمت از طریق کابل های مخصوص و ولتاژ بالا به یکدیگر متصل شده‌اند.

قسمت تولیدکننده ولتاژ بالا از طریق کابل ولتاژ بالا و کابل زمین به ترتیب به دو سر الکترودهای آشکار و نهان عملگر پلاسما متصل می‌شود. سر دیگر این کابل ها به دستگاه تولیدکننده ولتاژ متصل می‌شود. به منظور افزایش ایمنی، کابل تخلیه بار الکتریکی را به اتصال زمین متصل شده است. برای اندازه گیری ولتاژ پیک - پیک خروجی اسیلوسکوپ به خروجی که بر روی تولیدکننده ولتاژ بالا

روی مقطع آزمایش انجام می‌شود و برای تنظیم زاویه قرارگیری مقطع در جریان از تراز بادقت ۰/۱ درجه استفاده شده است. شکل ۱۱ نمایی از سکوی آزمون به همراه منبع تغذیه تولید پلاسما و شکل ۱۲ دیگرام چیدمان آزمایش را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۱): نمایی از سکوی آزمون به همراه منبع تغذیه تولید پلاسما



شکل (۱۲): دیگرام چیدمان آزمایش

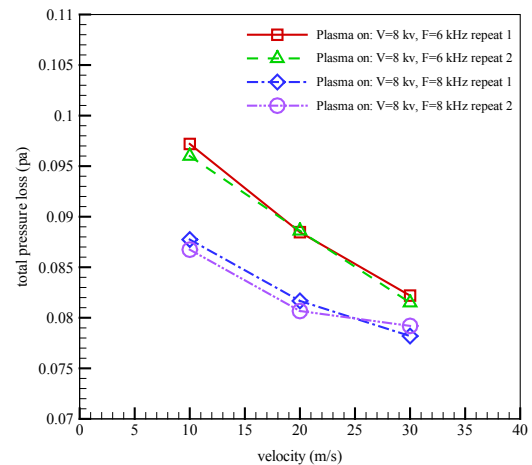
پس از روشن شدن فن و رسیدن به سرعت‌های موردنظر و تأمل برای پایدار شدن جریان که در این مطالعه به ترتیب سرعت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ متر بر ثانیه، با استفاده از نرم‌افزار داده برداری پرسرعت و با تنظیم فرکانس داده برداری و زمان آن به ذخیره‌سازی داده‌های خروجی سنسورهای فشار پرداخته شده است. لازم به ذکر است که داده برداری با فرکانس ۱ کیلوهرتز و در بازه زمانی ۱۰ ثانیه صورت گرفته است. تمام آزمون‌ها با حضور عملگر پلاسما در فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز و در دو ولتاژ ۸ کیلوولت و ۱۲ کیلوولت انجام گرفته است.

هندسه مورد استفاده به همراه ابعادگذاری در شکل ۱۳ (به صورت شماتیک) و در شکل ۱۴ نمای واقعی عملگر پلاسما DBD نشان داده شده است. الکترودها از جنس مس و

است. همان گونه که مشاهده می‌شود، میزان دقت نتایج تجربی در حد قابل قبولی می‌باشد.

جدول (۵): محدوده عدم قطعیت مطلق و نسبی تجهیزات

پارامترها	عدم قطعیت مطلق	عدم قطعیت نسبی
سرعت سنج KIMO 120Mp	2 to 5 ( $\frac{m}{s}$ ): $\pm 0.7 (\frac{m}{s})$ 5 to 40 ( $\frac{m}{s}$ ): $\pm 0.5 \% \text{ of reading}$ $\pm 0.3 (\frac{m}{s})$	$\pm 4.3\%$
سنسورهای فشار ۱۲/۵ و ۲۵ میلی بار	$\pm 12.5 \text{ (Pa)}$	$\pm 0.014\%$



شکل (۱۰): نمونه‌ای از آزمایش تکرار شده

## ۵- فرآیند آزمون

اندازه‌گیری فشار و سرعت در ورود با نصب لوله پیتوت در مرکز مقطع ورودی سکوی کسکید صورت رفته است. نصب لوله پیتوت در این محل کمترین اثر بر روی جریان عبوری از روی ایرفویل مورد بررسی را خواهد داشت و برای اندازه‌گیری فشار پایین‌دست ردیف پره از ریک فشار که در فاصله دو وتر از انتهای پره نصب می‌شود، استفاده شده است. ریک فشار به طور قائم در وسط گذرگاه مقطع آزمایش قرار گرفته و جهت قرارگیری لوله‌های اندازه‌گیری همواره در موازات لبه انتهایی ایرفویل است. خروجی این ابزارها با استفاده از شلنگ‌هایی به قطر ۴ میلی‌متر به سنسورهای فشار وصل شده و داده‌های خروجی از جعبه سنسور از طریق کابل USB به رایانه منتقل می‌شوند. علاوه بر این، پارامترهای کنترلی فن تونل باد از طریق مبدل rs485-usb به رایانه منتقل شده و قابل تنظیم هستند. تنظیم زاویه نصب پره‌ها با استفاده از نوار مدرج نصب شده



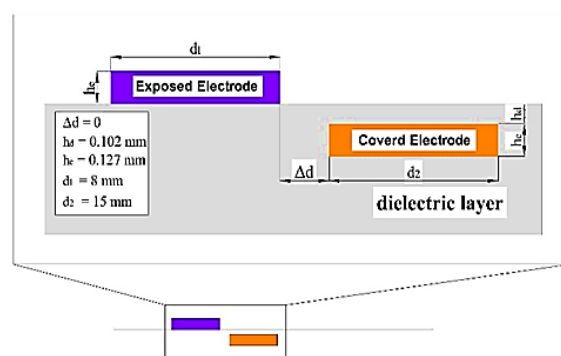
شکل (۱۵): نمایی از نحوه قرارگیری عملگر پلاسما بر روی پره

## ۶- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش، به بررسی تأثیر افت فشار کل بر حسب تغییرات سرعت در دو حالت با و بدون عملگر پلاسما با درصد مکش‌های مختلف مکش لایه مرزی پرداخته شده است. در شکل ۱۶، به مقایسه تغییرات افت فشار کل در دو حالت بدون عملگر پلاسما و بدون مکش جریان و با عملگر پلاسما در دو فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز و ولتاژهای ۸ و ۱۲ کیلوولت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سرعت‌های پایین (کمتر از ۲۰ متر بر ثانیه)، افت فشار کل در حالت با عملگر پلاسما کمتر از حالت بدون عملگر پلاسما است. مثلاً در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، افت فشار کل در حالت با عملگر پلاسما با ولتاژ ۱۲ کیلوولت و فرکانس ۸ کیلوهرتز، ۱۹/۱ درصد کمتر از حالت بدون عملگر پلاسما است و این بدان معناست که میزان افت فشار کل در حالت با عملگر پلاسما به دلیل نیروی پلاسما که منجر به تولید جت جریان (باد یونی) در راستای سطح می‌شود، کمتر شده است.

در شکل ۱۷، به بررسی میزان افت فشار کل بر حسب سرعت جریان سیال با درصد مکش‌های مختلف پرداخته شده است. لازم بذکر است که استفاده از روش مکش نیز منجر به بهبود عملکرد کسکید می‌شود. همچنین، محل مکش در جلوی پره میانی کسکید و در هر دو طرف لبه‌های دیواره پره میانی صورت گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشخص است، با افزایش سرعت جریان، میزان تأثیر روش مکش بر میزان افت فشار کل کاهش یافته است. مکش لایه مرزی نیز در سرعت‌های پایین باعث کاهش میزان افت فشار کل شده است. مثلاً در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه افت فشار کل در حالت با مکش ۱۰۰ درصد لایه مرزی نسبت به حالت بدون مکش لایه مرزی، ۱۴ درصد کمتر شده است. این موضوع را شاید بتوان به ضخیم‌تر بودن لایه مرزی در سرعت پایین‌تر مربوط دانست. در واقع با مکش لایه مرزی که یک لایه کم‌انرژی با افت‌های زیاد در جریان است، جریان پر انرژی‌تر می‌شود و میزان افت فشار کل کم یا راندمان کل

عایق از جنس کیتون می‌باشد. لازم بذکر است، هندسه موردنظر از مطالعات تجربی دیپاسی و همکاران [۱۳] انتخاب شده است که نسبت به سایر تحقیقات عملگر پلاسما، در گستره مناسبی از ولتاژ، عملگر پلاسما را مورد بررسی قرار داده‌اند.



شکل (۱۳): شماتیک هندسه DBD به همراه ابعاد گذاری



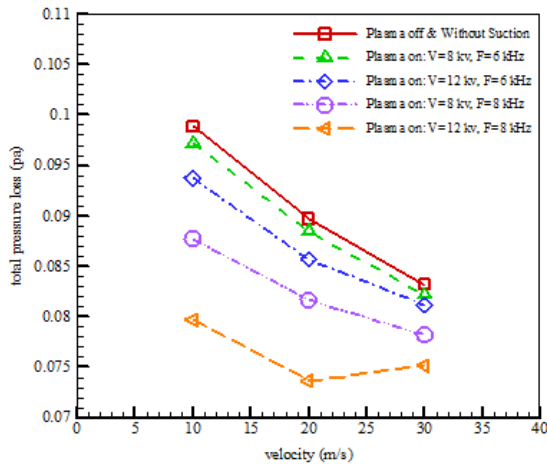
شکل (۱۴): نمای واقعی عملگر DBD مورد استفاده

موقعیت مکانی نصب عملگرهای پلاسما، نقش به‌سزایی در میزان کنترل جریان خواهد داشت؛ به همین منظور، موقعیت‌های مختلف قرارگیری عملگر پلاسما بر روی کسکید کمپرسور مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول ۶ این موقعیت‌ها همراه با محل قرارگیری مشخص شده است. موقعیت‌های معرفی شده در این جدول، محل بیشترین نیروی القایی ناشی از عملگرهای پلاسما، یعنی انتهای الکتروود در معرض قرار گرفته را نشان می‌دهد که در شکل ۱۵، نمایی از نحوه قرارگیری عملگر پلاسما بر روی سطح مکش پره نمایش داده شده است.

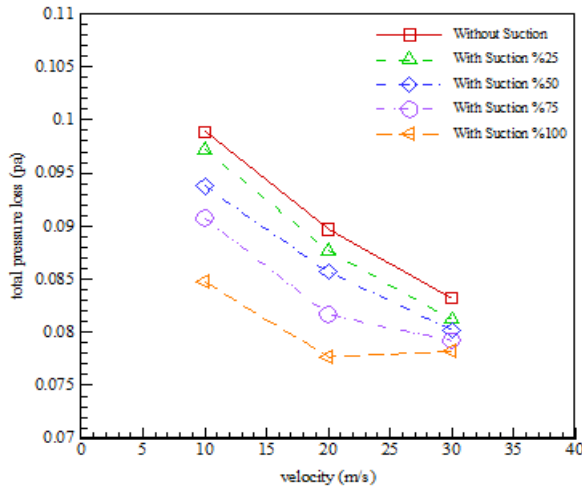
جدول (۶): موقعیت نصب الکتروودهای عملگر پلاسما

شماره	موقعیت قرارگیری (درصد طول وتر)
۱	۳۰
۲	۵۰
۳	۱۰۰

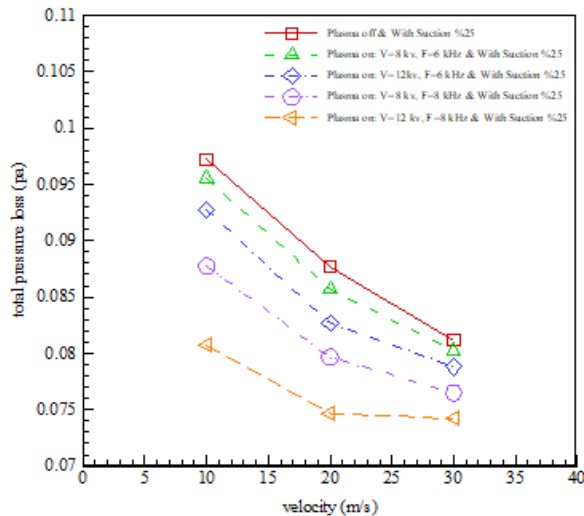




شکل (۱۶): مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و بدون مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف



شکل (۱۷): مقایسه افت فشار کل در حالت بدون مکش لایه مرزی و با مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف



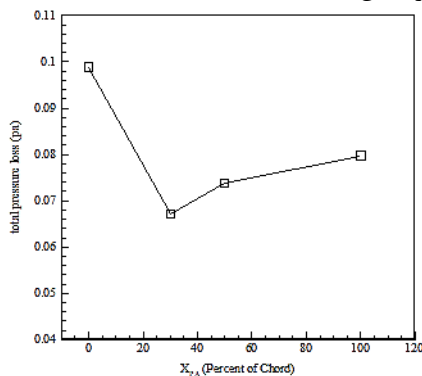
شکل (۱۸): مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با پلاسما و ۲۵٪ مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف

زیاد می‌شود. اما در حالت بدون مکش، میزان افت مخصوصاً در سرعت‌های پایین، بیشتر است.

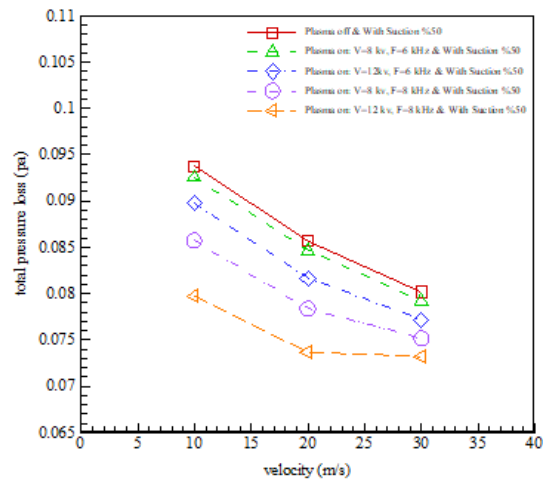
از مقایسه دو شکل ۱۶ و ۱۷، نکته بسیار مهم به کارایی عملگر پلاسما در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه نسبت به مکش لایه مرزی در این سرعت مربوط می‌شود. مکش لایه مرزی در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه ۵ درصد منجر به کاهش افت فشار کل می‌شود و در مقابل، عملگر پلاسما در همین سرعت، ۸ درصد باعث کاهش افت فشار کل می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت در صورت استفاده ترکیبی از مکش و عملگر پلاسما، در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه، میزان کاهش افت فشار کل در حدود ۷ درصد می‌باشد. زیرا علی‌رغم برهم‌نهی میزان مومنتم انتقالی ناشی از پلاسما، بخشی از اثرات مکش لایه مرزی را از بین برده و می‌تواند نتیجه منفی داشته باشد. در واقع، مکش یا حذف لایه مرزی و همچنین صرف مکش به جریان شتاب می‌دهد و سرعت آن را بالاتر می‌برد. این موضوع به وضوح در هنگام روشن کردن فن مکش بر روی دستگاه سرعت‌سنج KIMO 120 MP که به لوله پیتوت قرار گرفته در قسمت ورودی مقطع تست وصل شده بود، منعکس می‌شد.

در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ به بررسی و مقایسه میزان افت فشار کل بر حسب سرعت جریان سیال در دو حالت با و بدون عملگر پلاسما با میزان مکش ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پرداخته شده است، که برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه کاهش افت فشار کل به ترتیب، ۱۳/۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۷ است. این تاثیرات بدین گونه تحلیل می‌شود که در صورت استفاده از عملگر پلاسما، میزان ولتاژ ۸ و ۱۲ کیلوولت و میزان فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. همان گونه که در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ ملاحظه می‌شود، عملکرد زنجیره کمپرسور در استفاده عملگر پلاسما و مکش لایه مرزی به صورت هم‌زمان نسبت به مکش لایه مرزی به صورت تنها بهتر می‌شود، اما نسبت به عملگر پلاسما به صورت تنها، تأثیر کمتری در عملکرد خواهد داشت. این موضوع به این علت است که اثرات تزریق مومنتوم به لایه مرزی توسط مکش لایه مرزی در تمامی طول پره خواهد بود، اما عملگر پلاسما در لبه انتهایی پره مورد استفاده قرار گرفته و در به‌کارگیری هم‌زمان مکش لایه مرزی و عملگر پلاسما ممکن است علی‌رغم برهم‌نهی میزان مومنتم انتقالی بخشی از اثرات مکش لایه مرزی را از بین برده و نتیجه منفی داشته باشد. در همه موارد، با افزایش سرعت جریان سیال، میزان تاثیرگذاری عملگر پلاسما کاهش می‌یابد.

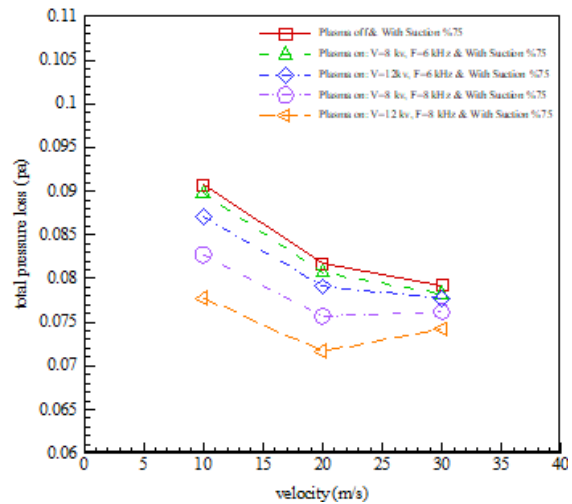
نیروی القایی تولیدی به وسیله عملگر پلاسما در راستای سطح بوده و به راحتی می‌توان این ابزار را حتی در هندسه‌های با انحنا بالا به کار گرفت. شکل ۲۲، نمودار افت فشار کل برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری عملگر پلاسما بر روی پره را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، استفاده از عملگر پلاسما در تمامی موقعیت‌های تعریف شده، باعث کاهش افت فشار کل و به عبارتی تعویق جدایش جریان خواهد شد. در این نمودار  $x_{pA}=0$  معرف شرایط بدون استفاده از عملگر پلاسماست. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، به کارگیری عملگر پلاسما در ابتدای پره ( $x_{pA}=30$ )، میزان افت کمتری را به همراه دارد. به طوری که  $31/65$  درصد کاهش افت فشار کل را به دنبال داشته است. این در حالی است که استفاده از عملگر پلاسما در انتهای پره، تعویق هرچه بیشتر جدایش جریان را موجب می‌شود. این نتیجه از دو منظر قابل بررسی است؛ در نگاه اول، میزان انتقال انرژی عملگر پلاسما به سیال در موقعیت‌های مختلف قرارگیری عملگر پلاسما با یکدیگر متفاوت بوده و تفکیک این مقدار انرژی در حالت‌های مختلف غیرممکن است. در نگاه دوم، به کارگیری عملگر پلاسما در ( $x_{pA}=30$ ) کمترین میزان انحراف جریان را موجب می‌شود و با نزدیک‌تر شدن قرارگیری عملگر پلاسما به انتهای پره، انحراف جریان به بیشینه مقدار خود می‌رسد. این انحراف می‌تواند تلفاتی را با خود همراه داشته باشد که در مقایسه با مقدار مؤنتم القایی به سیال توسط عملگر پلاسما، قابل ملاحظه باشد. در مجموع نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسما در تمامی موقعیت‌ها، باعث بهبود عملکرد کسکید کمپرسور خواهد شد. در شکل ۲۳، نمای واقعی تشکیل نیروی القایی عملگر پلاسما در موقعیت‌های مختلف قرارگیری بر روی ردیف پره کمپرسور نشان داده شده است.



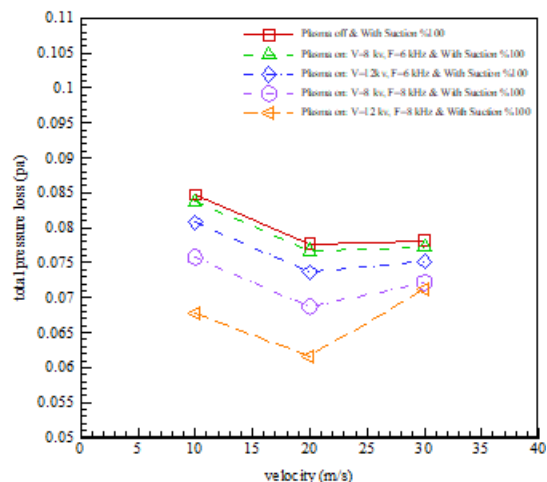
شکل (۲۲): افت فشار کل برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری عملگر پلاسما بر روی پره



شکل (۱۹): مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با پلاسما و ۵۰٪ مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف



شکل (۲۰): مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با پلاسما و ۷۵٪ مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف



شکل (۲۱): مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۱۰۰٪ مکش لایه مرزی

مختلف در مورد کمپرسور و سکوی آزمون کسکید خطی، دیدگاه جدیدی جهت استفاده از عملگر پلازما جهت کنترل جریان کسکید کمپرسور در سرعت‌های مادون صوت تبیین شد و تأثیر استفاده از عملگر پلازما و آزمون مکش لایه‌مرزی جهت کاهش افت فشار کل کسکید مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت و تأثیر هر دو روش به طور جداگانه و با یکدیگر مقایسه شد. همچنین، تأثیر عملگر پلازما در موقعیت، ولتاژ، فرکانس و سرعت‌های مختلف، و همچنین تأثیر مکش لایه‌مرزی در میزان مکش‌های مختلف، به صورت جداگانه و هم‌زمان بر روی پارامتر افت فشار کل پره بررسی و نتایج حاصل از آن، مورد تحلیل قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل می‌باشد.

- کارایی عملگر پلازما در کنترل جریان، در سرعت پایین، بیشتر است؛ به طوری که در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با ولتاژ ۱۰ کیلوولت و فرکانس ۸ کیلوهرتز، ۱۹/۱ درصد منجر به کاهش افت فشار کل شده است، در حالی با همین میزان ولتاژ و فرکانس، میزان کاهش افت فشار در سرعت‌های بالاتر کاهش می‌یابد.
- این ارزیابی تجربی نشان می‌دهد که سیستم مکش لایه‌مرزی می‌تواند افت فشار کل را تغییر دهد. در واقع با حذف جریان کم‌انرژی از سیستم می‌تواند افت‌های کسکید را مخصوصاً در سرعت‌های پایین کاهش دهد، به طوری که در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه تا ۱۴ درصد می‌تواند افت فشار کل را کاهش دهد.
- افزایش توان عملکرد عملگر پلازما در استفاده از آن به‌منظور بهبود کارایی ردیف پره کمپرسور، با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد.
- استفاده از عملگر پلازما در موقعیت ۳۰ درصد طول وتر، بهترین عملکرد را نسبت به سایر موقعیت‌ها در بهبود کارایی کسکید کمپرسور دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قرارگیری عملگر در لبه حمله و قبل از محل جدایش می‌تواند میزان عملکرد آن را بهبود بخشد.

#### ۸- فهرست علائم و اختصارات

x\_pA درصد از طول وتر پره



شکل (۲۳): نمای واقعی تشکیل نیروی القایی عملگر پلازما در موقعیت‌های مختلف قرارگیری بر روی پره

حفظ حجم بالایی از تخلیه الکتریکی بدون ایجاد پدیده قوس الکتریکی، یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های استفاده از عملگر پلازما به‌عنوان ابزاری برای کنترل جریان است. تخلیه الکتریکی پس از اعمال ولتاژ به دو سر الکترودهای عملگر پلازما آغاز شده و با یونیزه نمودن و سپس برخورد ذرات باردار با هوا، موجب انتقال مؤمنتم می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش ولتاژ اعمالی به دو سر الکترودها، افزایش نیروی القایی را به همراه خواهد داشت. به‌منظور بررسی این شرایط بر عملکرد کسکید کمپرسور، ضریب افت فشار کل در ولتاژهای مختلف در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در ولتاژهای پایین، به علت کاهش نیروی القایی، مؤمنتم سیال در مقایسه با مؤمنتم انتقالی بسیار بالا بوده و تغییرات چندان قابل ملاحظه نمی‌باشند. به تدریج، با افزایش ولتاژ و افزایش توانی نیروی القایی، بهبود عملکرد کسکید کمپرسور با سرعت بالاتری صورت می‌گیرد. مثلاً در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، ولتاژ ۸ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز حدوداً ۱/۶ درصد باعث کاهش افت فشار کل می‌شود و با افزایش ولتاژ به ۱۲ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز حدوداً ۵ درصد باعث کاهش میزان افت فشار کل می‌شود.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، ابتدا با بررسی تحقیقات انجام‌شده در مورد آزمون مکش لایه‌مرزی، عملگر پلازما و مفاهیم

- compressor cascade using various arrangement of plasma actuator. *Journal of Electrostatics*. 2021; 112:103580.  
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103580>
8. Setoudeh M, Khoshkhou R. Investigation of the Effect of DBD Plasma Actuator Location on Flow Control on Cascade of Axial Compressor. *Journal of Aeronautical Engineering*. 2022; 24(1):57-69.  
<https://doi.org/10.22034/joae.2022.316310.1073>
9. Wang Y, Zhang H, Wu Y, Li Y, Zhu Y. Supersonic compressor cascade flow control using plasma actuation at low Reynolds number. *Journal of Physics of Fluids*, 2022; 34:027105.  
<https://doi.org/10.1063/5.0081685>
10. Wang Y, Zhang H, Wu Y, Li Y, Zhu Y. Compressor Airfoil separation control using nanosecond plasma actuation at low Reynolds number. *AIAA Journal*, 2022; 60(2):1171-1185.  
<https://doi.org/10.2514/1.J060666>
11. Vaziri, M. A. Fahimi, N. Masoudi-Rad, H., Ghadak, M. Numerical Investigation of Effects of Plasma Actuator Placement on Aerodynamic Parameters of NACA 0012 Airfoil. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, 2023; 12(1):69-78 (In Persian).  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1402.12.1.6.5>
12. Ameri, E. Design and construction of a system to prevent boundary layer growth in a linear chain test platform. Master's thesis, Advisor: Broumand, Amirkabir University of Technology Department of Aerospace Engineering, 2017 (In Persian).
13. Dediasi M. Jiun-Ming L. Experimental study of a DBD plasma driven channel flow. 49th AIAA Aerospace Science Meeting including the new horizons forum and Aerospace Exposition, 2011, Florid.  
<https://doi.org/10.2514/6.2011-9>
- ۹-مراجع**
1. Seyed Shams Taleghani A, Shadaram A, Mirzaei M. Experimental study of active flow control by plasma actuator to placement of the stall angle of a NACA0012 airfoil. *Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2012; 1:1. (In Persian).  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1402.12.1.6.5>
  2. Li G, Xu Y, Yang L, Du W, Zhu J, Nie C. Low speed axial compressor stall margin improvement by unsteady plasma actuation. *Journal of Thermal Science*. 2014; 23:114-9.  
<https://doi.org/10.1007/s11630-014-0684-8>
  3. Saddoughi S, Bennett G, Boespflug M, Puterbaugh SL, Wadia AR. Experimental investigation of tip clearance flow in a transonic compressor with and without plasma actuators. *Journal of Turbomachinery*. 2015; 137(4):041008.  
<https://doi.org/10.1115/1.4028444>
  4. Ashrafi F, Michaud M, Duc Vo H. Delay of rotating stall in compressors using plasma actuators. *Journal of Turbomachinery*. 2016; 138(9):091009.  
<https://doi.org/10.1115/1.4032840>
  5. Lu H. W, Guo S, Huang Y, Wang H, Zhong J. Flow control in linear compressor cascade by inclusion of suction side dimples at varying locations. *SAGE, Journal of Power and Energy*, 2017; 232(6):706-721.  
<https://doi.org/10.1177/0957650917752276>
  6. Kadivar A, Amanifard N, Mohaddes Deylami H. Numerical investigation of flow separation control in an axial compressor cascade by plasma actuation. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of ISME*. 2019; 20(4):182-209.  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.25384775.1397.20.4.9.3>
  7. Kadivar A, Amanifard N, Deylami HM, Dolati F. Flow separation control in an axial

