

مطالعه تجربی تأثیر عملگر پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک بر جدایش جریان زنجیره خطی پره کمپرسور

سجاد محمدی صاحب دیوان^۱، روح اله خوشخو^۲، محمود مانی^۳، حمزه اشراقی^{۴*}

۱- مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳)

چکیده

توجه به عملگر پلاسما به عنوان ابزاری در کنترل فعال جریان در سال‌های اخیر به سرعت در حال رشد بوده است. این ابزار با تزریق مومنتوم، منجر به شتاب بخشیدن به سیال در راستای سطح شده که می‌توان از آن برای کنترل جدایش جریان استفاده نمود. در تحقیق حاضر، کنترل جدایش جریان در یک زنجیره کمپرسور محوری به وسیله عملگر پلاسما و مکش لایه مرزی، به صورت جداگانه و هم‌زمان بررسی شده است. به منظور مطالعه تأثیر عملگر پلاسما و مکش لایه مرزی بر کنترل جریان، مشخصه‌های جریان سیال، از قبیل نسبت فشار استاتیک و ضریب اتلاف فشار کل، در حضور عملگر پلاسما و بدون آن و همچنین تأثیر مکش لایه مرزی در میزان مکش‌های مختلف، به صورت تجربی ارزیابی شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسما در سرعت‌های کم باعث کاهش افت فشار کل و در نتیجه بهبود عملکرد خواهد شد. علاوه بر این، این بررسی تجربی نشان می‌دهد که عملکرد زنجیره کمپرسور با عملگر پلاسما و مکش لایه مرزی به صورت هم‌زمان و با میزان مکش به ترتیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۱۳/۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۷ درصد باعث کاهش افت فشار کل و در نتیجه نسبت به مکش لایه مرزی به صورت تنها بهتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زنجیره کمپرسور محوری، عملگر پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک، مکش لایه مرزی، کنترل جدایش جریان

Experimental Study of the Effect of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on the Flow Separation of Linear Cascade Compressor Blades

Sajjad. mohammadi sahebdivan, roohollah. Khoshkhoo, Mahmoud. Mani, Hamzeh. Eshraghi*

Abstract

Attention to plasma actuators as a tool for active flow control has been rapidly growing in recent years. This device, by injecting momentum, accelerates the fluid on the surface, which can be used to control flow separation. In the current study, the control of flow separation in an axial compressor cascade by plasma actuator and boundary layer suction, both separately and simultaneously, has been investigated. To study the effects of the plasma actuator and boundary layer suction on flow control, the flow characteristics, such as the static pressure ratio and the total pressure loss coefficient, have been experimentally evaluated with and without the plasma actuator, as well as the effect of boundary layer suction at different suction rates. Experimental results show that the use of plasma actuator at low speeds reduces total pressure loss and hence improves performance. Moreover, this experimental study indicates that the performance of the compressor cascade with the plasma actuator and boundary layer suction simultaneously, at suction rates of 25, 50, 75, and 100 percent at a speed of 10 meters per second, respectively improves by 13.3, 14, 15, and 17 percent, showing better results compared to using only boundary layer suction.

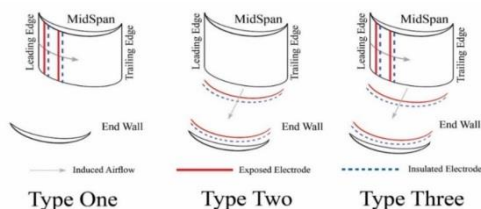
Key words: Linear Cascade, Axial Compressor Blades, Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, Boundary Layer Suction, Flow Separation Control

مقدمه

یکی از حوزه‌های تحقیقاتی در طراحی ماشین‌های دوار، تلاش بر تأمین بارگذاری 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 زمینه‌ی کنترل جدایش جریان در پره‌های کمپرسور محوری صورت گرفته است که هر کدام، دارای مزایا و معایبی هستند. اهمیت استفاده از روش‌های کنترل جدایش به دلیل کاهش کنترل جدایش گوشه در پره، کاهش یا حذف جریان نشستی در نوک پره به علت جلوگیری از واماندگی دورانی به منظور افزایش حاشیه ناپایداری در نمودار عملکردی کمپرسور استفاده می‌شود. یکی از راهکارهای دستیابی به این هدف، استفاده از عملگرهای پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک^۱ بر روی زنجیره کمپرسور بوده که یک روش کنترل فعال لایه‌مرزی تلقی می‌گردد. بدین منظور، موقعیت‌های مختلف عملگرهای پلاسما بر روی پره میانی زنجیره قرار داده شده تا میزان تأثیر این عملگرها بر عملکرد آیرودینامیکی زنجیره کمپرسور بررسی شود. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به منظور مطالعه و بررسی مشخصه‌های مختلف استفاده از عملگرهای پلاسما بر روی زنجیره ماشین‌های دوار انجام شده است. اقبال و همکاران [۱] در سال ۲۰۰۶ نشان دادند که برای رسیدن به یک نیروی القایی مشخص، استفاده از مواد با ضخامت کمتر، نیازمند مصرف انرژی پایین‌تری است ولی محدودیت بیشترین نیروی القایی را با خود به همراه دارد. به عبارت دیگر، در یک نیروی القایی مشخص استفاده از ماده‌ای با ضخامت کمتر، مصرف انرژی پایین‌تری را می‌طلبد ولی بیشترین نیروی القایی آن، به این خاطر که ولتاژ فروپاشی با ضخامت ماده رابطه مستقیم دارد، کمتر خواهد بود. تحقیقات انجام شده در این زمینه توسط اورلف و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۶ نیز نشان می‌دهد که برای هر ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک مشخص، یک فرکانس موج بهینه وجود دارد. که بیشتر از آن نه تنها عملکرد عملگر پلاسما را افزایش نمی‌دهد، بلکه افزایش انرژی مصرفی را نیز به همراه دارد. همچنین برای تولید یک نیروی القایی مشخص، هر چه فرکانس موج اعمالی بیشتر باشد، ولتاژ لازم برای آن کمتر خواهد بود ولی در مقابل

بیشترین نیروی القایی که می‌توان از آن حاصل نمود، کمتر است. بررسی‌های مارو و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۷ نیز بر روی سرعت و نیروی حجمی تولید شده و اثر پارامترهای جریان متناوب ورودی بر روی آن به این نتیجه رسیدند که سرعت جریان القایی در لبه انتهایی الکتروود پوشیده شده بیشترین مقدار را داشته، نیز موج دندان‌های بیشترین میزان تولید نیرو در یک توان ورودی مشخص را دارد. لمیر و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۹ به بررسی عددی تأثیر موقعیت و نحوه عملکرد عملگر پلاسما به منظور افزایش راندمان آیرودینامیکی کمپرسور پرداختند. توماس و همکاران [۵] نیز در سال ۲۰۰۹، از جمله محققانی هستند که در این حوزه تلاش‌های قابل توجهی برای رسیدن به یک آرایش بهینه برای استفاده از عملگرهای پلاسما انجام داده‌اند. آن‌ها با بررسی نیرو و سرعت القایی، آرایش‌های مختلف عملگر پلاسما و بررسی مشخصه‌های الکتریکی آن، به این نتیجه رسیدند که نیروی القایی با ولتاژ اعمالی رابطه‌ای توانی داشته که در حالت معمول (در ولتاژهای پایین) عدد توان این رابطه ۳/۵ بوده و در ولتاژهای بالا به ۲/۳ تقلیل یافته، نیز افزایش تعداد الکتروودها سبب افزایش نیروی القایی می‌شود، اما این روند افزایشی به صورت خطی نبوده و به تدریج از شدت آن کاسته می‌شود. لی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از عملگرهای آیرودینامیکی پلاسما پایا و ناپایا توانستند جدایش گوشه را که در محل اتصال صفحه مکش و ناحیه‌ی پوسته پره استاتور کمپرسور تشکیل می‌شود را حذف کنند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو حالت پایا و ناپایا در حذف جدایش گوشه مؤثر بوده‌اند. دی جورجی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۲ به بررسی عددی بر روی زنجیره استاتور کمپرسور با بارگذاری بالا، سرعت پایین و با بکار بردن سه نوع از تکنیک‌های کنترل جریان یعنی جت پایا، عملگر پلاسما و جت مصنوعی پرداختند و هدف از آن، بررسی کارایی ابزارهای مختلف کنترل جریان در کنترل جدایش جریان و کاهش جریان ثانویه است و در نتیجه باعث کاهش افت فشار و افزایش فشار استاتیک شد. همچنین نتایج نشان دادند که استفاده از عملگر پلاسما در کاهش گردابه‌های ثانویه بهتر عمل می‌کند. لمیر و همکاران با مقایسه جت مصنوعی ناپایا و جت مصنوعی پایا و همچنین عملگر پلاسما دریافتند که استفاده از عملگر پلاسما و جت مصنوعی در کاهش افت فشار کل مؤثرتر از جت پایا هست. یان وو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۲ به بررسی کنترل جدایش گوشه

¹ Dielectric Barrier Discharge (DBD)



شکل ۱- شماتیک قرارگیری عملگر پلازما روی پره استاتور
کمپرسور محوری [۱۰]

در نوع اول استفاده از عملگر پلازما در صفحه مکش و نوع دوم در ناحیه پوسته و نوع سوم که ترکیبی از نوع اول و دوم است. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که عملگر پلازما با انحراف دادن جریان و کاهش افت فشار منجر به افزایش کلی گردش جریان و افزایش عملکرد ایرودینامیکی می‌شود، و استفاده از عملگر نوع دوم و سوم از نوع اول برای کنترل جدایش جریان مؤثرتر است.

گیریدهار و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۲ به منظور ارزیابی و بهبود محدوده عملیاتی پایداری از عملگر پلازما استفاده کردند و چپش عملگرهای پلازما را برای تأثیرگذاری روی جریان ریزشی نوک پره و در نتیجه حذف شروع واماندگی بررسی کردند. آن‌ها با قرار دادن عملگر پلازما در لبه‌ی حمله به نتایج قابل توجهی دست پیدا کردند. نتایج از این قرار بود که عملگرهای پلازما افت را کاهش می‌دهند و سبب افزایش فشار استاتیک در قسمت لقی پره می‌شوند. طالقانی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۳ با بررسی مشخصه‌های مؤثر در جریان القایی، همچون فرکانس تحریک و سیکل کاری، در شرایط محیط ساکن و فشار اتمسفر، به این نتیجه رسیدند که با افزایش سیکل کاری، سرعت القایی توسط عملگر پلازما افزایش یافته، نیز با افزایش فرکانس تحریک تا یک فرکانس آستانه مشخص، سرعت القایی افزایش می‌یابد که پس از آن در سیکل‌های کاری پایین، تقریباً ثابت و در سیکل‌های کاری بالا، باعث تشکیل قوس الکتریکی می‌شود. لی‌گانگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ به منظور افزایش محدوده و گستره‌ی پایداری در کمپرسورها و انرژی دادن به جریان نشستی روی نوک پره، با استفاده از عملگرهای پلازما تلاش کردند. نتایج نشان داد که استفاده از عملگر پلازما ناپایا در پوسته حول پره کمپرسور سبب بهبود محدوده پایداری کمپرسور از ۱۵۰۰ تا ۲۴۰۰ دور در دقیقه می‌شود، همچنین جت القایی تولید شده توسط عملگر پلازما با اضافه کردن مومنتوم به سیال تأثیر قابل توجهی روی

به کمک سه حالت قرارگیری عملگرهای پلازما پرداختند. آن‌ها در ابتدا، عملگرها بر روی صفحه مکش و قسمت پوسته‌ی پره استاتور به صورت جداگانه به کار گرفته شد و یک بار هم با ترکیب در هر دو موقعیت به صورت هم‌زمان قرار گرفته؛ مقایسه نشان می‌دهد که تأثیر کنترل جریان عملگر پلازما در قسمت پوسته پره از عملگر پلازما در صفحه مکش پره بیشتر است و نشان داده شد که عملگر پلازما در ناحیه پوسته می‌تواند جریان عبوری از صفحه فشار به صفحه مکش را به‌طور مؤثر مهار کند و همچنین عملگر پلازما در صفحه مکش به‌منظور کنترل جدایش جریان به کار می‌رود. در ادامه کار تحقیقاتی، آن‌ها به مقایسه عملگرهای پلاسمای میکروثانیه‌ای و نانو ثانیه پرداختند و آزمایش‌ها دلیل بر مؤثر بودن عملگرهای نانو ثانیه‌ای در سرعت جریان آزاد بالا بود. ژایو و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۲ به منظور کشف مشخصات جریان با استفاده از عملگر پلازما بر روی یک کمپرسور سرعت پایین تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها به بررسی ساختار توپولوژی و الگوی خطوط جریان و ضریب افت و بعلاوه ساختار گردابه پرداختند. با تحلیل نتایج ساختار توپولوژی به بررسی نقاط منفرد که نقاط جدایش را نشان می‌دهد پرداختند، آن‌ها دریافتند با افزایش زاویه برخورد نقاط منفرد به سه جفت افزایش می‌یابد و به طبع باعث افزایش افت فشار کل می‌شود. استفاده از عملگر پلازما تا ۳ و ۵ عدد نشان از کاهش افت فشار کل تا ۲۶٪ و ۳۰٪ را می‌دهد. ژایو هو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۲ با قرار دادن دو از عملگر پلازما در ناحیه پوسته استاتور به این مهم دست یافتند که استفاده از عملگر پلازما در جهت گام پره در ناحیه پوسته مؤثرتر از عملگر در جهت جریان است و دیگر آنکه روش مؤثر برای کنترل جریان پلازما، افزایش قدرت تحریک مانند تنظیم قدرت ولتاژ یا تغییر دادن توان ورودی است و در آخر نتیجه قابل توجهی که دیده شد در مورد جریان عبوری از صفحه فشار به نزدیکی صفحه مکش بود که لایه مرزی معکوس به سمت جریان بالادست حرکت می‌کند و در تقابل با جریان ورودی قرار می‌گیرد و سپس هردوی آن‌ها به صورت گردابه‌های دهانه پره تشکیل می‌شوند. باید توجه داشت که تأثیرات زاویه حمله به روی فشار استاتیک بسیار بیشتر از سرعت جریان آزاد است. ژایو هو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۲ همین‌طور با بررسی تأثیر عملگر پلازما در سه حالت نوع ۱ و ۲ و ۳ پرداختند که در شکل ۱ نشان داده شده است.

ناحیه نوک پره یعنی حدفصل 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 پلازما می‌تواند برای سرعت‌های متفاوت، حاشیه واماندگی را بهبود دهد. ناپایداری‌های ایرودینامیکی در تشکیل واماندگی دوار و پدیده سرچ^۲ 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 ایجاد افت در نسبت فشار می‌شود. ادامه قرارگیری در شرایط واماندگی چرخشی، ممکن است موجب بروز ناپایداری شدید ایرودینامیکی به شکل سرچ شود. پدیده سرچ یک جریان محوری نوسانی است که بسته به شدت آن، می‌تواند باعث جریان برگشتی عبوری از موتور شده؛ همچنین باعث افت شدید در توان موتور و در ادامه موجب تخریب مکانیکی شود. صدوقی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ به‌منظور کنترل ناپایداری در یک کمپرسور گذر صوت و کنترل جریان نشستی پره از چندین عملگرهای پلازما 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. ایرای آکسایوز و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ تقلیل جدایش جریان در گوشه را به‌وسیله عملگر پلازما بر روی یک کمپرسور با بارگذاری بالا، به روش عددی و تجربی، مورد بررسی قرار دادند. ابتدا شبیه‌سازی به‌وسیله دینامیک سیالات عددی به‌منظور ارزیابی تأثیرات عملگر و تعیین بهترین پارامترهای عملگر اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلازما به‌صورت ترکیبی از قرارگیری عملگرها بر روی صفحه مکش و پوسته به‌اندازه قابل توجهی افت فشار را کاهش می‌دهد. تعدادی از موقعیت‌های قرارگیری عملگر مورد امتحان قرار گرفته اما مؤثرترین موقعیت عملگر، مکانی بود که عملگر در بالادست نقطه‌ی جدایش قرار گرفته است. بررسی آن‌ها نشان داد که کمترین افت فشار کل در عملگر صفحه مکش قرار دارد. فرزاد اشرفی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأخیر بر روی واماندگی چرخشی در کمپرسورهای محوری و شعاعی

پرداختند. نتایج استفاده از شبیه‌سازی با استفاده از عملگر پلازما نشان داد که در هر دو کمپرسور، عملگر پلازما سبب تأخیر در شروع واماندگی به‌وسیله‌ی القای جریان نشستی نوک پره به مسیر جریان عبوری از روی پره خواهد شد. کدیور و همکاران [۱۷ و ۱۸] در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ به بررسی عددی تأثیر عملگر پلازما بر کنترل جدایش جریان بر روی ردیف زنجیره 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 پلازما، عملکرد آن به‌صورت توانی افزایش می‌یابد. ستوده و خوشخو [۱۹] در سال ۲۰۲۲ طی یک مطالعه عددی دوبعدی و تراکم‌پذیر بر روی زنجیره پره کمپرسور جریان محوری و اعمال عملگر پلازما باهدف کنترل جدایش بر روی استاتور، به این نتیجه رسیدند که در زوایای برخورد مثبت، به‌کارگیری عملگر پلازما بر ناحیه جدایش گوشه مؤثرتر بوده، نیز در زوایای برخورد منفی، به‌کارگیری عملگر پلازما بر سطح پوسته، همچنین جریان عبوری از سطح فشار به سمت سطح مکش مؤثرتر است. در صورت استفاده هم‌زمان از عملگر پلازما 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 [۲۰] به بررسی عددی تأثیر عملگر پلازما نانوثانیه‌ای بر کنترل جدایش جریان بر روی کسکید کمپرسور مافوق صوت پرداخته؛ نتایج نشان می‌دهد با استفاده از عملگر پلازما نانوثانیه‌ای بر روی کسکید، علاوه بر کاهش افت فشار کل، می‌توان محل بروز موج شوک را نیز جانمایی نمود. وانگ و همکاران در پژوهش دیگری [۲۱] به بررسی عددی تأثیر استفاده از عملگر پلازما نانوثانیه‌ای بر کنترل جدایش جریان بر روی یک کمپرسور محوری با رینولدز پایین پرداخته؛ نشان دادند استفاده از عملگر پلازما نانوثانیه‌ای می‌تواند بر جلوگیری از ناپایداری ناشی از جدایش جریان تأثیرگذار باشد. وزیری و همکاران [۲۲] به بررسی عددی تأثیر جانمایی عملگر پلازما بر عملکرد ایرودینامیکی ایرفویل متقارن NACA-0012 پرداخته؛ نتیجه پژوهش افزایش قابل توجه بازده ایرودینامیکی 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 زنجیره خطی پره کمپرسور محوری

² Surge

دو دیواره موسوم به دیوارهای انتهایی در بالا و پایین برای مکش لایه‌مرزی و دو دیواره موسوم به دیواره کناری که قسمت آزمون را تشکیل می‌دهند و پره‌ها روی آن‌ها نصب می‌شوند.

پره مورد استفاده پره‌ی دوبعدی ناکا ۹۵۱۲ می‌باشد. در شکل ۳ نمای سه‌بعدی از پره مورد استفاده قابل مشاهده است. پره مورد بررسی با استفاده از پرینتر سه‌بعدی با دقت ۱۰۰ میکرون ساخته شده و مجراهای اندازه‌گیری فشار با استفاده از لوله مسی آب‌بندی شده، 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.

سامانه مکش لایه‌مرزی سکو شامل یک سامانه از نوع مکش توزیع شده در دو جهت است. این سامانه مکش شامل یک فن با قدرت ۱/۱ کیلووات و کانال‌ها و ۱۴ شیر دستی است که به محفظه مکش متصل هستند. شیرهای دستی برای مکش توزیع شده در راستای لبه حمله پره‌ها در نظر گرفته شده‌اند. محفظه مکش به‌عنوان عضو دیگری از سامانه مکش از جنس همان دیواره‌های کناری (شیشه پلکسی) 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 ارائه می‌گردد.

در مسیر جریان مکش لایه‌مرزی زنجیره خطی آزمایشگاه تحقیقاتی دانا ابتدا جریان لایه‌مرزی دیواره مکیده شده، سپس جریان بعد از عبور از توری‌ها داخل محفظه‌ی مکش می‌شوند و با عبور از ۵ عدد شیر دستی (مکش توزیع شده 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 شیرهای دستی می‌روند. این شیرها ۱۴ عدد بوده که هفت عدد متعلق به یکی از دیواره‌های مکش است و هفت عدد 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، چراکه لایه‌مرزی به علت وجود فشار سکون در مقابل لبه‌ی حمله پره‌ها در آن ناحیه ذکر شده ضخیم‌تری دارد. در ادامه هر دو شیر دستی مربوط به سوراخ‌های مکش دو دیواره‌های کناری روبروی هم، داخل یک دوراهی شده و این دو جریان باهم ترکیب می‌شوند.

به‌وسیله عملگر پلاسمای پرداخته که طی آن، تأثیر مکش لایه‌مرزی و به‌کارگیری هم‌زمان عملگر پلاسمای بر روی پارامترهای عملکردی پره بررسی شده است.

معرفی سکو و فرآیند آزمون تجربی

سکوی آزمون زنجیره خطی موجود در آزمایشگاه تحقیقاتی دانا دانشگاه صنعتی امیرکبیر برای تحقیقات در حوزه پره‌های توربوماشین در رژیم جریان فروسوتی 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 آزمون با سامانه مکش لایه‌مرزی است. این سکو در شکل ۲ مشاهده و مشخصات فنی و ابعاد سکو در جدول ۱ ارائه می‌گردد. 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 ۰ تا ۵۲ درجه در دو جهت مثبت و منفی می‌تواند متغیر باشد.



شکل ۲- نمایی از سکوی آزمون زنجیره خطی آزمایشگاه تحقیقاتی دانا^۳ به همراه سامانه مکش لایه‌مرزی

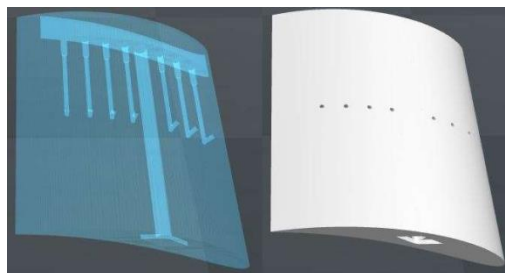
جدول ۱- مشخصات فنی کلی تونل باد زنجیره خطی آزمایشگاه تحقیقاتی دانا

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

^۳ آزمایشگاه دانشکده مهندسی هوافضا در نیرومحرکه و ایرویدینامیک



شکل ۵- شیرهای کنترل جریان



شکل ۳- نمایی سه بعدی از هواپر مورد آزمایش (ناکا ۹۵۱۲)



شکل ۶- شیرهای دستی در زوایای مختلف

جدول ۲- مشخصات فن مکش زنجیره خطی و موتور آن

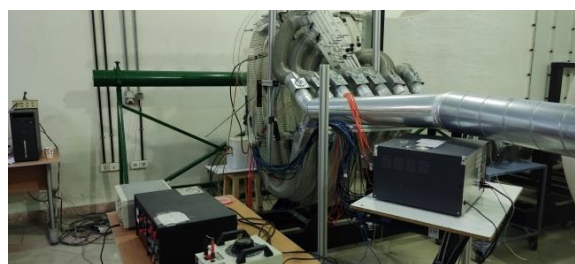
قدرت موتور فن	۱/۱ کیلووات
دبی فن در نقطه‌ی طراحی	۱۵۰۰ مترمکعب بر ساعت

سپس این هفت عدد دوراهی به یک محفظه‌ی همگرایی جریان متصل شده و همه‌ی جریان‌ها بعد از این هود به یک لوله‌ی اصلی وارد می‌شوند. این لوله به طول ۱/۵ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است تا جریان خالی از گردابه و توسعه یافته گردد و سپس بتوان در میانه آن فشار یا سرعت را اندازه گرفت. در انتهای مسیر یک شیر برای کنترل جریان اصلی فن موجود است و با به کارگیری 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 شیر دیگر برای کنترل میزان کنارگذر وجود دارد. چون کنترل دبی فن با شیر صورت می‌گیرد، کنترل جریان روی منحنی عملکرد فن صورت می‌پذیرد. لذا با کنترل جریان کنارگذر، به نقاط مورد نظر دسترسی پیدا می‌شود. دوراهی و این دو شیر دستی قطر بیست سانتی‌متری دارند. در شکل‌های ۴ تا ۶، نمای کلی از سامانه مکش و شیرهای کنترل جریان و همچنین تنظیمات شیرهای دستی در هر دو جهت مشاهده می‌شود. تنظیمات سامانه کنترل مکش در جهت لبه‌ی حمله در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- تنظیمات سامانه کنترل مکش در جهت پره‌ها با همان شیرهای دستی [۲۳]

شماره‌ی شیرهای درصد	درصد	شماره‌ی شیرهای درصد	درصد
دیواره‌ی کناری سمت راست	باز بودن	دیواره‌ی کناری سمت چپ	باز بودن
R1	۸۷/۵	L1	۱۲/۵
R2	.	L2	۱۲/۵
R3	۳۷/۵	L3	۵۰
R4	۳۷/۵	L4	۵۰
R5	۳۷/۵	L5	۵۰
R6	.	L6	۱۲/۵
R7	.	L7	۱۲/۵

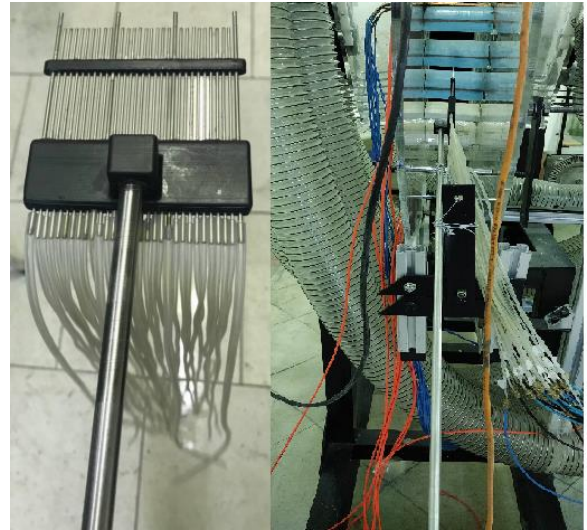
در این سکوی آزمون، وسایل اندازه‌گیری مختلفی استفاده شده است که به شرح ذیل می‌باشند. این سامانه‌ها شامل لوله پیتوت و سرعت‌سنج KIMO MP120، حس‌گرهای فشار ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌بار و نیز ریک فشاری می‌باشد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خروجی جریان در زنجیره از ریک فشاری با ۳۱ مجرای اندازه‌گیری فشار به طول ۱۶ سانتی‌متر 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 زنجیره که اندازه‌گیری‌ها روی آن انجام می‌گیرد نصب شده است. که تصویر آن در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۴- نمای کلی از سامانه مکش

- شکل موج سیگنال حامل از نوع موج سینوسی (بیشینه فرکانس حامل تا ۳۰kHz)
- بیشینه فرکانس تحریک تا ۱۰۰۰Hz (با توانایی تنظیم سیکل وظیفه)
- بیشینه توان الکتریکی خروجی تا ۱۰۰۰W.

این دستگاه شامل سه قسمت تنظیمات فرکانس و سیکل وظیفه، تنظیم و تبدیل ولتاژ، و تولیدکننده ولتاژ بالا می‌باشد. هر سه قسمت از طریق کابل‌های 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 پلاسمای متصل می‌شود. سر دیگر این کابل‌ها به دستگاه تولیدکننده ولتاژ متصل می‌شود.



شکل ۷- نمایی از ریک فشاری در حالت نصب روی سکوی زنجیره آزمایشگاه تحقیقاتی دانا

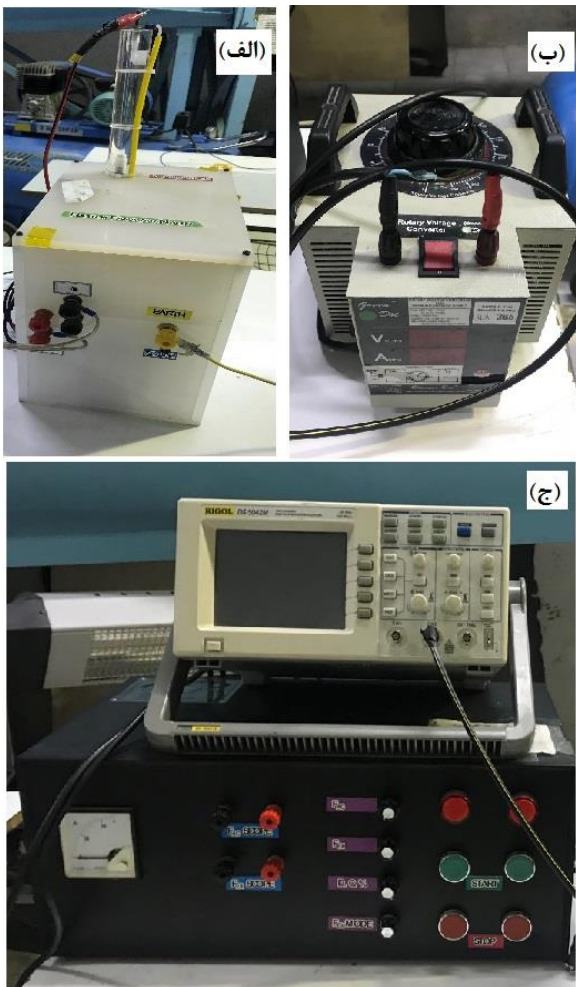
جدول ۴- مشخصات حس گرهای فشار

تعداد حس گر	۸۰ عدد
بازه عملکرد	+5 to -5 bar differential - ۱۰ عدد
	+12.5 to -12.5 mbar differential - ۱۰ عدد
	+25 to -25 bar differential - ۲۸ عدد
	+69 to -69 mbar differential - ۳۰ عدد
دقت	HSC Series +0.25 FSS BFSL
دمای کاری	۲۰- تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد
حس گر	
ولتاژ تغذیه	5 Vdc
اضافه فشار	675 Mbar تا 850 mbar بسته به بازه حس گرها
فشار ترکیبگی	1000 Mbar تا 1350 mbar بسته به بازه حس گرها
برند	Honeywell آمریکا
دمای کاری	۴۵ درجه سانتی‌گراد
حس گر	

تجهیزات تولید و نظارت پلاسمای

شکل ۸، نمایی از قسمت‌های 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 (بیشینه ولتاژ رأس به رأس اعمالی تا ۳۰ kV)

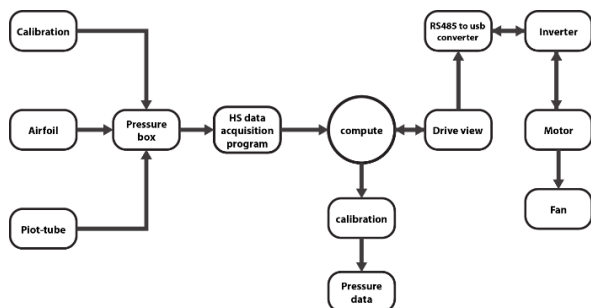


شکل ۸- مجموعه منبع تغذیه ولتاژ بالا: الف) جعبه تولیدکننده ولتاژ بالا، ب) جعبه تنظیم و تبدیل ولتاژ اعمالی، ج) جعبه کنترل منبع تغذیه

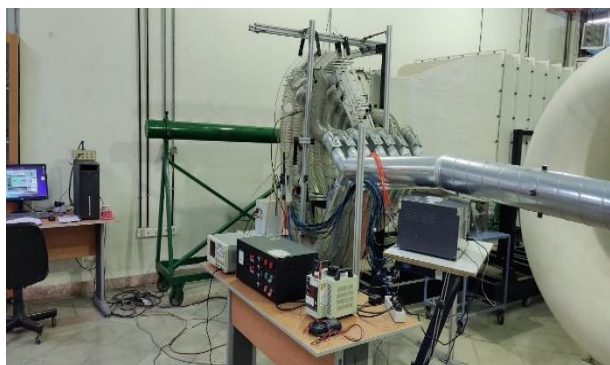
سرعت‌های ۲۰، ۱۰ و ۳۰ متر بر ثانیه)، با استفاده از نرم‌افزار داده‌برداری پرسرعت و با تنظیم فرکانس داده‌برداری و زمان آن به ذخیره‌سازی داده‌های خروجی حس‌گرهای فشار پرداخته شده است. لازم به ذکر است که داده‌برداری با فرکانس ۱ کیلوهرتز و در بازه زمانی ۱۰ ثانیه صورت گرفته است. تمام آزمون‌ها با حضور عملگر پلاسما در فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز و در دو ولتاژ ۸ کیلوولت و ۱۲ کیلوولت انجام گرفته است. برنامه آزمایش در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

جدول ۵- محدوده عدم قطعیت مطلق و نسبی تجهیزات

پارامترها	عدم قطعیت مطلق	عدم قطعیت نسبی
سرعت‌سنج KIMO MP120	$2 \text{ to } 5 \left(\frac{m}{s}\right): \pm 0.7 \left(\frac{m}{s}\right)$ $5 \text{ to } 40 \left(\frac{m}{s}\right):$ $\pm 0.5 \% \text{ of reading}$ $\pm 0.3 \left(\frac{m}{s}\right)$	$\pm 4/3\%$
سنسورهای فشار ۱۲/۵ و ۲۵ میلی بار	$\pm 12/5 \text{ (Pa)}$	$\pm 0/014\%$



شکل ۹- دیاگرام چیدمان سکو



شکل ۱۰- نمایی از سکوی چیدمان آزمایش

به منظور افزایش ایمنی، کابل تخلیه بار ساکن به اتصال زمین مرتبط شد. نیز برای اندازه‌گیری ولتاژ رأس به رأس خروجی، نوسان‌نگار به خروجی ولتاژ متصل می‌گردد. برای به دست آوردن ولتاژ بالا باید ولتاژ خوانده شده از خروجی نوسان‌نگار را در ۳۰۰۰ ضرب کرد. مقدار ولتاژ موردنظر 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 نوسان‌نگار یا مالتی متر برای اندازه‌گیری فرکانس اعمالی نیز می‌باشد. بازه تغییر فرکانس از ۵ کیلوهرتز تا ۳۰ کیلوهرتز می‌باشد. در این آزمایش فرکانس تحریک و سیکل وظیفه در حالت بیشینه خود تنظیم شده‌اند.

بررسی عدم قطعیت

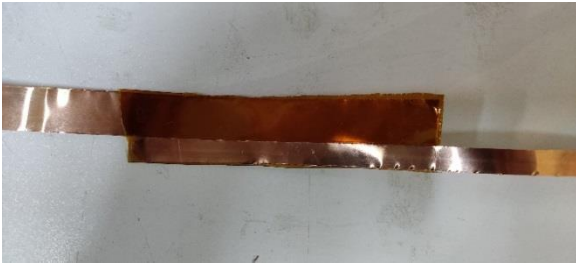
در این بخش، به بررسی دقت و عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری پرداخته شده است و در جدول ۵ محدوده عدم قطعیت دستگاه‌های سرعت‌سنج و سنسورهای فشار بیان شده است.

فرآیند آزمون

اندازه‌گیری فشار و سرعت در ورود با نصب لوله پیتوت در مرکز مقطع ورودی سکوی زنجیره صورت گرفته است. نصب لوله پیتوت در این محل کمترین اثر بر روی جریان عبوری از روی هواپر موردبررسی را خواهد داشت و برای اندازه‌گیری فشار پایین دست ردیف پره از ریک فشار که در فاصله دو وتر از انتهای پره نصب می‌شود، استفاده شده است. ریک فشار به‌طور قائم در میانه مقطع آزمایش قرار رفته و جهت قرارگیری لوله‌های اندازه‌گیری همواره در موازات لبه انتهایی هواپر است.

خروجی این ابزارها با استفاده از شلنگ‌هایی به قطر ۴ میلی‌متر به حس‌گرهای فشار وصل شده و داده‌های خروجی از جعبه حس‌گر به رایانه منتقل می‌شوند. تنظیم زاویه نصب پرها با استفاده از نوار مدرج نصب شده روی مقطع آزمایش انجام می‌گردد. در شکل ۹، دیاگرام چیدمان آزمایش و در شکل ۱۰، نمایی از سکوی چیدمان آزمایش نشان داده شده است.

پس از روشن شدن فن و رسیدن به سرعت‌های موردنظر و تأمل برای پایدار شدن جریان که در این مطالعه (به ترتیب



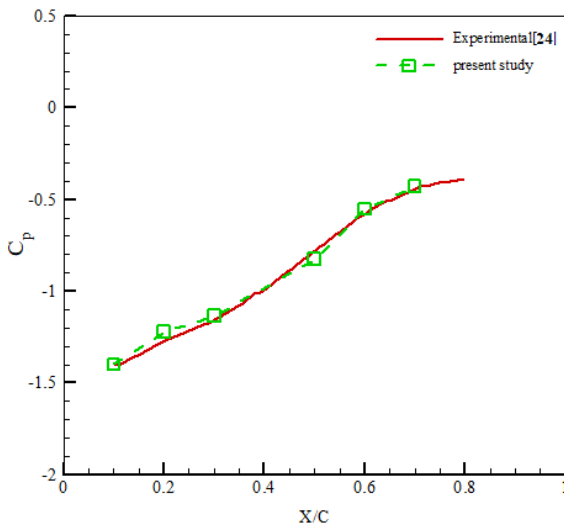
شکل ۱۳- نمای واقعی عملگر مورد استفاده

اعتبارسنجی از نتایج

به منظور بررسی صحت نتایج تجربی فشار استاتیک میانه بال اندازه گیری شده و از مرجع [۲۴] برای اعتبارسنجی جریان سیال بر روی یک ردیف پره کمپرسور استفاده شده است. میزان سرعت و زاویه برخورد انتخابی برای اعتبارسنجی به ترتیب ۳۰ متر بر ثانیه و ۶ درجه انتخاب شد. شکل ۱۴، توزیع ضریب فشار بر روی پره نشان داده شده است که تحقیق حاضر، از تطابق مطلوبی با داده های تجربی برخوردار است.

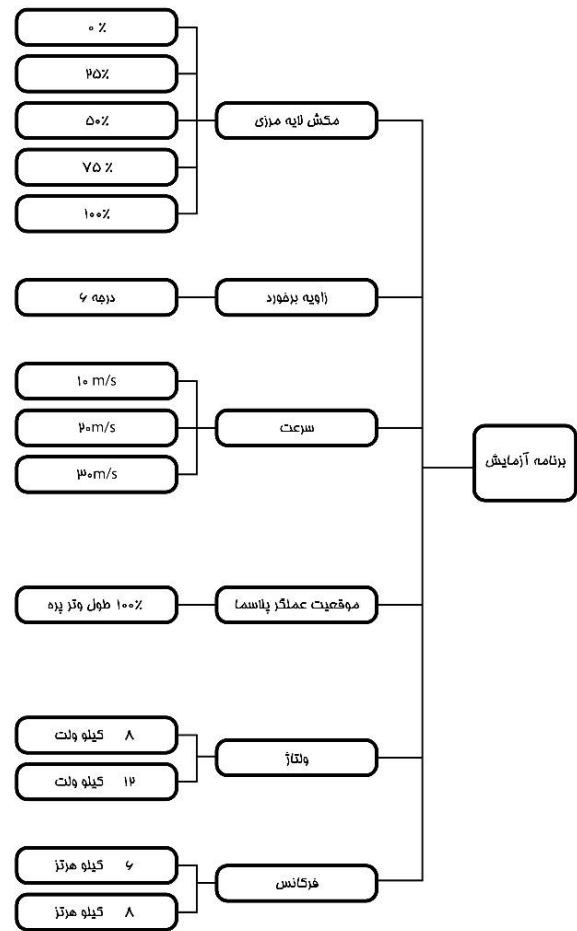
بحث و بررسی نتایج

نتایج داده برداری جهت ارزیابی اثر به کارگیری عملگر پلاسمای و مکش لایه مرزی همزمان، در نسبت فشار استاتیک، ضریب افت فشار سکون، راندمان زنجیره ارائه می گردد. در این بخش، به بررسی تأثیر استفاده از عملگر پلاسمای، مکش لایه مرزی به تنهایی و تأثیر استفاده همزمان مکش جریان در لایه مرزی و استفاده از عملگر پلاسمای پرداخته شده است.

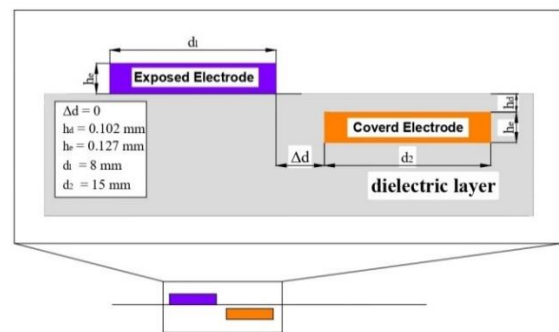


شکل ۱۴- توزیع ضریب فشار برای ردیف پره کمپرسور

هندسره مورد استفاده به همراه ابعادگذاری در شکل ۱۲ (به صورت شماتیک) و در شکل ۱۳ نمای واقعی عملگر پلاسمای نشان داده شده است.



شکل ۱۱- برنامه آزمایش



شکل ۱۲- شماتیک هندسه عملگر به همراه ابعاد گذاری

هدف محاسبه نسبت فشار استاتیک، راندمان کل زنجیره و ضریب افت فشار کل با توجه به حس گرهای فشار است. این موارد به کمک ریک فشاری موجود و حس گرهای فشار ۲۵ و ۱۲/۵ میلی بار با فرکانس داده برداری ۱۰۰۰ هرتز در هر ۱۰ ثانیه در آزمایشگاه تحقیقاتی دانا اندازه گیری شدند.

نتایج حاصل از حس گرهای فشار برای محاسبه مواردی چون نسبت فشار استاتیک، ضریب افت فشار کل و راندمان کل زنجیره در سرعت های مختلف برای حالت های مختلف: بدون پلاسما، با عملگر پلاسما، بدون مکش لایه مرزی، با مکش لایه مرزی و به صورت ترکیبی همراه با مکش لایه مرزی و عملگر پلاسما استفاده شده اند. لازم به ذکر است که شیرهای دستی کنترل مکش لایه مرزی در حالت کاملاً بهینه تنظیم شده اند و نتایج فشاری برای عملگر پلاسما نصب شده در انتهای پره گزارش شده است. پره اصلی یا مرکزی بیشتر مورد نظر بوده چراکه لوله های فشار استاتیک یا سکون ریک فشاری بیشتر روبروی آن است و در واقع بیشتر فشار استاتیک و سکون روبروی آن قرائت و میانگیری می شود.

در اینجا، ۴ لوله فشار استاتیک، فشار استاتیک خروجی را می خوانند و ۲۷ لوله فشار سکون، فشار سکون خروجی را می خوانند و در ورودی سکوی زنجیره یک لوله پیتوت نصب شده است که فشار استاتیک و سکون را در ورودی مقطع آزمون، داده برداری می کند. فرمول های محاسبه به ترتیب نسبت فشار استاتیک، راندمان کل زنجیره و ضریب افت فشار کل در روابط (۱) دیده می شود:

$$r_{p_static} = \frac{P_{s_out}}{P_{s_in}}$$

$$\eta_{total} = \frac{(P_{o_in} - P_{o_out})}{P_{o_in}} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{(P_{o_in} - P_{o_out})}{\frac{1}{2} \rho v_{in}^2}$$

که P_{s_in} و P_{s_out} به ترتیب، میزان فشار استاتیک خروجی و فشار استاتیک ورودی به کسکید می باشند. P_{s_out} و P_{o_in} به ترتیب، فشار کل ورودی و خروجی به کسکید و v_{in} سرعت جریان هوای تونل می باشد. در ادامه، موارد ذکر شده

همچون راندمان کل زنجیره، نسبت فشار استاتیک و ضریب افت فشار کل در قالب نمودارهایی جهت تحلیل بهتر اثر عملگر پلاسما یا مکش لایه مرزی و به طور هم زمان بر روی جریان زنجیره و در واقع پره ها و به خصوص پره اصلی مشاهده شده و سپس تحلیل نمودارها ارائه خواهد شد.

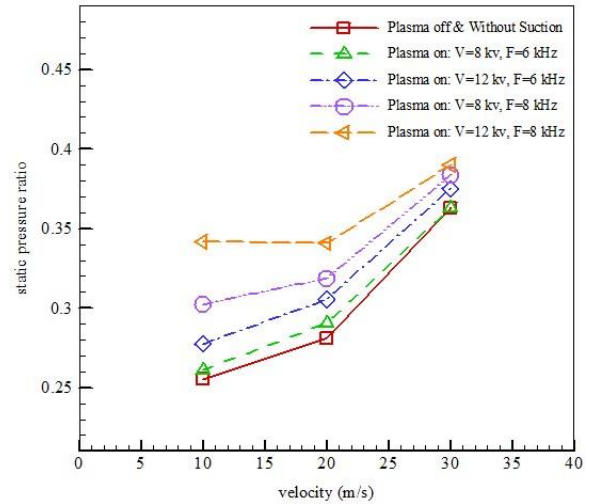
نسبت فشار استاتیک زنجیره

نیروی القایی پلاسما باعث تولید جت جریان در راستای سطح شده؛ در صورتی که مومنتوم سیال در مقایسه با این تزریق مومنتوم، بسیار بالا باشد، تأثیر عملکرد پلاسما کاهش خواهد یافت. به عبارت دیگر عملگرهای پلاسما در سرعت های پایین، مؤثرتر واقع خواهند شد. به منظور بررسی بیشتر، عملکرد عملگر پلاسما در اعداد سرعت مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۱۵، به بررسی و مقایسه نسبت فشار استاتیک بین دو حالت بدون استفاده از عملگر پلاسما و با استفاده از عملگر پلاسما در دو ولتاژ ۸ و ۱۲ کیلوولت و دو فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز پرداخته شده است. با توجه به نمودار نسبت فشار استاتیک در شکل ۱۵ مشخص است، نسبت فشار استاتیک در حالت به کارگیری عملگر پلاسما نسبت به عدم استفاده آن بیشتر است، اما با افزایش سرعت تأثیر عملگر پلاسما کم می شود. مثلاً در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، نسبت فشار استاتیک به اندازه ۸/۶۳ درصد افزایش می یابد و این امر را بدین گونه می شود تحلیل کرد که در سرعت های پایین به دلیل ضخیم تر بودن لایه مرزی، در واقع با تزریق مومنتوم توسط عملگر پلاسما لایه کم انرژی با افت های زیاد جریان پرنرزی تر می شود و افت فشار کل کم و نسبت فشار استاتیک زیاد می گردد، اما با افزایش میزان سرعت جریان، مقدار تأثیرگذاری عملگر پلاسما به علت کاهش ضخامت لایه مرزی و کم بودن نسبت سرعت جریان باد یونی تولیدی نسبت به سرعت سیال، کاهش می یابد. در شکل ۱۶ به بررسی و مقایسه نسبت فشار استاتیک در حالت بدون مکش و بدون استفاده از عملگر پلاسما و با استفاده از مکش پرداخته شده است. چنانچه مشاهده می گردد، نسبت فشار استاتیک در حالت با مکش لایه مرزی بیشتر است. در واقع مکش لایه مرزی باعث شده است تا زنجیره کمپرسور که مانند یک دیفیوزر (حالت فروصوت)، فشار استاتیک را افزایش دهد یا به عبارتی نسبت فشار استاتیکی ایجاد کند.

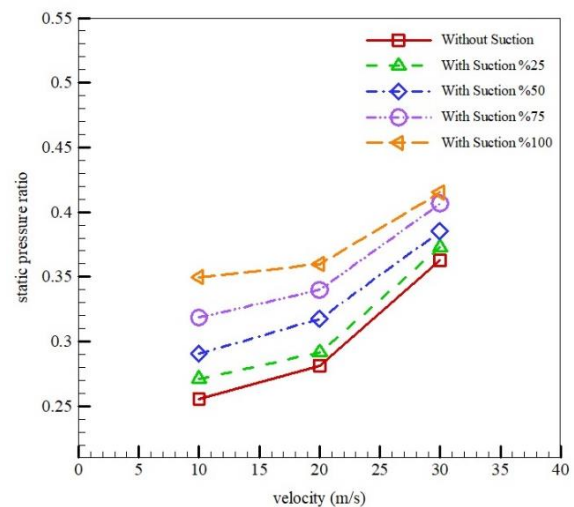
علت این موضوع این است که با توجه به نتایج تجربی به‌دست‌آمده مشخص است که بخش زیادی از لایه‌مرزی در سرعت‌های پایین با این سامانه مکیده شده است و جریان یکنواخت‌تر شده است. به عبارت دیگر جریان در زنجیره باید دوبعدی باشد و حالا با این مکش به حالت دوبعدی نزدیک‌تر شده است. هرچند در سرعت‌های بالاتر نسبت فشار استاتیکی ایجاد شده کمتر است، اما مکش لایه‌مرزی جهت یکنواخت کردن جریان لازم است. در واقع هر چه شرایط زنجیره به حالت دوبعدی تئوری نزدیک‌تر باشد، نتایج واقعی‌تر و منطقی‌تر است. در نهایت می‌توان بیان نمود، که با افزایش میزان مکش، میزان نسبت فشار استاتیک افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۱۷ الی ۲۰، به بررسی میزان نسبت فشار استاتیک در دو حالت با و بدون استفاده از عملگر پلاسمای با درصد‌های مختلف از مکش لایه‌مرزی به ترتیب، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پرداخته شده است که برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه افزایش نسبت فشار استاتیک به ترتیب، ۹/۱۱، ۹/۳۴، ۹/۹۱ و ۱۲/۰۸ است. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ ملاحظه می‌شود، در صورت استفاده از عملگر پلاسمای، میزان ولتاژ ۸ و ۱۲ کیلوولت و میزان فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش فرکانس، تأثیر بیشتری نسبت به افزایش ولتاژ دارد. بنابراین هرچه میزان ولتاژ و فرکانس افزایش یابد، میزان افزایش نسبت فشار استاتیک نیز افزایش می‌یابد.

همچنین، افزایش میزان سرعت جریان سیال از ۱۰ متر بر ثانیه به ۳۰ متر بر ثانیه، میزان تأثیرگذاری عملگر پلاسمای بر کنترل جریان کاهش می‌یابد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که نسبت فشار استاتیک در استفاده عملگر پلاسمای و مکش لایه‌مرزی به صورت هم‌زمان نسبت به مکش لایه‌مرزی به صورت تنها و نسبت به عملگر پلاسمای به صورت تنها بهتر می‌شود. نکته جالب توجه دیگر این است که با افزایش میزان مکش جریان، میزان شیب نمودارهای نسبت فشار استاتیک نسبت به افزایش سرعت سیال، کاهش می‌یابد و در مکش ۱۰۰ درصد، با افزایش میزان ولتاژ به ۱۲ کیلوولت و فرکانس به ۸ کیلوهرتز، میزان نسبت فشار استاتیک با افزایش سرعت، تغییر چندانی نکرده است.

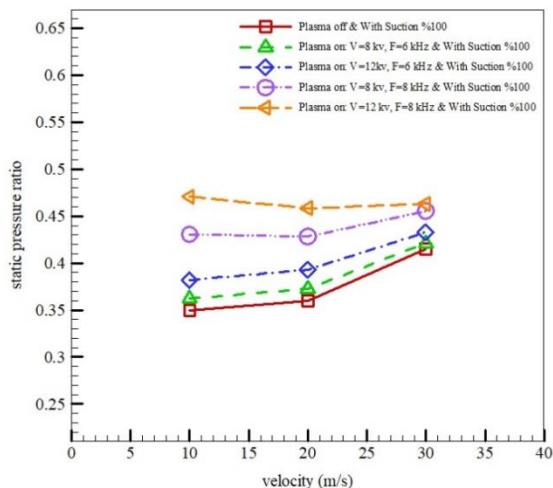


شکل ۱۵- مقایسه نسبت فشار استاتیک در حالت بدون پلاسمای و بدون مکش لایه‌مرزی و با عملگر پلاسمای در سرعت‌های مختلف

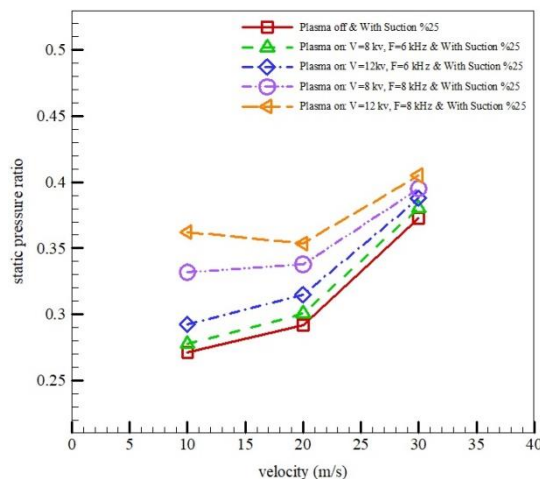


شکل ۱۶- مقایسه نسبت فشار استاتیک در حالت بدون مکش لایه‌مرزی و با مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف

نکته جالب توجه در سرعت‌های پایین است که بشدت اختلاف افزایش نسبت فشار استاتیکی در حالت با مکش لایه‌مرزی زیاد است و با افزایش سرعت این اختلاف کم می‌شود. مثلاً در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۹/۴ درصد نسبت فشار استاتیک افزایش می‌یابد هرچند در سرعت‌های بالاتر اختلاف افزایش نسبت فشار استاتیکی کم شده است اما باید توجه داشت که با این حال در زنجیره کمپرسور به تعویق انداختن جدایش جریان حتی مکش لایه‌مرزی امری اجتناب‌ناپذیر است. در واقع مضر بودن جدایش جریان، یک ضرورت برای مکش لایه‌مرزی است.



شکل ۲۰- مقایسه نسبت فشار استاتیک در حالت بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۱۰۰٪ مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف

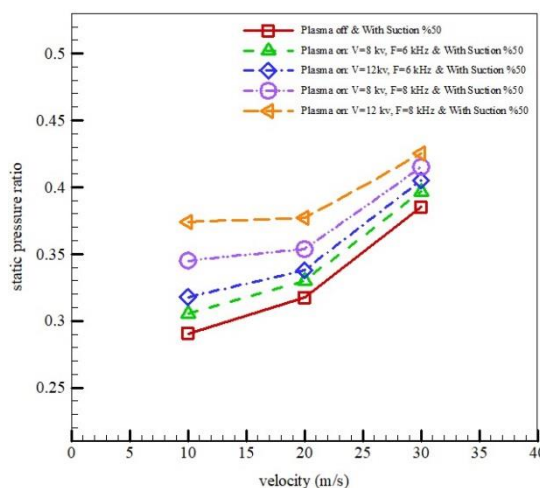


شکل ۱۷- مقایسه نسبت فشار استاتیک در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۲۵٪ مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف

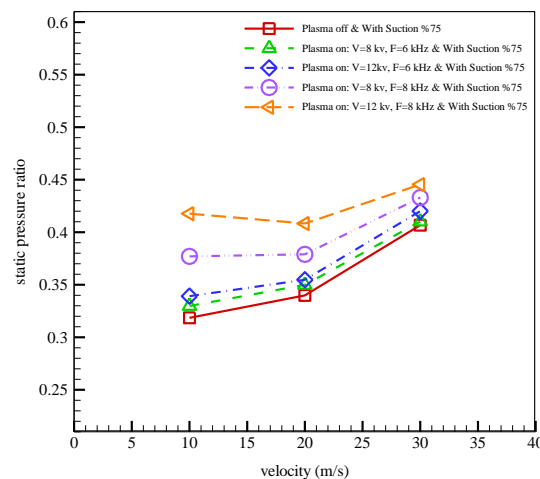
ضریب افت فشار کل

در این بخش، به بررسی تأثیر افت فشار کل برحسب تغییرات سرعت در دو حالت با و بدون عملگر پلاسما با درصد مکش‌های مختلف پرداخته شده است. در شکل ۲۱، به مقایسه تغییرات افت فشار کل در دو حالت با عملگر پلاسما و بدون عملگر پلاسما بدون مکش جریان و در دو فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز و ولتاژهای ۸ و ۱۲ کیلوولت به نمایش درآمده 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، ۱۹/۱ درصد از حالت بدون عملگر پلاسما کمتر است و این یعنی اتلافات حالت با عملگر پلاسما به دلیل نیروی پلاسما که باعث تولید جت جریان در راستای سطح می‌شود، کمتر شده است.

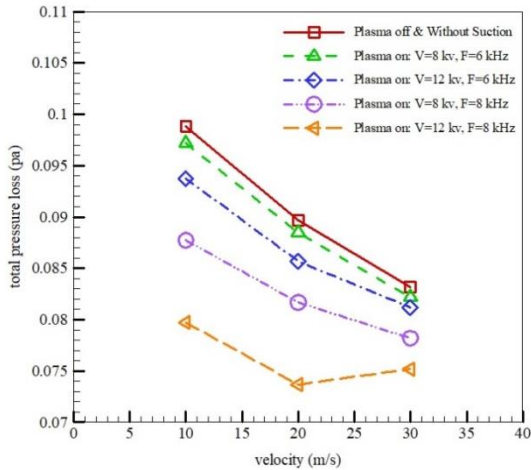
در شکل ۲۲، به بررسی میزان افت فشار کل برحسب سرعت جریان سیال با درصد مکش‌های مختلف پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۲۲ مشخص است مکش لایه مرزی نیز در سرعت‌های پایین باعث کاهش افت فشار کل شده است. مثلاً در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه افت فشار کل در حالت با مکش لایه مرزی ۱۴ درصد نسبت به حالت بدون مکش لایه مرزی 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 کم انرژی با افت‌های زیاد در جریان است، جریان پرانرژی‌تر می‌شود و میزان افت فشار کل کم یا راندمان



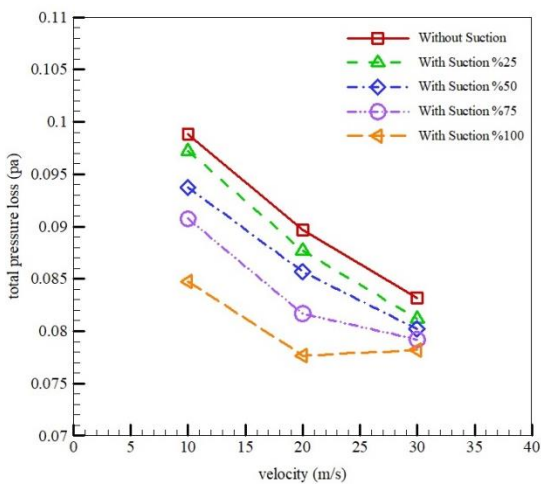
شکل ۱۸- مقایسه نسبت فشار استاتیک در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۵۰٪ مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف



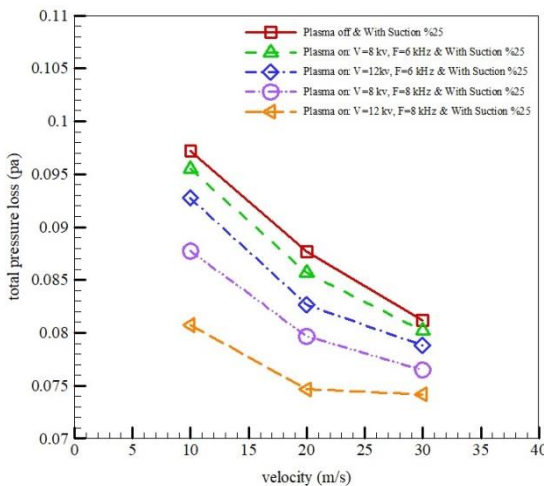
شکل ۱۹- مقایسه نسبت فشار استاتیک در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۷۵٪ مکش لایه مرزی در سرعت‌های مختلف



شکل ۲۱- مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلازما و با عملگر پلازما و بدون مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف



شکل ۲۲- مقایسه افت فشار کل در حالت بدون مکش لایه‌مرزی و با مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف



شکل ۲۳- مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلازما و با عملگر پلازما و ۲۵٪ مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف

کل زیاد می‌گردد. اما در حالت بدون مکش این افت مخصوصاً در سرعت‌های پایین زیادتر است.

از مقایسه دو شکل ۲۱ و ۲۲، نکته بسیار مهم به کارایی عملگر پلازما در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه نسبت به مکش لایه‌مرزی در این سرعت مربوط می‌شود. مکش لایه‌مرزی در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه ۵ درصد باعث کاهش افت فشار کل می‌شود و در مقابل، عملگر پلازما در همین سرعت، ۸ درصد باعث کاهش افت فشار کل می‌گردد. و در صورت استفاده ترکیبی در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه ۷ درصد باعث کاهش افت فشار کل می‌شود. در واقع خود مکش یا حذف لایه‌مرزی و همچنین خود صرف مکش به جریان شتاب می‌دهد و سرعت آن را بالاتر می‌برد. این موضوع به‌وضوح در هنگام روشن کردن فن مکش بر روی دستگاه سرعت‌سنج KIMO MP120 که به لوله پیتوت قرار گرفته در قسمت ورودی مقطع آزمون وصل شده بود، منعکس می‌شد.

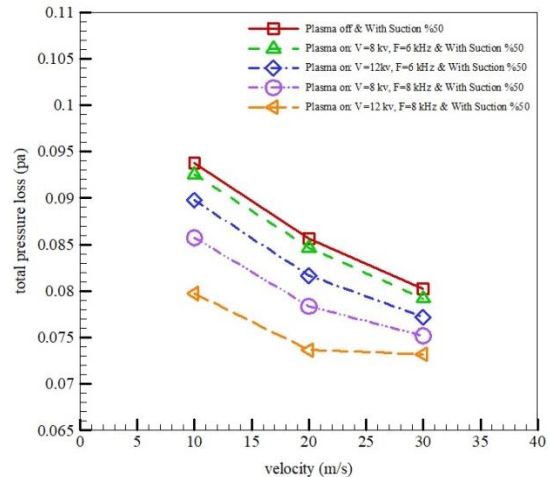
در شکل‌های ۲۳ تا ۲۶ به بررسی و مقایسه میزان افت فشار کل بر حسب سرعت جریان سیال در دو حالت با و بدون عملگر پلازما با میزان مکش ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پرداخته شده است که برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه کاهش افت فشار کل به ترتیب، ۱۳/۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۷ است. این تأثیرات را بدین گونه تحلیل می‌شود که در صورت استفاده از عملگر پلازما، میزان ولتاژ ۸ و ۱۲ کیلوولت و میزان فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. همان گونه که در شکل‌های ۲۳ تا ۲۶ ملاحظه می‌شود، عملکرد زنجیره کمپرسور در استفاده عملگر پلازما و مکش لایه‌مرزی به‌صورت هم‌زمان نسبت به مکش لایه‌مرزی به‌صورت تنها بهتر می‌شود، اما نسبت به عملگر پلازما به‌صورت تنها، تأثیر کمتری در عملکرد خواهد داشت. این موضوع به این خاطر است که اثرات تزریق مومنتوم به لایه‌مرزی توسط مکش لایه‌مرزی در تمامی طول پره خواهد بود اما عملگر پلازما در لبه انتهایی پره مورد استفاده قرار گرفته و در به‌کارگیری هم‌زمان مکش لایه‌مرزی و عملگر پلازما ممکن است علی‌رغم برهم‌نهی میزان مومنتوم انتقالی بخشی از اثرات مکش لایه‌مرزی را از بین برده و نتیجه منفی داشته باشد. در همه موارد با افزایش سرعت جریان سیال، میزان تأثیرگذاری عملگر پلازما کاهش می‌یابد.

راندمان زنجیره

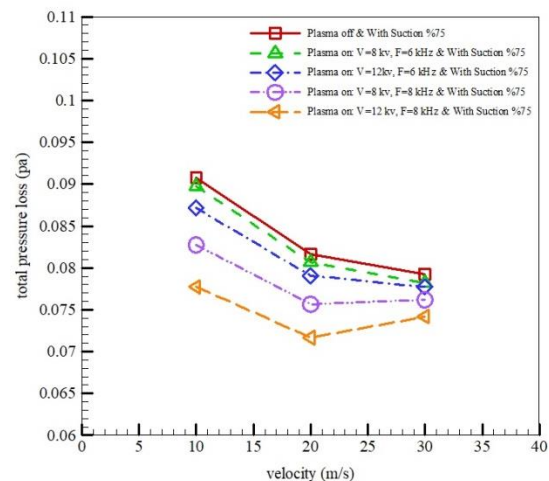
در ادامه به بررسی راندمان زنجیره برای دو حالت با و بدون عملگر پلاسما و با استفاده از مکش لایه‌مرزی و بدون آن پرداخته شده است. در این بخش، در صورت استفاده از عملگر پلاسما، میزان ولتاژ ۸ و ۱۲ کیلوولت و فرکانس ۶ و ۸ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۷، به مقایسه راندمان برحسب سرعت جریان سیال برای دو حالت بدون استفاده از عملگر پلاسما و با استفاده از عملگر پلاسما پرداخته شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، تأثیر افزایش فرکانس از افزایش ولتاژ در استفاده از عملگر پلاسما بیشتر است. به‌هرحال با استفاده از عملگر پلاسما، میزان راندمان فشار کل افزایش می‌یابد.

در شکل ۲۸، به بررسی راندمان زنجیره و مقایسه حالت بدون کنترل و در صورت استفاده از مکش لایه‌مرزی پرداخته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان راندمان کل، با افزایش میزان مکش، بیشتر می‌شود. به‌عنوان مثال، در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، میزان راندمان با مکش ۱۰۰ درصدی لایه‌مرزی، از ۰/۱ به ۰/۲ افزایش یافته است. بدیهی است که با افزایش میزان سرعت جریان، تأثیر میزان مکش بر راندمان کل، نیز کاهش می‌یابد.

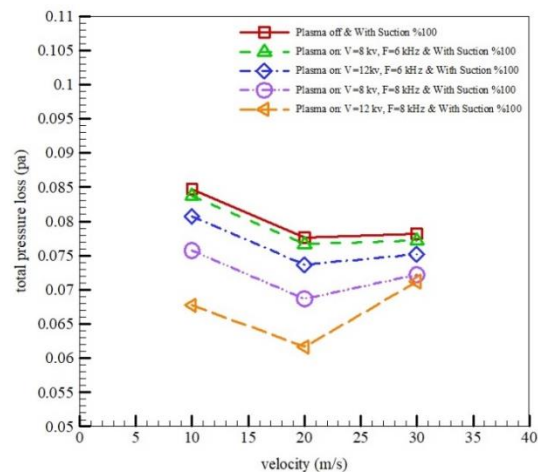
در شکل‌های ۲۹ تا ۳۲، به ترتیب به مقایسه میزان راندمان دو حالت بدون پلاسما و با پلاسما همراه با مکش لایه‌مرزی به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از دو ابزار باهم، اثر بخشی بیشتری بر میزان راندمان دارد. با توجه به شکل‌های ۲۷ تا ۳۲ که مربوط به راندمان کل زنجیره در دو حالت با عملگر پلاسما و بدون عملگر پلاسما، با مکش لایه‌مرزی و بدون مکش لایه‌مرزی و به‌صورت ترکیبی از دو ابزار بوده؛ پیداست که راندمان کل زنجیره در حالت با عملگر پلاسما، با مکش لایه‌مرزی و به‌صورت ترکیبی نسبت به حالت بدون مکش لایه‌مرزی و بدون عملگر پلاسما بازده بهتری داشته؛ در سرعت‌های پایین‌تر اختلاف راندمان کل زنجیره زیاد است. نکته جالب توجه در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد که راندمان کل زنجیره در حالت بدون عملگر پلاسما به‌شدت افت کرده است، درحالی‌که روند نزول راندمان در حالت با مکش لایه‌مرزی، با عملگر پلاسما و به‌صورت ترکیبی نسبت به حالت بدون عملگر پلاسما و بدون مکش لایه‌مرزی کندتر است و این نشانگر



شکل ۲۴- مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۵۰٪ مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف



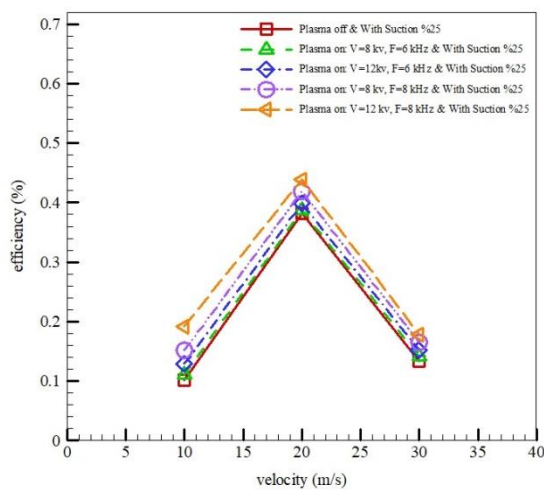
شکل ۲۵- مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۷۵٪ مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف



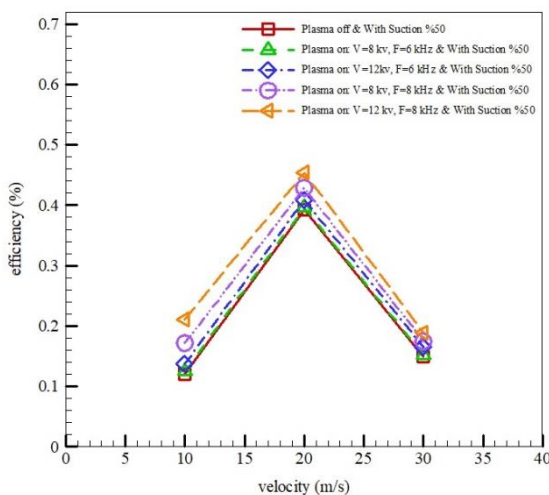
شکل ۲۶- مقایسه افت فشار کل در حالت‌های بدون پلاسما و با عملگر پلاسما و ۱۰۰٪ مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف

همان گونه که در شکل های ۲۱، ۲۷ و نیز مشاهده می شود، تأثیر استفاده از عملگر پلاسمای با افزایش سرعت، کاهش یافته و نقش عملگر پلاسمای در کنترل جریان به تدریج کم رنگ تر می شود. با افزایش عدد رینولدز، سهم نیروهای لزجت در جریان سیال کاسته شده و به همین خاطر فرصت رشد اختلالات ایجاد شده به واسطه جریان آشفته افزایش می یابد. افزایش رشد اختلالات، اتلاف هرچه بیشتر انرژی سیال را به همراه دارد و موجب می شود که بخش زیادی از مومنوم انتقالی به سیال از طریق عملگر پلاسمای تلف شود.

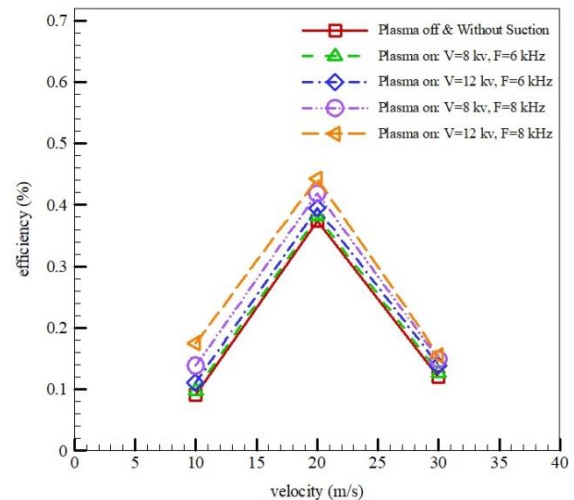
واماندگی شدن زنجیره در زاویه برخورد ۶ درجه و در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه می باشد. در واقع با افزایش سرعت ناحیه جدایش جریان به واسطه افزایش نسبی میزان مومنوم سیال، کاهش یافته و در عین حال، کاهش کارایی عملگر پلاسمای را به دنبال دارد؛ به طوری که در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه علی رغم ناحیه جدایش بزرگ تر تقریباً به طور کامل از وقوع جدایش جریان جلوگیری کرده ولی به تدریج از شدت تأثیر آن در اعداد سرعت بالاتر کاسته می شود.



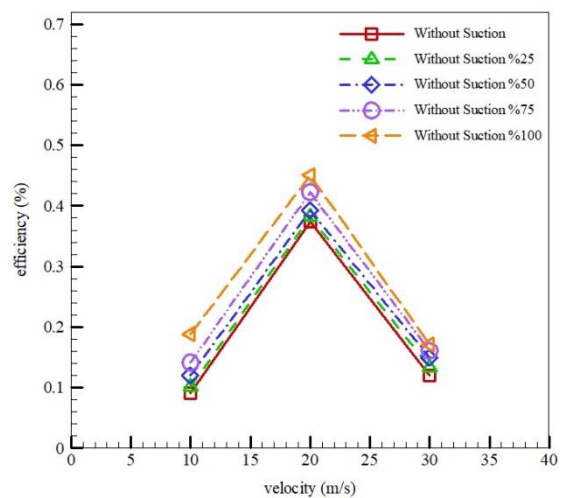
شکل ۲۹- مقایسه راندمان کل زنجیره در حالت بدون پلاسمای و با مکش لایه مرزی با عملگر پلاسمای و ۲۵٪ مکش لایه مرزی در سرعت های مختلف



شکل ۳۰- مقایسه راندمان کل زنجیره در حالت بدون پلاسمای و با ۵۰٪ مکش لایه مرزی با عملگر پلاسمای و ۵۰٪ مکش لایه مرزی در سرعت های مختلف



شکل ۲۷- مقایسه راندمان کل زنجیره در حالت بدون پلاسمای و بدون مکش لایه مرزی و با عملگر پلاسمای در سرعت های مختلف



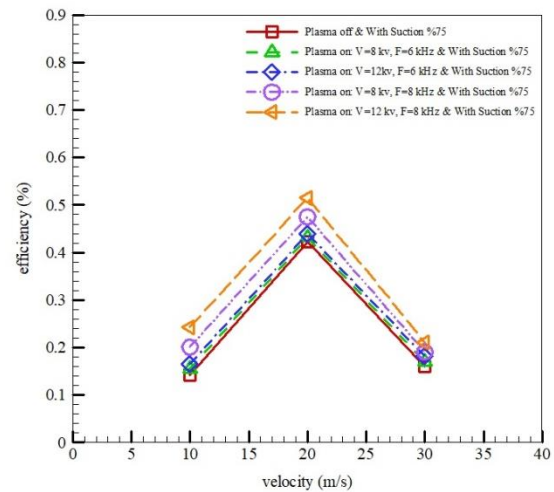
شکل ۲۸- مقایسه راندمان کل زنجیره در حالت بدون مکش لایه مرزی و با مکش لایه مرزی در سرعت های مختلف

در عملکرد این پدیده‌ها بررسی و نتایج حاصل از آن، مورد تحلیل قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل می‌باشد.

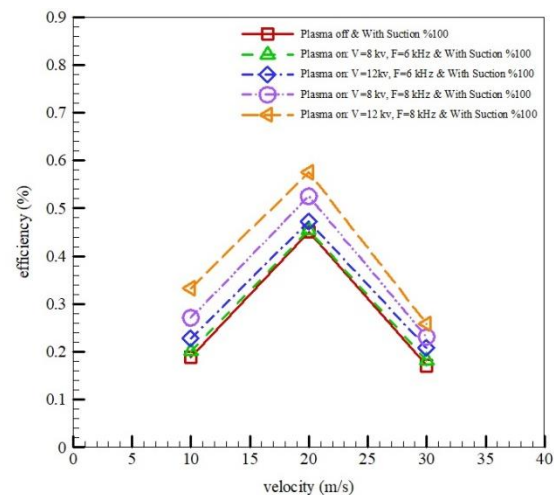
- کارایی عملگر پلاسما در کنترل جریان، در سرعت پایین بیشتر است؛ به طوری که در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با ولتاژ ۱۰ کیلوولت و فرکانس ۸ کیلوهرتز، ۱۹/۱ درصد منجر به کاهش افت فشار کل و ۸/۶۳ باعث بهبود نسبت فشار استاتیکی شده است. و این مقدار در سرعت‌های بالاتر کاهش می‌یابد.
- این ارزیابی تجربی نشان می‌دهد که سامانه مکش لایه‌مرزی می‌تواند افت فشار کل و راندمان کل زنجیره را تغییر دهد. در واقع با حذف جریان کم انرژی از سامانه می‌تواند افت‌های زنجیره 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.
- در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه راندمان کل زنجیره در حالت بدون عملگر پلاسما به شدت افت کرده است، در حالی که روند نزول راندمان در حالت با مکش لایه‌مرزی، با عملگر پلاسما و به صورت ترکیبی نسبت به حالت بدون عملگر پلاسما و بدون مکش لایه‌مرزی کندتر است و این نشانگر واماندگی شدن زنجیره در زاویه برخورد ۶ درجه و در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

فهرست علائم اختصاری

نمادها	توضیح
ω	ضریب افت فشار کل
\bar{p}_{static}	نسبت فشار استاتیک
η_{total}	راندمان کل زنجیره
P_{s_in}	فشار استاتیک ورودی
P_{s_out}	فشار استاتیک خروجی
P_{o_in}	فشار سکون ورودی
P_{o_out}	فشار سکون خروجی
ρ	چگالی سیال
v_{in}	سرعت در ورود



شکل ۳۱- مقایسه راندمان کل زنجیره در حالت بدون پلاسما و با ۷۵٪ مکش لایه‌مرزی با عملگر پلاسما و ۷۵٪ مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف



شکل ۳۲- مقایسه راندمان کل زنجیره در حالت بدون پلاسما و با ۱۰۰٪ مکش لایه‌مرزی با عملگر پلاسما و ۱۰۰٪ مکش لایه‌مرزی در سرعت‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، سعی شد ابتدا با بررسی کارهای انجام‌شده در مورد مکش لایه‌مرزی، عملگر پلاسما و مفاهیم مختلف در مورد کمپرسور و سکوی آزمون زنجیره خطی و ویژگی جریان در آن جهت کنترل جریان یعنی حذف لایه‌مرزی به‌عنوان جریان کم انرژی مزاحم، یکنواخت کردن جریان و در نتیجه کنترل جدایش جریان در کمپرسور انجام شد. بعد از آن آزمایش‌های تجربی اثرات عملگر پلاسما و مکش لایه‌مرزی در جریان سیال مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس پارامترهای مؤثر

actuation,” In *Turbo expo: Power for land, sea, and air*, 2012 , pp. 323-332.

[9] Xiaohu, Z. H. A. O., Yinghong, L. I., Yun, W. U., Tao, Z. H. U., & Yiwen, L. I. “Numerical investigation of flow separation control on a highly loaded compressor cascade by plasma aerodynamic actuation,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 25(3), pp. 349-360, 2012.

[10] Zhao, X. H., Wu, Y., Li, Y. H., Wang, X. D., & Zhao, Q. “Topological analysis of plasma flow control on corner separation in a highly loaded compressor cascade,” *Acta Mechanica Sinica*, vol. 28(5), pp. 1277-1286, 2012.

[11] G. Jothiprasad et al., "Control of tip-clearance flow in a low low-speed compressor rotor with plasma actuation," *Journal of Turbomachinery*, vol. 134(2), pp. 021019, 2012.

[12] Seyyed shams taleghani, s. a. “Experimental Investigation of Geometric and Electrical Characteristics by measurements of the induced flow velocity,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 12(5), pp. 132-145, 2013. (In Persian)

[13] 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*, vol. 23(2), pp. 114-119, 2014.

[14] Saddoughi, S., Bennett, G., Boespflug, M., Puterbaugh, S. L., & Wadia, A. R. “Experimental investigation of tip clearance flow in a transonic compressor with and without plasma actuators,” *Journal of Turbomachinery*, vol. 137(4), pp. 041008, 2015.

[15] Akcayoz, E., Duc Vo, H., & Mahallati, A. “Controlling corner stall separation with plasma actuators in a compressor cascade,”

منابع و مراجع

[1] Iqbal, M. O., Kozlov, A., Schatzman, D., Othman, H., Thomas, F., & Corke, T. “Parametric Optimization of Single Dielectric Barrier Discharge (SDBD) Plasma Actuators,” In *APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts*, 2006, vol. 59, pp. LI-011.

[2] Orlov, D., Corke, T., & Patel, M. “Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator,” in *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2006, pp. 1206.

[3] Moreau, E. “Airflow control by non-thermal plasma actuators,” *Journal of physics D: applied physics*, vol. 40(3), pp. 605, 2007.

[4] Lemire, S., Vo, H. D., & Benner, M. W. “Performance improvement of axial compressors and fans with plasma actuation,” *International Journal of Rotating Machinery*, vol 2009(1), pp. 247613, 2009.

[5] Thomas, F. O., Corke, T. C., Iqbal, M., Kozlov, A., & Schatzman, D. “Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control,” *AIAA journal*, vol. 47(9), pp. 2169-2178, 2009.

[6] Li, Y. H., Wu, Y., Zhou, M., Su, C. B., Zhang, X. W., & Zhu, J. Q. “Control of the corner separation in a compressor cascade by steady and unsteady plasma aerodynamic actuation,” *Experiments in fluids*, vol. 48, pp. 1015-1023, 2010.

[7] De Giorgi, M. G., Traficante, S., De Luca, C., Bello, D., & Ficarella, A. “Active flow control techniques on a stator compressor cascade: a comparison between synthetic jet and plasma actuators” in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2012, pp. 439-450.

[8] Wu, Y., Zhao, X. H., Li, Y. H., & Li, J. “Corner separation control in a highly loaded compressor cascade using plasma aerodynamic

[23] Ameri, E. "Design and Construction of a System to Prevent Boundary Layer Growth in a Linear Chain Test Platform," M.S. thesis, Amirkabir University of Technology, Department of Aerospace Engineering, 2017 (In Persian).

[24] Nasibi, H. "Numerical and experimental investigation of stepped cascade," M.S. thesis, Amirkabir University of Technology, Department of Aerospace Engineering, 2019. (In Persian)

Journal of Turbomachinery, vol. 138(8), pp. 081008, 2016.

[16] Ashrafi, F., Michaud, M., & Duc Vo, H. "Delay of rotating stall in compressors using plasma actuators," *Journal of Turbomachinery*, vol. 138(9), pp. 091009, 2016.

[17] 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*, vol. 20(4), pp. 182-209, 2019. (In Persian)

[18] Kadivar, A., Amanifard, N., Deylami, H. M., & Dolati, F. "Flow separation control in an axial compressor cascade using various arrangement of plasma actuator," *Journal of Electrostatics*, vol. 112, pp. 103580, 2021.

[19] Setoudeh, M., & Khoshkhoo, R. "Investigation of the Effect of DBD Plasma Actuator Location on Flow Control on Cascade of Axial Compressor," *Journal of Aeronautical Engineering*, vol. 24(1), pp. 57-69, 2022. (In Persian)

[20] Wang, Y., Zhang, H., Wu, Y., Li, Y., & Zhu, Y. "Supersonic compressor cascade flow control using plasma actuation at low Reynolds number," *Physics of Fluids*, vol. 34(2), pp. 027105, 2022.

[21] Wang, Y., Zhang, H., Wu, Y., Li, Y., & Zhu, Y. "Compressor airfoil separation control using nanosecond plasma actuation at low Reynolds number," *AIAA Journal*, vol. 60(2), pp. 1171-1185, 2022.

[22] Fahimi, N., Masoudi-Rad, H., Vaziri, M. A., & Ghadak, M. "Numerical Investigation of Effects of Plasma Actuator Placement on Aerodynamic Parameters of NACA 0012 Airfoil," *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, vol. 12(1), pp. 65-78, 2024. (In Persian)