

بررسی تأثیر مکان قرارگیری عملگر پلاسما تخلیه سد دی الکتریک بر کنترل جریان روی یک ردیف پره کمپرسور محوری

مسعود ستوده^۱، روح الله خوشخو^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

۲- استادیار مهندسی هوافضا-گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶)

چکیده

در دهه گذشته، کنترل جدایش جریان بر سطح کسکید کمپرسور به منظور افزایش راندمان و کاهش میزان افت فشار سکون همواره مورد توجه دانشمندان بوده است. یکی از روش‌های کنترل فعال جریان، استفاده از عملگر پلاسما تخلیه سد دی الکتریک می باشد. در این تحقیق، تأثیر عملگر پلاسما تخلیه سد دی الکتریک بر کنترل جدایش جریان بر روی سطح پره و پوسته یک ردیف پره کمپرسور محوری شبیه‌سازی شده است. معادلات ناویراستوکس به صورت، پایا، تراکم‌پذیر و سه‌بعدی در نظر گرفته شده و از مدل اغتشاشی SST K-3، جهت شبیه‌سازی جریان مغشوش استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در ابتدا مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و سپس، به بررسی تأثیر قرارگیری عملگرهای پلاسما در سه موقعیت سه مکانی برای استفاده از عملگر پلاسما بر سطح دیواره، بر سطح مکش پره و استفاده هم‌زمان از عملگر پلاسما در هر دو مکان، در زوایای برخورد مختلف جریان پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسما بر سطح پوسته نسبت به استفاده از عملگر پلاسما بر سطح مکش، تأثیر بیشتری در بهبود ضریب افت فشار سکون دارد. همچنین، استفاده از عملگر پلاسما بر سطح مکش در زوایای برخورد مثبت و در زاویه برخورد نقطه‌ی طراحی نسبت به قرارگیری دو نوع دیگر از عملگرهای پلاسما بر کاهش جدایش گوشه مؤثرتر است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، عملگر پلاسما تخلیه سد دی الکتریک، کنترل جریان، کسکید، کمپرسور محوری.

Investigation of the Effect of DBD Plasma Actuator Location on Flow Control on Cascade of Axial Compressor

Masoud Setoudeh and Rouhollah Khoshkhoo

Abstract

In the past decade, flow separation control on the compressor cascade surface has been of interest for scientists to increase efficiency and total pressure loss reduction. One method of active flow control is using a Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma actuator. In this research, DBD plasma actuator on flow separation control was stimulated on the blade surface and the of axial compressor cascade. Navier-Stokes equations are considered steady compressible and three-dimensional. The K-3 SST Turbulent model is used to simulate the turbulent flow. After validating the simulating the results, the effect of plasma actuators in three positions was investigated for application of the plasma actuator on the end wall, the suction surface of the blade or simultaneously at both locations at variable inflow angles. The results suggest that the use of plasma actuator on the end wall has a greater effect on decreasing the total pressure loss comparing suction surface. Besides, plasma actuator on the suction surface proved to be more effective for corner separation than the two other types, at positive inflow angles as well as the design point.

Key words: Numerical simulation, DBD plasma actuator, Flow control, Cascade, Axial compressor

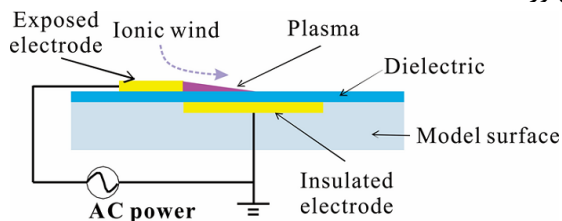
* نویسنده پاسخگو: روح الله خوشخو، پست الکترونیک: r.khoshkhoo@mut.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



مقدمه

یکی از روش‌های کنترل جریان فعال، استفاده از عملگرهای پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD^۲) می‌باشد. عملگرهای پلاسمای، آرایش و پیکربندی بسیار ساده‌ای دارند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد، این نوع عملگرها، شامل دو صفحه فلزی به‌عنوان الکتروده هستند که با آرایش خاصی در دو طرف یک ماده عایق قرار گرفته‌اند، یکی از این الکترودها در معرض هوا قرار داده شده است و به‌راحتی دیده می‌شود و الکتروده دیگر، در داخل ماده عایق پنهان شده است. جنس دی‌الکتریک نیز اغلب، کاپتون یا تفلون است. عملگر پلاسمای به‌هیچ‌وجه، سطح تماس زیادی در مقابل جریان ندارد و لذا قرار دادن آن بر روی سطح آیرودینامیک موجب به وجود آمدن مقاومت بیشتر از این حد نمی‌شود. به‌طور کلی، عملگرهای پلاسمای، جریان عبوری از روی جسم آیرودینامیکی را که در ناحیه مرزی قرار دارند، یونیزه کرده و به پلاسمای تبدیل می‌کنند، پلاسمای، تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار گرفته و منجر به تولید باد یونی در لایه مرزی می‌گردد و از پدیده جدایش جریان جلوگیری به عمل می‌آورد [۳].



شکل ۱- شماتیکی از عملگر پلاسمای DBD [۳]

لی و همکاران [۴]، با استفاده از عملگرهای پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک، به‌صورت 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. دی‌جورجی و همکاران [۵]، به بررسی عددی، کسکید استاتور کمپرسور با سرعت پایین و با سه نوع از ابزارهای کنترل جریان یعنی جت مصنوعی پایا^۳، عملگر پلاسمای و جت مصنوعی ناپایا^۴ پرداختند و هدف از آن، بررسی کارایی ابزارهای مختلف در کنترل جدایش جریان و کاهش جریان ثانویه بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسمای در کاهش گردابه‌های ثانویه بهتر عمل می‌کند. لمیر و همکاران [۶ و ۷] با

یکی از اهداف مهم در توربین‌های گازهای مدرن، افزایش نسبت نیروی پیشران به وزن موتور است. کاهش وزن در توربین‌های گاز یا کوچک شدن آن، سبب کاهش مصرف سوخت در وسایل نقلیه پرنده می‌شود. یکی از راه‌های کاهش نسبت نیروی پیشران به وزن، افت فشار سکون در کمپرسورهای محوری به سبب جدایش جریان و وجود جریان ثانویه در پره‌های استاتور و روتور است. در توربین‌های گاز مدرن، چون کار زیادی به هر مرحله از کمپرسور وارد می‌شود، احتمال ایجاد جدایش در ردیف پره‌های کمپرسور افزایش می‌یابد [۱]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه کنترل جدایش جریان در پره‌های کمپرسور محوری، به‌منظور افزایش عملکرد آیرودینامیکی و محدوده پایداری صورت گرفته است؛ که هرکدام دارای مزایا و معایبی هستند. اهمیت استفاده از روش‌های کنترل جدایش به دلیل کاهش و یا حذف جدایش جریان در گوشه، کاهش یا حذف جریان نشستی در نوک پره و بالا بردن حاشیه استال^۱ در نمودار عملکردی کمپرسور هست، همچنین استفاده از آن به دلیل کاهش افت فشار کل و بهبود افزایش ضریب فشار استاتیک در ردیف پره‌های استاتور است [۱]. لازم بذکر است، که تحقیقات صورت گرفته در مرحله بلوغ فناوری عملگر پلاسمای بوده و تاکنون عملگر پلاسمای بر روی کسکید کمپرسور، به‌صورت عملیاتی نصب نگردیده است.

روش‌های کنترل جریان، بر اساس مصرف انرژی به کنترل جریان فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های کنترل جریان فعال، نیازمند منبع توان خارجی به‌منظور کنترل جریان می‌باشند. در صورتی که روش‌های کنترل غیرفعال، نیازی به منبع توان خارجی نخواهند داشت؛ اما در عوض، روش‌های کنترل غیرفعال تا زمانی که وسیله پرنده در شرایط طراحی موردنظر می‌باشد، مؤثر هستند و در غیر این صورت، وجود آن‌ها دارای اثرات زیان‌باری می‌باشد؛ که اغلب به‌صورت افزایش میزان نیروی پسا است. این روش‌ها، دارای عیب بزرگی هستند که با تغییر شرایط جریان مانند افزایش عدد رینولدز، تغییرات زاویه برخورد پره و ... کارایی خود را از دست داده و حتی در برخی موارد، روی کارایی و عملکرد کمپرسور اثری منفی دارند [۲].

کدیور و همکاران [۱۲ و ۱۳]، به بررسی تأثیر عملگر پلاسمای بر کنترل جدایش جریان بر روی یک ردیف پره کمپرسور محوری پرداختند. این تحقیق، به صورت دوبعدی و جریان تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است، همچنین، این تحقیق در عدد رینولدز کم و با استفاده از یک عملگر بر روی سطح مکش پره صورت گرفته است و به این نتیجه رسیدند که مدل SST $k - \omega$ نسبت به سایر مدل‌های اغتشاشی، بهترین عملکرد در مدل‌سازی جریان مغشوش در اطراف کسکید دارد، همچنین، با افزایش ولتاژ اعمالی عملگر پلاسمای، کارایی عملکرد آن نیز به صورت توانی افزایش می‌یابد.

در تحقیق‌های گذشته، به بررسی تأثیر استفاده از عملگر پلاسمای بر روی کمپرسور با سرعت پایین صورت گرفته است و کارایی و اثربخشی استفاده از عملگر پلاسمای در سرعت‌های پایین تأیید گردیده است. با توجه به تولید باد یونی با سرعت کمتر از ۸ متر بر ثانیه توسط عملگر پلاسمای و کم‌بودن میزان این سرعت نسبت به سرعت جریان در کمپرسورهای با بارگذاری بالا، در این تحقیق، به بررسی تأثیر استفاده از عملگرهای پلاسمای در کمپرسور با بارگذاری بالا و سرعت‌بالا اقدام شده است. در این تحقیق، سه مکان، سطح دیواره، سطح مکش پره و استفاده هم‌زمان از عملگرهای پلاسمای در هر دو مکان جهت قرارگیری عملگر پلاسمای در نظر گرفته شده است، تا تأثیر آن بر میزان کاهش افت فشار کل و افزایش فشار استاتیک کمپرسور مشخص گردد.

معادلات حاکم بر جریان

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی جریان سیال از معادلات ناوراستوکس به صورت سه‌بعدی، تراکم‌پذیر و مغشوش استفاده شده است. ترم‌های اضافه‌شده به سمت راست معادلات ممنتوم و انرژی، اثر تخلیه الکتریکی پلاسمای روی جریان سیال می‌باشد. معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U} + p \vec{I}) - \nabla \cdot \vec{\tau} = D_c q \vec{E} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho e + p) \vec{U}] - (\vec{U} \cdot \vec{\tau}) - Q_{ht} = \beta D_c q \vec{U} \cdot \vec{E}$$

$\vec{U} = \{u, v, w\}$ بردار سرعت است. ρ چگالی، p فشار، t زمان، $\vec{\tau}$ تانسور تنش برشی، Q_{ht} ترم هدایت گرمایی، e انرژی کل، q

مقایسه جت مصنوعی ناپایا و جت مصنوعی پایا و همچنین عملگر پلاسمای دریافتند که استفاده از عملگر پلاسمای و جت مصنوعی در کاهش افت فشار کل مؤثرتر از جت پایا می‌باشد.

یان وو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۲، به بررسی کنترل جدایش گوشه به کمک سه حالت مختلف قرارگیری عملگرهای پلاسمای پرداختند. آن‌ها در ابتدا، عملگرها را بر روی صفحه مکش و سپس بر روی پوسته‌ی پره استاتور به صورت جداگانه مورد استفاده قرار دادند و یک‌بار هم با ترکیب در هر دو موقعیت، به صورت هم‌زمان استفاده شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد؛ که تأثیر کنترل جریان عملگر پلاسمای بر روی پوسته پره از عملگر پلاسمای در صفحه مکش پره بیشتر است. همچنین، عملگر پلاسمای در صفحه مکش به منظور کنترل جدایش جریان به کار می‌رود. مایو و همکاران [۹]، به منظور بررسی تأثیر عملگر پلاسمای بر مشخصات جریان بر روی یک کمپرسور سرعت پایین، تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها به بررسی الگوی خطوط جریان^۵ و ضریب افت^۶ و بعلاوه ساختار گردابه^۷ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از سه و پنج عدد عملگر پلاسمای، میزان افت فشار کل را به ترتیب ۲۶٪ و ۳۰٪ کاهش می‌دهد.

ژایو هو و همکاران [۱۰]، با قرار دادن دو عملگر پلاسمای در ناحیه پوسته استاتور به این مهم دست‌یافتند که استفاده از عملگر پلاسمای در جهت گام پره^۸ در ناحیه‌ی پوسته مؤثرتر از استفاده از عملگر پلاسمای در جهت جریان سیال است و دیگر آن‌که روش مؤثر برای کنترل جریان پلاسمای، افزایش قدرت تحریک مانند تنظیم قدرت ولتاژ یا تغییر دادن توان ورودی است. ایرای آکسایوز و همکاران [۱۱]، تقلیل جدایش جریان در گوشه را به وسیله عملگر پلاسمای بر روی یک کمپرسور با بارگذاری بالا، به روش عددی و تجربی، مورد بررسی قرار دادند. ابتدا، شبیه‌سازی به منظور ارزیابی تأثیرهای عملگر و تعیین بهترین پارامترهای عملگر اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد؛ که استفاده از عملگر پلاسمای به صورت ترکیبی از قرارگیری عملگرها بر روی صفحه مکش و پوسته به اندازه قابل‌توجهی، افت فشار را کاهش می‌دهد. تعدادی از موقعیت‌های قرارگیری عملگر مورد امتحان قرار گرفت، اما مؤثرترین موقعیت عملگر، مکانی بود که عملگر در بالادست نقطه‌ی جدایش قرار گرفته است. طی این بررسی، بیشترین کاهش افت فشار کل، در صورت قرارگیری عملگر پلاسمای در صفحه مکش است.

مراجع [۱۶ و ۱۵] و اعتبارسنجی صورت گرفته برای شبیه‌سازی مدل شایبی در مرجع [۱۷] بیان شده است.

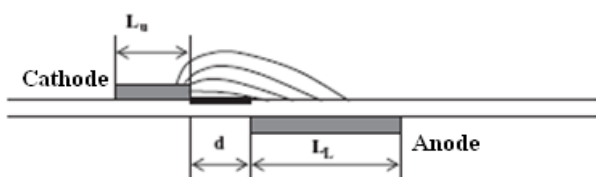
جهت بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده، از دو پارامتر، ضریب افت فشار کل و ضریب افزایش فشار استاتیک استفاده شده است. یکی از پارامترهای مهم در توربوماشین‌ها ضریب افت فشار کل می‌باشد. ضریب افت فشار کل توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\omega = \frac{p_{t1} - p_{t2}}{p_{t1} - p_{s1}} \quad (۶)$$

p_{t1} فشار کل ورودی، p_{t2} فشار کل در ۴۰٪ طول وتر در پایین دست کسکید و p_{s1} فشار استاتیک ورودی می‌باشد. همچنین، ضریب افزایش فشار استاتیک توسط میانگین وزنی سطحی^۹ در خط میانی دهانه^{۱۰} کسکید کمپرسور گزارش شده است. ضریب افزایش فشار استاتیک توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Omega = \frac{p_{s2} - p_{s1}}{p_{t1} - p_{s1}} \quad (۷)$$

که p_{s1} فشار استاتیک ورودی، p_{s2} فشار استاتیک در ۴۰ درصد طول وتر در پایین دست کسکید و p_{t1} فشار کل ورودی است.



شکل ۲- شماتیک عملگر پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک با شکل تقریبی از خطوط میدان الکتریکی [۱۵]

شبیه‌سازی سه‌بعدی و شرایط مرزی

به منظور شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار تجاری فلوئنت استفاده شده است و مدل شایبی به صورت UDF به آن اضافه شده است. جریان ورودی به کسکید کمپرسور محوری تراکم پذیر و سرعت بالا در نظر گرفته شده است. شماتیک شرایط مرزی و دامنه حل برای کسکید کمپرسور محوری در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت بررسی کسکید از ۵ پره در یک ردیف استفاده شده است. جهت جلوگیری از تاثیر جریان بر روی کسکید بر جریان‌های ورودی و خروجی، دامنه حل در بالادست پره، دو برابر وتر پره و در پایین دست پره، سه برابر وتر پره

چگالی بار الکتریکی و $\vec{E} = \{E_x, E_y, E_z\}$ بردار میدان الکتریکی می‌باشد. β نشان‌دهنده اعمال نیروی ایجاد شده در اثر میدان الکتریکی (صفر یا یک) می‌باشد. Pr عدد پرائنتل جریان بوده که برای جریان آرام مقدار آن برابر ۰/۷۲ و برای جریان آشفته برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است. μ ضریب لزجت آرام از قانون سادرلند به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\mu}{\mu_{ref}} = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T_{ref} + 110.4}{T - 110.4} \right) \quad (۲)$$

و برای تکمیل معادلات فوق از معادله حالت گاز کامل به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$P = (\gamma - 1) \rho \left[e - \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right] \quad (۳)$$

برای جریان آشفته ضریب لزجت آرام μ با یک ضریب لزجت معادل به صورت زیر جایگزین شده است:

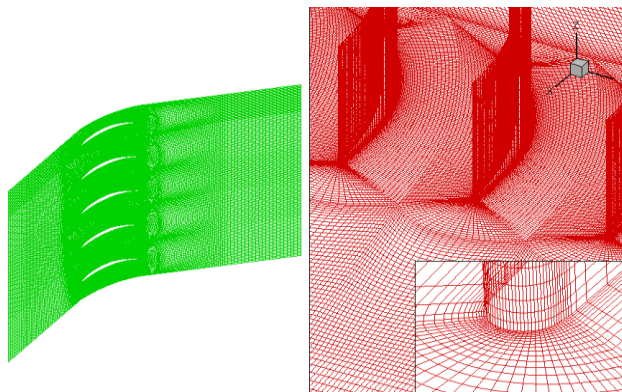
$$\mu_{ref} = \mu + \mu_t \quad (۴)$$

پارامتر D_c نشان‌دهنده اندازه نیروی الکتریکی به اینرسی می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

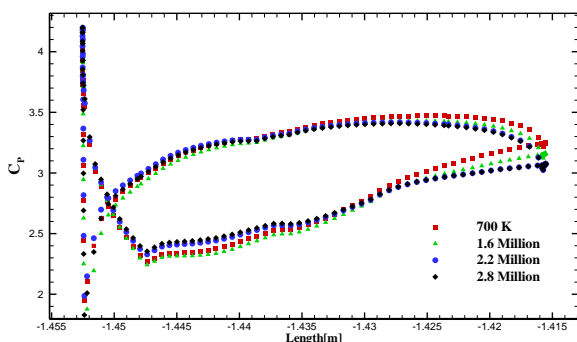
$$D_c = \frac{\rho_c \text{ref} e_c E_{ref} L_{ref}}{P_{ref}} \quad (۵)$$

که ρ_c چگالی عددی بار الکتریکی، e_c بار الکتریکی می‌باشد. همچنین از مدل اغتشاشی SST $k - \omega$ برای جریان آشفته استفاده شده است، تحقیقات انجام شده در مراجع [۴ و ۱۲]، نشان‌دهنده، بهینه‌بودن و کارا بودن این مدل، در بررسی جریان در اطراف کسکید می‌باشد. جزئیات بیشتر در رابطه با این مدل اغتشاشی، در مرجع [۱۴] قابل مشاهده است.

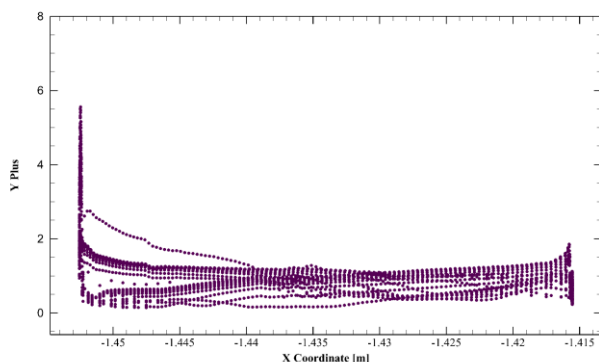
جهت شبیه‌سازی عملگر پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک از روش شایبی استفاده شده است. در این روش، خطوط میدان الکتریکی در مجاورت الکتروود کاتد متمرکز شده و به طور یکنواخت روی الکتروود آند (الکتروود پوشیده شده با عایق) توزیع گردیده‌اند؛ بنابراین، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در مدل شایبی، با تقریب خوبی فرض می‌شود که خطوط میدان الکتریکی در ناحیه مثلثاتی، به جز در ناحیه کوچکی نزدیک به کاتد، به طور موازی می‌باشند؛ بنابراین با توجه به تغییرات میدان الکتریکی در این ناحیه، قدرت میدان الکتریکی با حرکت به سمت دور از کاتد به طور خطی کاهش می‌یابد. جزئیات بیشتر در رابطه با معادلات حاکم بر این مدل در



شکل ۴- شماتیک شبکه بندی کسکید کمپرسور محوری



شکل ۵- نمودار استقلال حل از شبکه



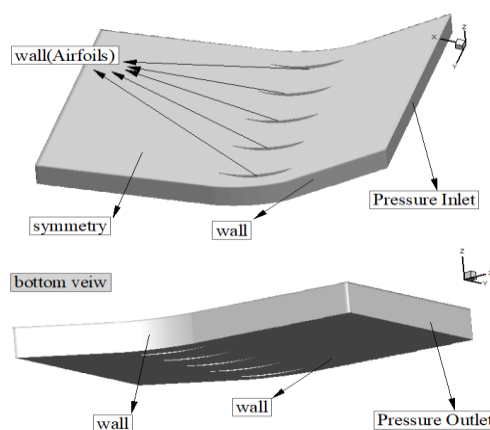
شکل ۶- نمودار وای پلاس بر روی سطح کسکید

اعتبار سنجی سه بعدی کسکید خطی یک کمپرسور محوری سرعت بالا تحت بارگذاری بالا

مدل انتخاب شده برای شبیه سازی عددی، یک کسکید کمپرسور محوری سرعت بالا با تعداد پنج پره و سطح مقطع ایرفویل NACA65K48 می باشد. پروفیل پره همراه با پارامترهای اصلی طراحی کسکید در نقطه طراحی آیرودینامیکی^{۱۱} (ADP) در جدول ۱ نشان داده شده است. نسبت منطقی^{۱۲} پره های کسکید، به منظور در نظر گرفتن جریان ثانویه بیان شده است. همچنین سعی شد، شبیه سازی کسکید

گسترش یافته است. برای کاهش هزینه محاسباتی و کمتر شدن مدت زمان حل، نصف ارتفاع کسکید پره به عنوان دامنه حل، به دلیل تقارن جریان و هندسه لحاظ شده است.

برای تولید شبکه سه بعدی از نرم افزار ICEM-CFD استفاده شده است. این نرم افزار، امکان تولید شبکه منظم، با استفاده از بلاک بندی فراهم می کند. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، مدل شبکه بندی H-O-H در اطراف کسکید مورد نظر استفاده شده است. تعداد سلول به کاررفته برای حل جریان کسکید کمپرسور محوری سه بعدی حدوداً ۲۲۰۰۰۰۰ می باشد. در شکل ۵، نمودار ضریب فشار استاتیک به منظور استقلال شبکه نشان داده شده است. به منظور مطالعه شبکه، چهار نمونه شبکه در تعدادهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. تعداد سلول های شبکه برای شبکه درشت، ۸۰۰۰۰۰، برای شبکه متوسط ۱۶۰۰۰۰۰ و شبکه های ریز ۲۲۰۰۰۰۰ و ۲۸۰۰۰۰۰ سلول می باشد. تفاوتی چندانی بین شبکه بندی ۲۲۰۰۰۰۰ و ۲۸۰۰۰۰۰ سلول دیده نشد، به همین دلیل، شبکه بندی ۲۲۰۰۰۰۰ برای شبیه سازی جریان بدون عملگر پلاسمای و با عملگر پلاسمای انتخاب شده است. در شکل ۶، نمودار وای پلاس بر روی سطح کسکید نشان داده شده است، با توجه به استفاده از مدل اغتشاشی $k-\omega$ SST، میزان وای پلاس برای اولین ردیف سلول ها بر روی سطح پره، کمتر از دو مطلوب است. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، میزان وای پلاس در اکثر نقاط در محدوده زیر یک قرار دارد.

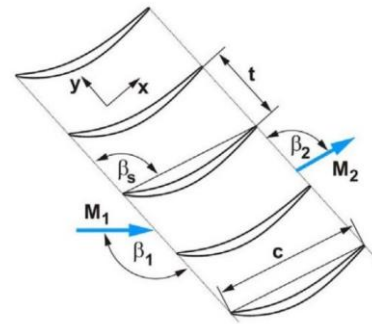


شکل ۳- شماتیکی از شرایط مرزی و دامنه حل جریان

در شرایط جریان واقعی لحاظ شود. شبیه‌سازی جریان کسکید در ماخ ورودی ۰/۶۷ و زاویه ورودی^{۱۳} ۱۳۲ درجه انجام شد، سپس تحلیل رفتار جریان در زوایای برخورد^{۱۴} مثبت و منفی (بازه بین ۴- تا ۴+) برای محدوده عملیاتی متفاوت لحاظ شد. شماتیکی از پارامترهای بیان شده در جدول ۱ و در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی کسکید

عدد ماخ ورودی	۰/۶۷
زاویه ورودی جریان (β_1)	۱۳۲ درجه
طول وتر پره	۴۰ میلی‌متر
طول اسپن پره	۴۰ میلی‌متر
ضخامت لایه‌مرزی کامل	۴ میلی‌متر
زاویه Stagger (β_s)	۱۱۲/۵ درجه
نسبت گام پره به طول وتر آن	۰/۵۵

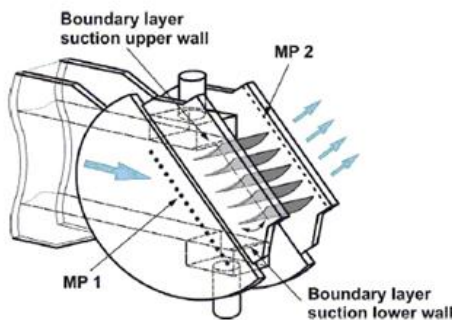


شکل ۷- شماتیکی از کسکید و پارامترهای آن

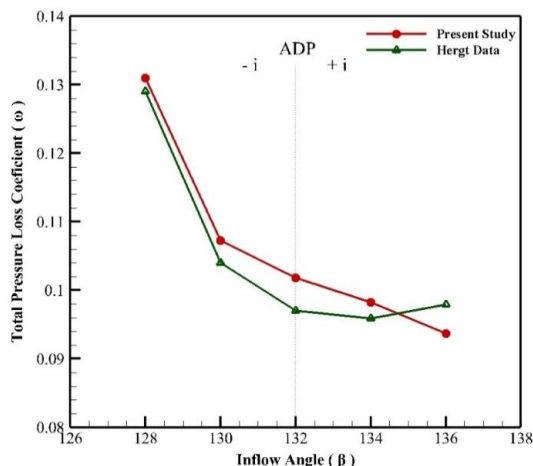
شبیه‌سازی جریان در عدد رینولدز ۵۶۰۰۰۰ و ماخ ورودی ۰/۶۷، طبق مقاله تجربی و عددی هرگت و همکاران [۱۸] انجام شده است. در این تحقیق، افت‌های ناشی از جریان ثانویه به‌خصوص جدایش گوشه در یک کسکید کمپرسور خطی سرعت‌بالا تحت بارگذاری بالا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه حاضر با نتایج افت فشار کل و فشار استاتیک پژوهش دانشمندان تونل باد DLR برلین [۱۸] مورد مقایسه قرار گرفت. شماتیکی از محفظه تست تونل باد مرجع [۱۸] و نحوه قرارگیری کسکید کمپرسور و پوسته آن در شکل ۸ نشان داده شده است. MP1 و MP2، به ترتیب مکان‌های اندازه‌گیری فشار استاتیک، فشار کل و دمای کل جریان‌های ورودی و خروجی از کسکید می‌باشند. MP2، در موقعیت ۴۰٪ طول وتر

در پایین دست لبه فرار کسکید قرار دارد. نتایج مربوط به ضریب افت فشار کل و ضریب افزایش فشار استاتیک کسکید کمپرسور بر حسب زاویه جریان ورودی، در شرایط بدون استفاده از عملگر پلازما به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ ارائه شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۸] مقایسه شده است. شکل ۹، مربوط به اعتبارسنجی افت فشار کل در کسکید کمپرسور سرعت‌بالا بر حسب زاویه جریان ورودی می‌باشد. نتایج افت فشار کل مربوط به اختلاف فشار کل (سکون) در صفحه ورودی و صفحه‌ای در ۴۰٪ طول وتر در پایین دست لبه فرار پره نسبت به اختلاف فشار کل و فشار استاتیک صفحه ورودی در نظر گرفته شده است. میزان فشار سکون اندازه‌گیری شده در ۴۰ درصد طول وتر به صورت میانگین مقادیر فشار هر ۵ پره در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج ضریب افت فشار کل در شکل ۹، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد.

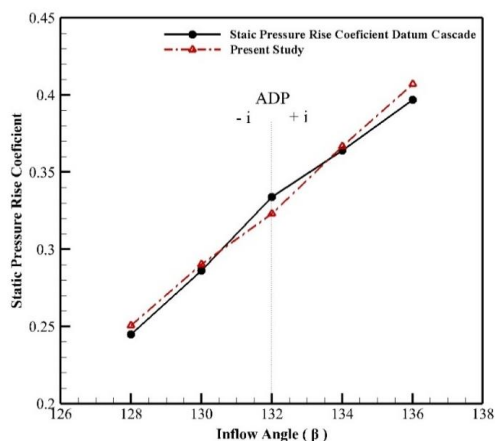
در شکل ۱۰، ضریب افزایش فشار استاتیک، بر حسب زاویه جریان ورودی در یک کسکید کمپرسور محوری مشاهده می‌شود. قابل توجه است که جریان ورودی به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی جریان ورودی، در صفحه ورودی با ۴ میلی‌متر ضخامت لایه‌مرزی وارد شده است. دلیل این امر قرارگیری پنج لوله‌ی پیتوت پشت هر پنج پره و خواندن نتایج در پنج ارتفاع مختلف از ارتفاع کسکید در کار تجربی می‌باشد. نتایج ضریب افزایش فشار استاتیک در شکل ۱۰، انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی و عددی دارد. تنها در جریان ورودی بالا در زاویه برخورد $i=+4$ از نمودار نتایج هرگت تبعیت نمی‌کند، اما اختلاف نتایج زیر ۵ درصد می‌باشد. دلیل این اختلاف، احتمالاً به دلیل وجود افزایش گردابه‌ها روی سطح مکش پره می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، با افزایش زاویه ورودی جریان، ضریب افزایش فشار استاتیک بیشتر می‌شود.



شکل ۸- شماتیکی از محفظه تست تونل باد مرجع [۱۸]



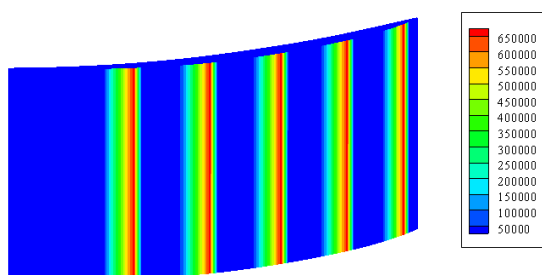
شکل ۹- مقایسه نتایج ضریب افت فشار کل با نتایج مرجع [۱۸]



شکل ۱۰- مقایسه ضریب افزایش فشار استاتیک در مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۱۸]

ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بحث و بررسی آن‌ها با اضافه کردن عملگرهای پلاسمای DBD با ولتاژ ۹KV و فرکانس ۱۵KHz، بیشینه نیروی اعمال شده توسط ناحیه پلاسمای حدوداً $\frac{N}{m^3}$ ۷۰۰۰۰۰ می‌باشد. ابتدا عملگرهای پلاسمای DBD روی سطح مکش پره‌ها قرار داده شد. به طوری که پنج عملگر پلاسمای روی سطح مکش هر پره به فاصله ۶ میلی‌متر از هم قرار داده شده است. شماتیکی قرار گرفتن عملگرهای پلاسمای روی پره در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سپس ۵ ورقه عملگر پلاسمای DBD روی سطح پوسته قرار داده شد، که مجموعاً ۲۵ عدد ورقه پلاسمای به صورت سرتاسری در ارتفاع پره به روش پدیدارشناسی شایبی شبیه‌سازی شده است. شکل ۱۱، نحوه توزیع نیروی عملگر پلاسمای با توجه به ولتاژ ۹KV و فرکانس

Suction surface Plasma Actuation DBD

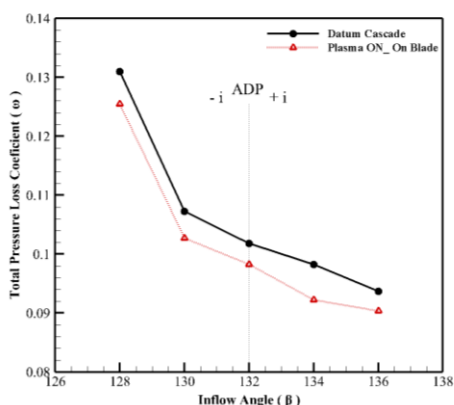


شکل ۱۱- شماتیکی از قرارگیری عملگر پلاسمای روی سطح پره بر حسب توزیع نیروی توسط عملگر پلاسمای

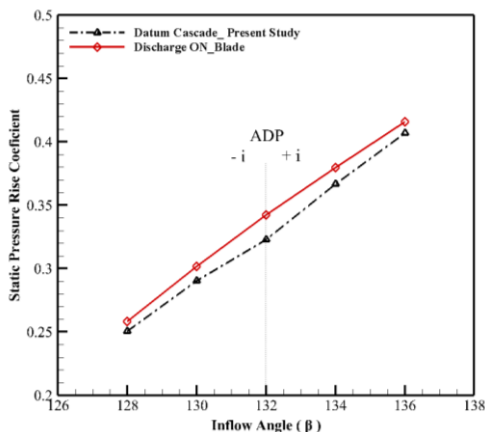
حالت دوم قرارگیری عملگرهای پلاسمای DBD روی پوسته کسکید می‌باشد. شماتیکی قرارگیری عملگر پلاسمای روی پوسته در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی عملگرهای پلاسمای روی پوسته سعی شده که ورقه‌ها در امتداد عملگرهای پلاسمای در تقاطع پره با پوسته لحاظ شود. تعداد عملگرهای پلاسمای در بین هر دو پره ۵ عدد می‌باشد که در مجموع ۳۰ عدد عملگر پلاسمای روی پوسته قرار گرفته است. عملگرها در جهت محور ماشین در نظر گرفته شده‌اند. بیشینه نیروی اعمالی در این حالت نیز حدوداً $\frac{N}{m^3}$ ۷۰۰۰۰۰ می‌باشد.

در حالت سوم، از هر دو مکان به طور هم‌زمان استفاده شده است و تأثیرات قرارگیری عملگرهای پلاسمای روی پره و پوسته، به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است؛ که در ادامه در مورد آن بحث خواهد شد. نتایج ضریب افت فشار کل و ضریب افزایش فشار استاتیک کسکید بدون استفاده از عملگر پلاسمای DBD با نتایج استفاده از عملگرهای پلاسمای در سه حالت قرارگیری در کسکید مورد مقایسه قرار گرفت؛ که در ادامه به تحلیل آن پرداخته خواهد شد.

عملگرهای پلاسمای DBD روی سطح مکش پره قرار دارد، در زاویه برخورد صفر درجه اتفاق می‌افتد. نسبت افزایش فشار استاتیک در این زاویه حدوداً ۸٪ درصد می‌باشد؛ که مانند ضریب افت فشار کل با افزایش زاویه برخورد مثبت و منفی، شیب بالا رفتن مقدار ضریب افزایش فشار استاتیک کاهش می‌یابد.



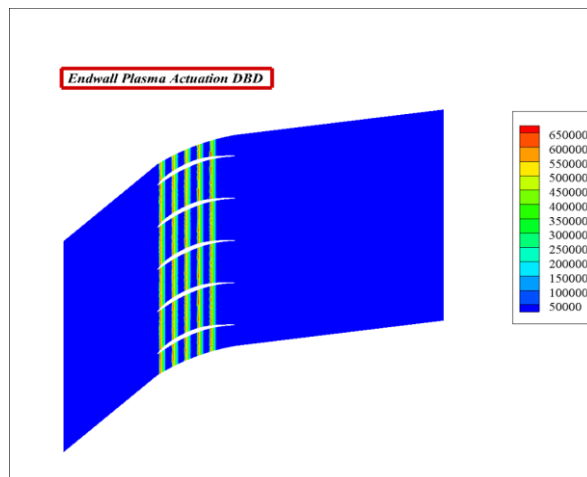
شکل ۱۲- مقایسه نتایج ضریب افت فشار کل بدون عملگر پلازما و با استفاده از عملگرهای پلازما روی سطح مکش پره



شکل ۱۳- مقایسه ضریب افزایش فشار استاتیک بدون استفاده از عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلازما روی سطح مکش پره

استفاده از عملگر پلازما بر روی سطح پوسته کسکید

شکل‌های ۱۵ و ۱۶، به ترتیب مقایسه بین ضریب افت فشار کل و ضریب افزایش فشار استاتیک با استفاده از عملگرهای پلازما روی سطح پوسته و بدون استفاده از عملگر پلازما بر حسب زاویه ورود جریان را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۵، در صورت استفاده از عملگر پلازما بر روی پوسته، ضریب افت فشار کل کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش زاویه ورودی، ضریب افت فشار کل کاهش یافته است. بیشترین میزان بهبود ضریب افت فشار کل برای زاویه ورود ۱۲۸ درجه، معادل زاویه

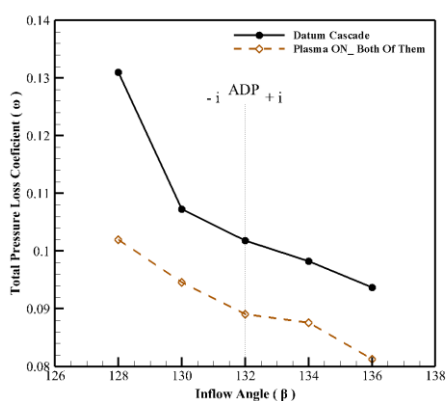


شکل ۱۴- شماتیک قرارگیری عملگر پلاسمای DBD روی سطح پوسته بر حسب توزیع نیرو توسط عملگر پلازما

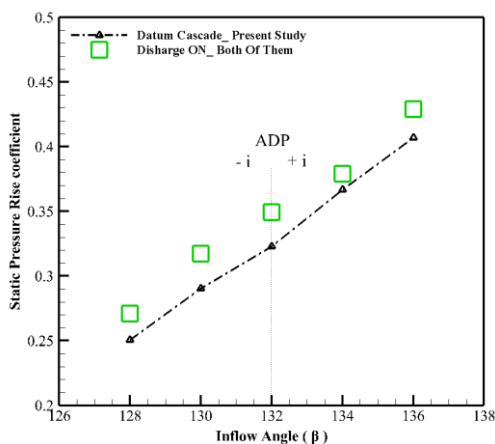
استفاده از عملگر پلازما بر روی سطح مکش پره

شکل ۱۳، بیانگر تغییرات ضریب افت فشار کل روی سطح مکش پره نسبت به حالت بدون استفاده از عملگر پلازما است. طبق شکل ۱۳، با قراردادن عملگر پلاسمای DBD روی سطح مکش پره، بیشینه بهبود ضریب افت فشار کل حدوداً ۶/۵ درصد در زاویه برخورد ۲ درجه می‌باشد. با افزایش زاویه برخورد، میزان جدایش جریان در گوشه افزایش پیدا می‌کند، همچنین قدرت عملگر پلازما روی سطح مکش پره کاهش می‌یابد. به همین دلیل در زاویه برخورد ۴ درجه، ضریب افت فشار کل، ۳/۵ درصد بهبود یافته است. پس توانایی عملگر پلازما در حالت قرارگیری روی پره با افزایش زاویه برخورد کاهش می‌یابد. از آنجایی که محدوده عملکردی عملگر پلازما محدود به نواحی نزدیک به دیواره جسم می‌باشد، به این دلیل منجر به ناکارآمدی عملگر پلاسمای DBD روی سطح مکش و کاهش کمتر افت فشار کل در صورت بزرگ بودن ناحیه جدایش گوشه می‌شود. با کاهش زاویه برخورد، قدرت جدایش گوشه در کسکید کمپرسورهای محوری سرعت بالا کاهش می‌یابد. هرچه زاویه برخورد منفی، بزرگ شود به این معنی که جدایش روی سطح فشار پره بیشتر می‌شود و همین‌طور افت فشار کل نیز بیشتر می‌شود. در این حالت نیز تأثیرات عملگر پلازما روی سطح مکش پره، با افزایش زاویه برخورد منفی، کاهش می‌یابد. ضریب افت فشار کل در زاویه برخورد منفی ۴ درجه، حدوداً ۴٪ می‌باشد. طبق شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که بیشترین افزایش ضریب افزایش فشار استاتیک برای حالتی که

و هم‌روی پوسته کسکید کمپرسور محوری سرعت‌بالا را نشان می‌دهد. بیشینه بهبود ضریب افت فشار کل در زاویه برخورد ۴- درجه می‌باشد. درصد تغییرات ناشی از عملگر پلازما در این زاویه، در حدود ۲۰٪ درصد می‌باشد. در شکل ۱۸، ضریب افزایش فشار استاتیک بدون استفاده از عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلاسمای هم‌روی سطح پره و هم‌روی پوسته کسکید را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، در صورت قرارگیری عملگرهای پلازما بر روی پوسته و پره، میزان ضریب افزایش فشار استاتیک نیز افزایش می‌یابد. طبق شکل-های ۱۷ و ۱۸، با افزایش زاویه ورودی، در هر دو حالت با و بدون عملگر پلازما، ضریب افت فشار کل، کاهش یافته و ضریب افزایش فشار استاتیک نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۷-مقایسه ضریب افت فشار کل بدون عملگر پلازما و با استفاده همزمان از عملگر پلازما روی پوسته و سطح مکش پره

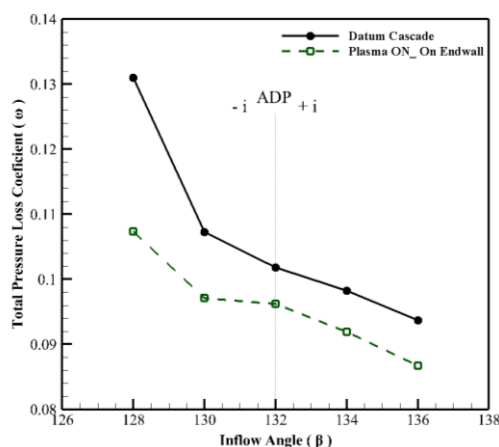


شکل ۱۸-مقایسه ضریب افزایش فشار استاتیک بدون عملگر پلازما و با استفاده همزمان از عملگر پلازما روی پوسته و سطح مکش پره

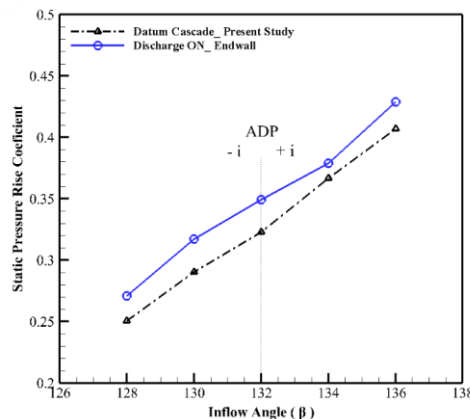
بحث و بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

میزان تأثیر نحوه قرارگیری عملگرهای پلازما روی ضریب افت فشار کل در زوایای ورودی مختلف بر یک کسکید

برخورد منفی چهار درجه، حدوداً ۱۷ درصد می‌باشد. زمانی که عملگر پلازما روی سطح پوسته نصب شده است، با افزایش زاویه برخورد مثبت و منفی، تأثیرگذاری عملگر افزایش پیدا می‌کند؛ اما تأثیرگذاری عملگر پلازما در زوایای برخورد مثبت کمتر از زوایای برخورد منفی است. طبق شکل ۱۶، ضریب افزایش فشار استاتیک، با افزایش زاویه ورودی جریان، برای هر دو حالت با و بدون عملگر پلازما کاهش می‌یابد. بیشترین میزان تأثیرگذاری قرارگیری عملگر پلازما بر روی پوسته در ضریب افزایش فشار استاتیک، در زاویه برخورد صفر درجه معادل زاویه ورودی جریان، ۱۲۸ درجه رخ می‌دهد.



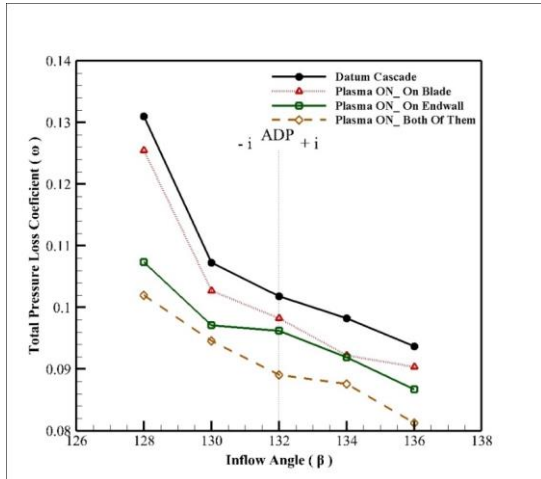
شکل ۱۵-مقایسه بین ضریب افت فشار کل بدون استفاده از عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلاسمای پوسته



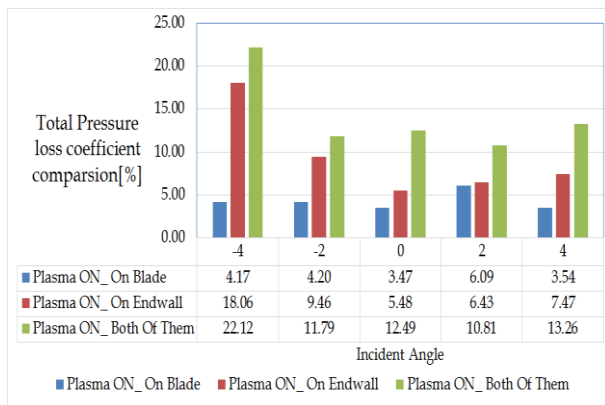
شکل ۱۶-مقایسه بین ضریب افزایش فشار استاتیک بدون استفاده از عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلاسمای پوسته

استفاده از عملگر پلازما بر روی پوسته و سطح مکش پره به صورت همزمان

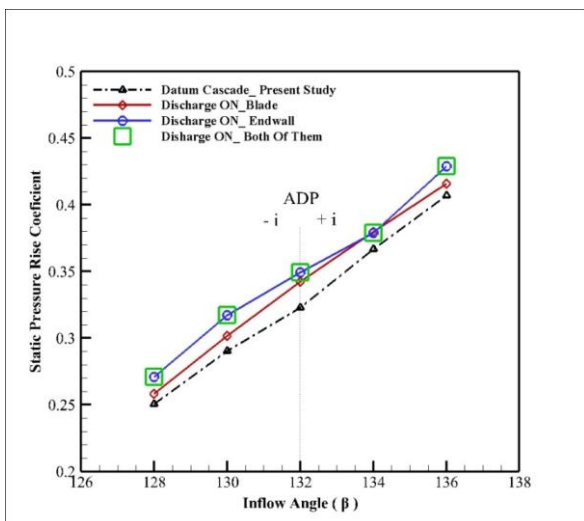
شکل ۱۷، مقایسه ضریب افت فشار کل بدون استفاده از عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلاسمای هم‌روی سطح پره



شکل ۱۹-مقایسه نتایج ضریب افت فشار کل در زوایای ورودی مختلف با و بدون استفاده از عملگر پلاسما در مکان‌های مختلف



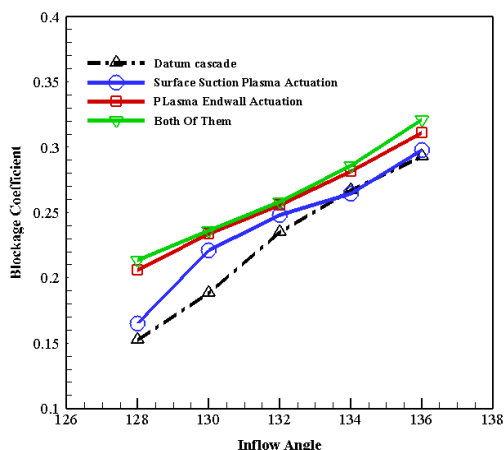
شکل ۲۰-مقایسه نتایج ضریب افت فشار کل در زوایای برخورد مختلف در کسکید با قرارگیری عملگر پلاسما در مکان‌های مختلف



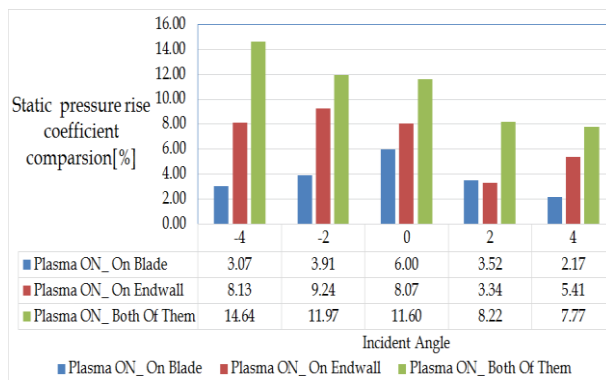
شکل ۲۱-مقایسه نتایج ضریب افزایش فشار استاتیک در زوایای ورودی مختلف با و بدون عملگر پلاسما در مکان‌های مختلف

کمپرسور محوری در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۹، ضریب افت فشار کل با قرارگیری همزمان عملگرهای پلاسما روی پره و پوسته، بیشینه تاثیر را بر کاهش افت فشار کل، در مقایسه باحالت‌های قرارگیری عملگر پلاسما به‌طور جداگانه دارد، همچنین نشان می‌دهد که قرارگیری عملگرهای پلاسما روی پوسته، نسبت به قرارگیری عملگر پلاسما روی پره، ضریب افت فشار کل را کمتر کرده و تاثیر بیشتری بر کنترل جدایش جریان دارد. در شکل ۲۰، مقایسه نتایج درصد بهبود ضریب افت فشار کل در زوایای برخورد مختلف، با قرارگیری عملگر پلاسما در مکان‌های مختلف اشاره شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب افت فشار کل با استفاده از عملگر پلاسما بر روی پوسته با افزایش زاویه برخورد مثبت و منفی نسبت به استفاده از عملگر پلاسما روی پره، بهبود بیشتری داشته است. اما، به‌طور کلی می‌توان گفت که استفاده از عملگرهای پلاسما بر هر دو موقعیت پوسته و روی پره، تاثیر بیشتری بر کاهش ضریب افت فشار دارد و در نهایت می‌توان نتیجه گرفت، که تاثیرگذاری استفاده از عملگر پلاسما با افزایش زاویه برخورد، افزایش می‌یابد.

در شکل ۲۱، ضریب افزایش فشار استاتیک برای هر سه حالت استفاده از عملگر پلاسما نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب افزایش فشار استاتیک با قرارگیری عملگرهای پلاسما روی سطح پوسته نسبت به قرارگیری روی سطح پره افزایش بیشتری یافته است؛ همچنین بیشترین میزان ضریب افزایش فشار مربوط به قرارگیری عملگرهای پلاسما در هر دو مکان می‌باشد. در شکل ۲۲، درصد افزایش ضریب فشار استاتیک با قرارگیری عملگر پلاسما در مکان‌های مختلف برحسب زاویه برخورد نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه برخورد منفی و یا مثبت، میزان تاثیرگذاری عملگر پلاسما بر درصد افزایش ضریب فشار استاتیک افزایش می‌یابد. همچنین، در زاویه برخورد منفی، میزان تاثیرگذاری عملگر پلاسما بر کنترل جدایش جریان نسبت به زاویه برخورد مثبت بیشتر است.

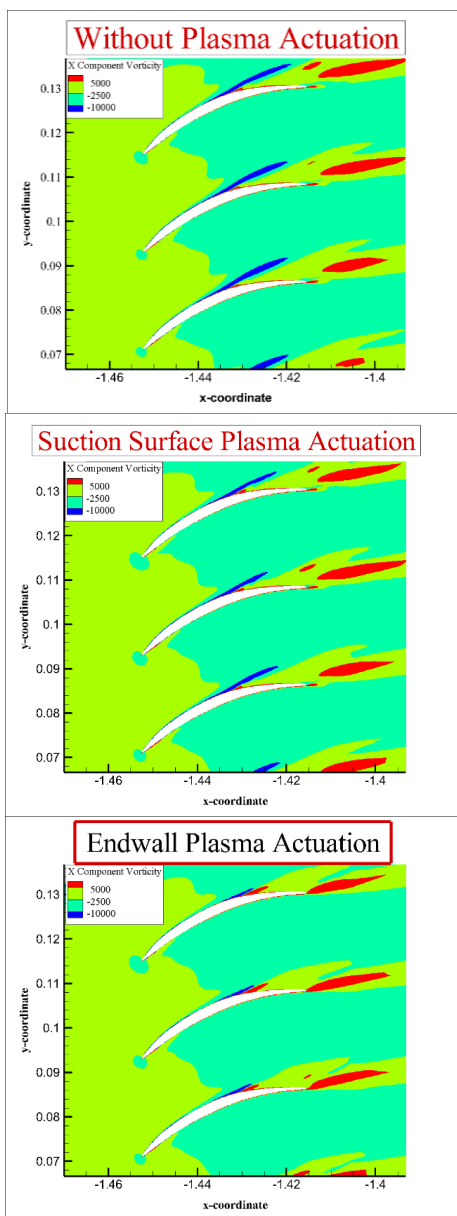


شکل ۲۲- مقایسه نتایج ضریب انسداد جریان در حالت بدون عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلازما در مکان های مختلف



شکل ۲۳-مقایسه نتایج درصد افزایش ضریب فشار استاتیک در زوایای برخورد مختلف با قرارگیری عملگر پلازما در مکان های مختلف

همان طور که مشاهده می شود، عملگر پلازما باعث بهبود ضریب افت فشار سکون و همین طور بالا رفتن ضریب افزایش فشار استاتیک در کسکید شده است. پارامتر مهم در یک کسکید، ضریب افت فشار است. بالا رفتن ضریب افزایش فشار استاتیک در یک کسکید محوری مهم است، ولی تا حدی که باعث انسداد جریان نشود، به همین علت در شکل ۲۳، به مقایسه ضریب انسداد^{۱۵} بدون استفاده از عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلازما در سه موقعیت مختلف بر حسب زوایای ورودی مختلف جریان به کسکید پرداخته شده است. طبق شکل ۲۳، ضریب انسداد جریان در صورت استفاده از عملگر پلاسمای بر روی سطح پوسته نسبت به استفاده از عملگر پلاسمای بر روی سطح مکش افزایش بیشتری داشته است. همین طور، استفاده از عملگرها بر روی هر دو سطح نسبت به استفاده از عملگر پلاسمای بر روی پوسته تغییر چندانی در ضریب انسداد جریان نداشته است. اما استفاده از عملگر پلازما، تاثیری بر انسداد جریان نداشته است. در انتها، به عنوان نمونه، به مقایسه کانتورهای ورتیسیتی برای حالت های مختلف عملگر پلازما پرداخته شده است. شکل ۲۴، مقایسه کانتور ورتیسیتی برای زاویه برخورد ۴- درجه در مقطع ۱۰٪ از ارتفاع ریشه پره در حالت بدون استفاده از عملگر پلازما و با استفاده از عملگر پلازما در سه موقعیت قرارگیری را نشان می دهد. طبق شکل ۲۴، استفاده از عملگر پلاسمای سطح پوسته در کاهش قدرت گردابه گوشه و همچنین گردابه رهایی از لبه فرار موثرتر از استفاده از عملگر پلاسمای سطح مکش پره می باشد. در نهایت، استفاده همزمان از عملگر پلاسمای بر سطح پوسته و بر سطح مکش پره تا حدی گردابه های رهایی از لبه فرار را کاهش داده است و همچنین توانسته قدرت گردابه گوشه را کاهش دهد.



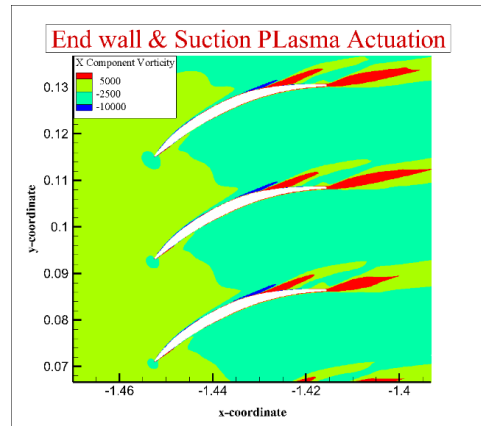
برخورد منفی، استفاده از عملگر پلاسما بر سطح پوسته در کنترل جدایش جریان گوشه، همچنین جریان عبوری از سطح فشار پره در زاویه برخورد منفی به سمت سطح مکش مؤثرتر است. استفاده از عملگر پلاسما بر سطح پوسته نسبت به استفاده از عملگر پلاسما بر سطح مکش تأثیر بیشتری در بهبود ضریب افت فشار کل دارد که نشان می‌دهد نوع جریان عبوری در افزایش افت بسیار مؤثر است. در صورت استفاده عملگرهای پلاسما به طور همزمان بر روی پره و پوسته در زاویه برخورد صفر و منفی ۴ درجه می‌تواند به ترتیب، منجر به کاهش ۱۲/۵ درصدی و ۲۲ درصدی ضریب افت فشار کل شود.

افزایش فشار استاتیک با استفاده از عملگر پلاسما بر سطح پوسته نسبت به عملگر پلاسما بر سطح مکش افزایش یافته است. ضریب افزایش فشار استاتیک در هنگام استفاده از عملگرهای پلاسما به‌طور همزمان نتوانسته تغییری نسبت به افزایش فشار استاتیک در استفاده از عملگر پلاسما بر سطح پوسته ایجاد کند. ضریب انسداد جریان در حالت استفاده از عملگر پلاسما بر سطح پوسته نسبت به قرارگیری عملگر پلاسما روی سطح مکش پره افزایش یافته است؛ که نشان می‌دهد بارگذاری روی پره یا همان فشار استاتیک نسبت به حالت بدون استفاده از عملگر پلاسما افزایش یافته است؛ اما ضریب انسداد جریان در صورت استفاده از عملگر پلاسما بر سطح مکش پره و بر سطح پوسته به‌طور همزمان تغییراتی نسبت استفاده از عملگر پلاسما پوسته نداشته است.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Stall margin
- ۲ Dielectric Barrier Discharge
- ۳ Steady jet
- ۴ Unsteady synthetic jet
- ۵ Streamline pattern
- ۶ Loss coefficient
- ۷ Vortex structure
- ۸ Pitch-wise
- ۹ Area Weighted Average
- ۱۰ Mid-Span
- ۱۱ Aerodynamic Design Point
- ۱۲ Aspect Ratio
- ۱۳ Inflow Angle
- ۱۴ Incidence Angle
- ۱۵ Blockage Coefficient

منابع و مراجع



شکل ۲۴- مقایسه کانتور ورتیسیت برای زاویه برخورد ۴- درجه در مقطع ۱۰٪ از ارتفاع ریشه پره در حالت با و بدون عملگر پلاسما

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از عملگر پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک به‌عنوان یک ابزار کنترل جریان فعال در یک کسکید کمپرسور محوری سرعت‌بالا استفاده شده است. سه مکان برای استفاده از عملگر پلاسما بر سطح دیواره، بر سطح مکش پره و استفاده هم‌زمان از عملگرهای پلاسما در هر دو مکان به‌منظور کنترل جدایش جریان روی پره استاتور کمپرسور محوری انتخاب شد. جهت شبیه‌سازی عملگر پلاسما، از روش پدیدارشناسی شایبی استفاده شد و معادلات به صورت پایا، سه‌بعدی، تراکم‌پذیر و مغشوش در نظر گرفته شد. از مدل اغتشاشی $k-\omega$ SST برای شبیه‌سازی جریان مغشوش استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، در زوایای برخورد مثبت به دلیل آن‌که جدایش روی سطح مکش افزایش می‌یابد، قدرت گردابه گوشه افزایش می‌یابد. جریان عبوری از روی سطح فشار پره به سمت سطح مکش پره مجاور به علت گرادیان فشار بین دو سطح پره‌های مجاور حرکت می‌کند. با حرکت جریان عبوری و ادغام آن با جریان جدا شده از سطح مکش پره، جدایش جریان سه‌بعدی به نام جدایش گوشه رخ می‌دهد. این جدایش تأثیر بسیار زیادی روی افزایش افت فشار کل در کمپرسور محوری دارد. در گذرگاه بین دو پره، گردابه‌هایی که در بین گذرگاه وجود دارد به گردابه‌های گذرگاه یا گردابه پاساژ نامیده می‌شوند. تمامی این گردابه‌ها در افزایش افت فشار کل تأثیرگذارند. مطابق نتایج، استفاده از عملگر پلاسما بر سطح مکش در زوایای برخورد مثبت و همچنین در زاویه برخورد نقطه‌ای طراحی نسبت به قرارگیری دو نوع دیگر از عملگرهای پلاسما روی ناحیه جدایش گوشه مؤثرتر است. در زوایای

- by plasma aerodynamic actuation”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol.25, pp. 349-360, 2012.
- [11] E. Akcayoz, H. D. Vo and A. Mahallati, “Controlling corner stall separation with plasma actuators in a compressor cascade,” *Journal of Turbomachinery*, vol. 138, no.8, pp.1-13, 2016.
- [12] A. Kadivar, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, “Numerical investigation of flow separation control in an axial compressor cascade by plasma actuation”, *Journal of Fluid Mechanics and Heat Transfer*, vol. 20, no.4, pp. 182-209, 2019.
- [13] A. Kadivar, N. Aminifard, H. Mohaddes Deylami and F. Dolati, “Flow separation control in an axial compressor cascade using various arrangement of plasma actuator”, *Journal of Electrostatics*, vol. 112, no. 103580, pp.1-12, 2021.
- [14] B. Jayaraman, W. Shyy, S. Thakur, “Modeling of dielectric barrier discharge and resulting fluid dynamics”, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA, pp. 2006-686, 2006.
- [15] D. Gaitonde, M. Visbal and S. Roy, “Control of flow past a wing section with plasma-based body forces,” *36th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference*, AIAA, pp. 2005-5302, 2005.
- [16] B. Jayaraman, W. Shyy, “Flow control and thermal management using dielectric glow discharge concepts”, *33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, AIAA pp. 2003-3712, 2003.
- [17] R. Khoshkhoo, A. Jahangirian, “Numerical simulation of flow separation control using multiple DBD plasma actuators,” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 9, no. 4, pp.1865-1875, 2016.
- [18] A. Hergt, R. Meyer, K. Liesner, E. Nicke, “A new approach for compressor endwall contouring,” *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2011.
- [1] R. Aungier and I. Cassin, “Axial-flow compressors: A Strategy for aerodynamic design and analysis”, *Applied Mechanic Review Journal*, vol. 54, no. 4, pp. 1-22, 2003.
- [2] V. Zander, M. Hecklau and W. Nitsche, “Active flow control by means of synthetic jets on a highly loaded compressor cascade”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 225, no.7, pp.897-908, 2011.
- [3] B. Dong, J. Bauchire, J. Pouvesle, P. Magnire, and D. Hong, “Experimental study of A DBD surface discharge for the active control of subsonic airflow”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41, no. 15, 2008.
- [4] Y. Li, Y. Wu, M. Zhau and C. Su, “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.
- [5] M. G. De Giorgi, S. Traficante, C. Luca, D. Bello, A. Ficarella, “Active flow control techniques on a stator compressor cascade: a comparison between synthetic jet and plasma actuators,” *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.48, pp.1015-1023, 2012.
- [6] S. Lemire and H. Vo, “Reduction of fan and compressor wake defect using plasma actuation for tonal noise reduction,” *Journal of Turbomachinery*, vol. 133, no. 1, pp.1-17, 2011.
- [7] S. Lemire, H. Vo, and M. W. Benner, “Performance improvement of axial compressors and fans with plasma actuation”, *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2009, pp-1-13, 2009.
- [8] Y. Wu, X. Zhao, Y. Li and J. Li, Corner “Separation control in a highly loaded compressor cascade using plasma aerodynamic actuation”, *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, NO. GT2012-69196, pp. 323-332, 2012.
- [9] X. Zhao, Y. Wu, Y. Li, X. Wag and Q. Zhao, “Topological analysis of plasma flow control on corner separation in a highly loaded compressor cascade,” *Acta Mechanica Sinica*, vol. 28, no. 5, 2012.
- [10] Z. Xiaohu, Y. Li, Y. Wu and T. Zhu, “Numerical investigation of flow separation control on a highly loaded compressor cascade