

مطالعه عددی تاثیر عملگرهای پلاسمایی در کنترل جریان نشتی نوک در یک روتور کمپرسور محوری سرعت پایین

علی خوش نژاد*

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
a.khoshnejad@email.kntu.ac.ir

رضا ابراهیمی

استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
rebrahimi@kntu.ac.ir

غلامحسین پور یوسفی

استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
pouryoussefi@kntu.ac.ir

علیرضا دوست محمودی

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
doostmahmoudi@alborz.kntu.ac.ir

چکیده

جریان نشتی نوک در کمپرسورهای محوری از جمله عوامل گسترش ناپایداری‌ها و افت در میدان جریان است. لذا شناخت این پدیده و به کارگیری روش‌های کنترل آن بسیار ضروری است. بررسی کنترل جریان درز نوک در یک کمپرسور محوری سرعت پایین با به کارگیری عملگرهای پلاسمایی با کمک شبیه‌سازی عددی موضوع مقاله حاضر است. بدین منظور با پیاده‌سازی مدل خطی توزیع نیروی حجمی و تعبیه آن بر روی پوسته و در بالادست روتور، اثرات عملگرهای پلاسمایی بر کنترل جریان درز نوک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد عملگرهای پلاسمایی با تزریق مومنتوم به ناحیه جریان درز نوک، علاوه بر اینکه موجب کوچک‌تر شدن گردابه‌های جریان درز نوک شده، منجر به کاهش افت‌های ناشی از گردابه‌های شکل گرفته در این ناحیه می‌شود. همچنین، استفاده از این عملگرهای پلاسمایی در حدود ۵/۲ درصد بهبود در حاشیه واماندگی در کمپرسور مورد مطالعه را در پی داشته است.

واژه‌های کلیدی: کمپرسور محوری، عملگر پلاسمایی، کنترل فعال، جریان درز نوک، واماندگی.

Numerical Simulation of Plasma Actuator Effect on Control of Tip Leakage Vortex in Low Speed Axial Compressor Rotor

A. Khoshnejad

Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

R. Ebrahimi

Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Gh. H. Pouryoussefi

Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

A. R. Doostmahmoudi

Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Tip Leakage vortex in axial compressor is source of unsteadiness and loss in flow field, so it is very important to investigate its controlling method. The aim of this article is numerical simulation of plasma actuator effect on tip leakage vortex in low speed axial compressor rotor. By applying linear distribution of body force at upstream of rotor on casing, effects of plasma actuator on tip leakage vortex have been investigated. Numerical simulation confirm that plasma actuator at blade tip region boost the flow momentum and in addition to decreasing the size of tip leakage vortex and reduces blockage due to the flow separation from blade surface, leads to decreasing loss in tip region. In addition, Plasma actuator can eliminate leading edge spillage and Trailing edge backflow in tip clearance region. Furthermore, the results show that plasma actuator caused the stall margin of the rotor blade row to increase by 5.2%.

Keywords: Axial Compressor, Plasma Actuator, Active Flow Control, Tip Leakage Vortex, Stall.

۱- مقدمه

و مکش پره، سبب ایجاد جریان سیال از سمت فشار به سمت مکش می‌شود. به این جریان به وجود آمده، جریان نشتی نوک گفته می‌شود. جریان نشتی نوک، رفتار آیرودینامیکی جریان اصلی را در ناحیه نوک پره متأثر ساخته و تاثیر به‌سزایی بر قابلیت افزایش فشار، بازدهی کمپرسور و پایداری آن دارد. جریان درز نوک، منجر به ایجاد افت می‌شود و نهایتاً بازدهی کمپرسور کاهش می‌یابد. جریان درز نوک منجر به تاثیرات نامطلوب دیگری نظیر، ایجاد نویز و نیز تولید و گسترش ناپایداری‌ها در جریان (از جمله استال یا واماندگی دورانی و سرچ) می‌گردد. کنترل جریان درز نوک و متعاقب آن اثرات منتج از این

کمپرسورهای جریان محوری یکی از قسمت‌های مهم موتورهای هوایی هستند. رخداد ناپایداری‌های آیرودینامیکی در کمپرسور موجب کاهش کارایی موتور می‌شود و ناحیه عملکرد پایدار آن را محدود می‌سازند. در واقع به دلیل این ناپایداری‌ها، کمپرسور می‌بایست دور از نقطه حداکثر بازدهی کار کند که منجر به افت بازده موتور می‌شود. از جمله ناپایداری‌های آیرودینامیکی کمپرسورهای جریان محوری را می‌توان واماندگی دورانی و سرچ نام برد [۱].

در پره کمپرسورهای جریان محوری، اختلاف فشار بین سطح فشار

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.khoshnejad@email.kntu.ac.ir

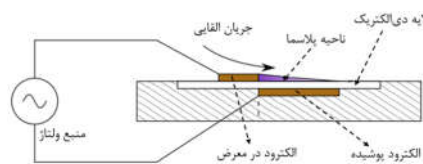
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۹/۱۰

جریان جهت دستیابی به کارایی بهتر، قابلیت اطمینان بالاتر، عمر بیشتر و عملکرد بهتر ضروری است [۲].

به طور کلی روش‌های کنترل جریان درز نوک در کمپرسورها را می‌توان در قالب انواع فعال و غیر فعال دسته بندی نمود. از جمله روش‌های غیر فعال متداول، روش اصلاح پوسته^۱ است [۳، ۴]. از جمله روش‌های کنترل فعال نیز می‌توان به روش‌های تزریق هوا در نوک ردیف پره و استفاده از عملگرهای پلاسمایی اشاره نمود. روش تزریق هوا در نوک ردیف پره نیازمند منبع تأمین هوای فشرده، لوله‌ها یا مجراها، شیرها و نازل‌ها است. این تجهیزات، زیرسیستم‌هایی را به موتور و پوسته آن اضافه می‌کنند. اضافه شدن این پیچیدگی‌ها و وزن بیشتر معایب اصلی سیستم تزریق است [۵].

روش کنترل فعال جریان استفاده از عملگرهای پلاسمایی روش جدید و نوین در حوزه توربومشین است. در این روش، تخلیه پلاσμα عاملی است که میزان مومنتوم ذرات را در مناطق مورد نیاز افزایش می‌دهد. این محرک‌ها مولکول‌های هوا را یونیزه کرده و در طی فرایند برخورد ذرات باردار در حال حرکت، با ذرات خنثی هوا یک مومنتوم محلی یا القایی به جریان اضافه می‌کنند و باعث تولید یک جریان القایی در سیال می‌شوند. این تحریک کننده‌ها، از دو یا چند الکترود تشکیل شده‌اند که توسط یک مادی دی‌الکتریک از هم جدا می‌شوند و توسط یک منبع الکتریکی ولتاژ قوی مستقیم (DC) یا منبع ولتاژ متناوب (AC) تحریک می‌گردند. این تحریک کننده از طریق یونیزه نمودن هوا و در نتیجه تولید پلاسمای سرد^۲، باعث اعمال یک نیروی حجمی القایی به میدان سیال اطراف خود می‌شوند [۶]. طرح‌واره عملگر پلاسمایی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- طرح‌واره عملگر پلاسمایی [۷].

طی سالیان گذشته، استفاده از محرک‌های پلاسمایی جهت اصلاح نمودن مشخصه‌های آیرودینامیکی، بسیار مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته است. دلیل این امر مزایای فراوان این محرک‌ها می‌باشد. از جمله مزایای این محرک‌ها را می‌توان به سهولت و سادگی کارکرد، قابلیت اطمینان بالا، ارزان و مقرون به صرفه بودن، کم حجم و سبک بودن، عدم وجود قسمت متحرک، پاسخ زمانی بالا و ... اشاره نمود [۶]. استفاده از عملگرها پلاسمایی به منظور کنترل جریان درز نوک یکی از روش‌های نوین در حوزه بهبود عملکرد کمپرسورها و فن‌های محوری می‌باشد [۸]. بررسی منابع در حوزه استفاده از عملگرهای پلاσμα نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات موجود در زمینه عملگرهای پلاسمایی DBD، مربوط به کنترل جریان در حوزه آیرودینامیک خارجی است [۹-۱۱] و مطالعات در حوزه کاربرد عملگرهای پلاσμα در حوزه توربومشین‌ها به خصوص ردیف پره دوار بسیار محدود است [۸].

با مرور مطالعات مختلف به نظر می‌رسد وو و همکاران از جمله پیشگازان ارائه مفهوم استفاده و نصب عملگر پلاσμα بر روی پوسته و در بالا دست لبه حمله روتور به منظور سرعت بخشیدن به لایه نازک جریان ورودی و اصلاح جریان نشتی نوک و تاخیر در رخداد واماندگی دورانی را بوده‌اند [۱۲]. وو از جمله پیشگازان در زمینه مدل‌سازی عددی عملگرهای پلاσμα در از بین بردن واماندگی دورانی بوده است. وو و همکاران در مطالعات خود موقعیت‌های مختلف نصب عملگرهای پلاσμα را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که محل نصب در بالا دست روتور و در فاصله‌ای به اندازه ۷ درصد طول وتر پره، بیشترین اثر را بر تاخیر در رخداد واماندگی دورانی در یک کمپرسور سرعت پایین را دارد. علاوه بر این نشان داد با افزایش سرعت دورانی روتور، اثرگذاری عملگرهای پلاσμα کاهش می‌یابد [۱۲]. جوتیپراساد و همکاران در ادامه به منظور بررسی اثر عملگرهای پلاسمایی بر روی جریان درز نوک در یک کمپرسور محوری سرعت پایین، با استفاده از یک توزیع نیروی حجمی خطی در شبیه‌سازی‌های خود، اثر جهت نیروی حجمی ناشی از عملگرهای پلاسمایی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که تأثیرگذاری عملگرهای پلاسمایی در صورتی که جهت اعمال نیرو در جهت خلاف دوران روتور باشد مناسب‌تر است. با این وجود فیزیک جریان در این مطالعات هدف اصلی نبوده است [۱۳]. در کنار مطالعات عددی، مطالعات تجربی محدودی نیز بر روی اثرات عملگرهای پلاسمایی بر جریان در پره‌های کمپرسور محوری انجام شده است. از جمله اولین مطالعات تجربی بر روی افزایش حاشیه واماندگی در یک کمپرسور محوری سرعت پایین با استفاده از عملگرهای پلاσμα ناپایا، مطالعه لی گنگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ بوده است [۱۴]. در این مطالعه به صورت تجربی، استفاده از عملگرهای پلاسمایی به منظور تزریق انرژی در جریان نشتی نوک^۳ در یک کمپرسور محوری سرعت پایین با هدف از بین بردن واماندگی دورانی و افزایش بازه عملکردی کمپرسور سرعت پایین با یک تک روتور، بررسی شده است. نتایج کسب شده در این مطالعه نشان می‌دهد محدوده عملکردی کمپرسور در صورت وجود عملگر پلاسمایی افزایش می‌یابد و کمپرسور می‌تواند در ضریب فشار بالاتری فعالیت کند، اما ضریب تأثیر عملگر با افزایش سرعت نوک روتور کاهش می‌یابد. علاوه بر این نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در سرعت دورانی ۱۵۰۰ rpm میزان افزایش حاشیه واماندگی در حدود ۲/۲ درصد است [۱۴].

در سال ۲۰۱۴ مطالعه‌ای تحت عنوان تاخیر در رخداد واماندگی دورانی با استفاده از عملگر پلاσμα بر روی یک کمپرسور سرعت پایین محوری-گریز از مرکز انجام شده است. در این مطالعه که هم به صورت تجربی و همچنین عددی انجام پذیرفته است، اثر عملگر پلاσμα بر روی واماندگی دورانی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. در این مطالعه که از یک نمونه مهندسی کمپرسور سرعت پایین که پوسته و پره‌ها از جنس دی‌الکتریک ساخته شده بود، نشان داده شد که وجود عملگر پلاσμα قادر است حاشیه واماندگی را در کمپرسورهای محوری و شعاعی بهبود دهد [۱۵]. صدوقی و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطالعه‌ای تجربی بر روی ارزیابی اثر جریان نشتی نوک با و بدون کنترل جریان به

³ Tip leakage flow to suppress rotating stall

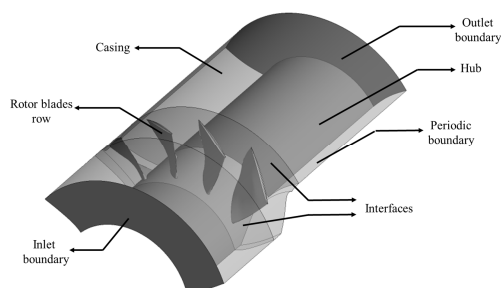
¹ Casing treatment

² Cold plasma

جدول ۱- مشخصات ردیف پره روتور کمپرسور محوری

مشخصه	واحد	مقدار
تعداد پره	-	۱۲
سرعت دورانی	rpm	۱۳۰۰
شعاع پایه پره	mm	۱۳۵
نسبت پایه به نوک		۰/۶
نسبت مقدار درز نوک به طول وتر پره	%	۱/۷
طول وتر در نوک	mm	۱۱۷/۵
زاویه نصب پره	deg	۵۶/۲

در دامنه ورودی میدان حل، از شرط مقدار سرعت و در خروجی از شرایط فشار استاتیک به همراه فرض تعادل شعاعی^۱ به عنوان شرایط مرزی مورد استفاده قرار گرفته است. شرط تناوبی در طرفین میدان حل و شرط عدم لغزش بر روی دیوار آدیاباتیک، پوسته و ریشه دیگر شرایط مرزی مورد استفاده می‌باشند. پایه دامنه روتور، متحرک و پایه پوسته دامنه ورودی و خروجی ثابت در نظر گرفته شده است. همانطور که ذکر شد، در این مطالعه ناحیه حل شامل سه بلوک اصلی می‌باشد. بلوک ابتدایی و انتهایی به صورت ثابت و بلوک میانی (دامنه روتور) به صورت چرخان مدل‌سازی گردیده‌اند. بین این سه دامنه حل سطوح مشترک میانی تعریف گردیده‌اند. نمایی از هندسه روتور به همراه شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- شرایط مرزی حوزه حل محاسباتی

۲-۲- شبکه‌بندی

برای شبکه‌بندی این میدان محاسباتی از نرم‌افزار Turbogrid استفاده شده است. در این نرم‌افزار خروجی هندسه روتور از نرم‌افزار Bladegen با استفاده از این نرم‌افزار میدان محاسباتی به صورت سازمان یافته شبکه‌بندی شده است. برای افزایش دقت محاسبات در مجاورت دیواره و به ویژه در ناحیه درز نوک شبکه‌بندی ریزتری در نظر گرفته شده است. برای کل میدان مورد بررسی در این مطالعه ۸۹۸۴۷۶ المان در مجموع برای چهار گذرگاه در نظر گرفته شده است. از این

وسیله پلاسما بر روی عملکرد کمپرسور گذر صوتی ساخته شده در نیروی هوایی آمریکا با نسبت منظری پایین و تک طبقه انجام داده‌اند. در این مطالعه اثر پالسی شدن عملگرهای پلاسما در فرکانس‌های دورانی مختلف روتور و جهت نیروهای اعمالی متفاوت با پلاسما مورد مطالعه قرار گرفته است. عملگرهای پلاسما مورد استفاده در این مطالعه، بر روی پوسته در بالادست لبه حمله روتور نصب شده است. در این مطالعه نشان داده شد که عملگرهای پلاسمایی در حالت فاصله نشستی نوک زیاد بیشترین تاثیر را داشته‌اند و بیشترین حاشیه واماندگی گزارش شده در حدود ۴ درصد در آزمون‌های عملکردی بوده است [۱۶].

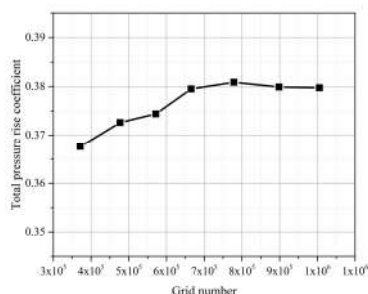
هدف اصلی این مطالعه بررسی دقیق اثرگذاری عملگر پلاسمایی در کاهش جریان درز نوک و افت‌های ناشی از این جریان در یک کمپرسور محوری سرعت پایین بوده است. در واقع در این مطالعه به بررسی اثر عملگر پلاسمایی به عنوان یک روش کنترل فعال در کاهش افت جریان درز نوک و کاهش آنتروپی ناشی از ناپایداری‌های جریان در آن ناحیه پرداخته شده است. از جمله نوآوری‌های این مطالعه نیز بررسی رفتار میدان جریان نشستی نوک در تعامل با عملگر پلاسمایی و کاهش اثرات نامطلوب جریان نشستی نوک در شرایط واماندگی با استفاده از عملگر پلاسمایی بوده است. در واقع بررسی اندرکنش جریان در ناحیه درز نوک روتور با میدان جریان القایی ناشی از عملگر پلاسمایی و بهبود الگوی جریان و بررسی توانایی عملگر پلاسمایی در حذف جریان بازگشتی به گذرگاه از لبه فرار در شرایط واماندگی از جمله اهداف اصلی این مطالعه بوده است.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی

ردیف پره روتور مورد استفاده در این مطالعه شامل ۱۲ پره با پروفیلی بر مبنای سری NACA-65 می‌باشد [۱۷]. هندسه این روتور در مطالعات مختلفی نیز استفاده شده است [۱۸، ۱۹]. مشخصات این روتور مطابق جدول ۱ است. از آنجایی که تحلیل کامل یک ردیف پره روتور نیازمند شبکه‌بندی با تعداد المان زیادی می‌باشد، نوعاً محققان از یک یا چند گذرگاه برای مدل‌سازی استفاده می‌کنند. در این مطالعه نیز از ۴ گذرگاه جریان کمپرسور که معادل ۱/۳ محیط آن است، استفاده شده است. هرگذرگاه شامل سه قسمت ورودی روتور، ناحیه پره و خروجی روتور است. به منظور مدل‌سازی عددی پایا در این مطالعه، از نرم‌افزار آنسیس Ansys CFX استفاده شده است. این نرم‌افزار که قابلیت تحلیل سه بعدی و لزج را دارا است، برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال شامل بقای جرم، اندازه حرکت (معادلات ناویر استوکس)، از روش حجم محدود بهره می‌برد. معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز در حالت سه بعدی و لزج به روش ضمنی مرتبه دو در این مطالعه حل می‌شوند. مدل آشفتگی مورد استفاده در این مطالعه نیز مدل $k\omega$ -SST می‌باشد که این مدل، به دلیل اعمال اصلاحاتی در نزدیکی دیواره، عموماً در مسائل مربوط به توربوماشین‌ها در مراجع مختلفی به عنوان مدل مناسب پیشنهاد شده است [۲۰]. علاوه بر این، در این مطالعه، از دستگاه‌های مختصات مرجع چرخان نیز بهره گرفته شده است. معیار همگرایی در حل عددی به گونه‌ای است که مقادیر باقی‌مانده معادلات اصلی در حدود 10^{-7} لحاظ شده است.

¹ Radial Equilibrium



شکل ۵- استقلال شبیه‌سازی از شبکه‌بندی

۲-۳- مدل‌سازی عددی پلاسما

به منظور شبیه‌سازی اثرات سیالاتی عملگرهای پلاسمایی برای کنترل جریان، مدل‌های بسیاری توسعه داده شده است. یکی از این مدل‌ها، مدل شای^۱ و همکاران بوده است. این مدل ساده خطی به صورت متوسط زمانی است که توزیعی از یک نیروی حجمی با توجه به اندازه عملگرها و ولتاژ ورودی و فرکانس، به میدان جریان اعمال می‌شود. در این مدل، به دلیل هزینه‌های محاسباتی پایین و دقت مناسب یکی از گزینه‌های ایده‌آل برای بررسی اثر عملگرهای پلاسمایی بر جریان پیچیده کمپرسورهای محوری بوده است [۱۲].

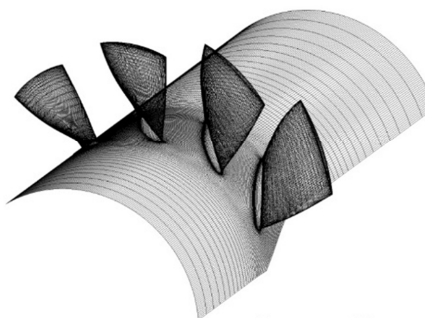
با استفاده از آزمون‌های تجربی، شای و همکاران نشان دادند که اثرات پلاسما تنها بر روی سطح بالایی الکتروود پوشیده یا مخفی در داخل ماده دی‌الکتریک قابل توجه است. همچنین دریافتند که شدت پلاسمای تولیدی در لبه الکتروود در معرض نیز بیشینه مقدار خود را دارد و این مقدار با افزایش شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. شای و همکاران با استفاده از این مشاهدات و صرف نظر کردن از سایر عوامل تأثیرگذار بر شدت پلاسما، مدلی بر اساس توزیع خطی نیروی حجمی ناشی از اثرات پلاسمایی در یک ناحیه‌ی کوچک مثلثی به طول b و ارتفاع a ارائه نمودند. این توزیع نیروی حجمی خطی در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۱]. در واقع در این مدل ناحیه پلاسما در زیر خط A-B تشکیل می‌شود. علاوه بر این مقادیر، a در این مدل برابر $1/5$ و b برابر ۳ میلی‌متر است [۲۲]. همانطور که ذکر شد، تغییرات شدت میدان الکتریکی در این مدل به صورت خطی و مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود. در حقیقت میزان شدت میدان الکتریکی در هر نقطه مطابق این رابطه محاسبه می‌شود. در این رابطه E_0 مقدار شدت میدان الکتریکی در نقطه o است که از طریق رابطه (۲) بدست می‌آید. پارامتر V ولتاژ بیشینه میان دو الکتروود و d فاصله میان الکتروودها است [۲۲].

$$|E| = E_0 - k_1 x - k_2 y \quad (1)$$

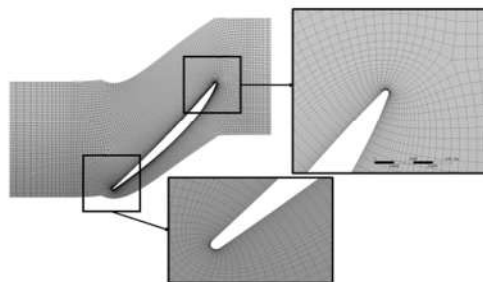
$$E_0 = \frac{V}{d} \quad (2)$$

میزان 654144 المان مربوط به بلوک روتور، 97812 المان برای بلوک مربوط به ورودی و 14652 برای بلوک خروجی می‌باشد. به منظور عدم نیاز به استفاده از توابع دیواره، چگالی و میزان y^+ در دامنه محاسباتی و روی دیواره‌ها از ۵ متجاوز نمی‌شود. نمایی سه بعدی از ساختار شبکه‌بندی دیواره میدان حل در شکل ۳ نشان داده شده است. علاوه بر این، نمایی از ساختار شبکه اطراف روتور در میانه پره در شکل ۴ نمایش داده شده است.

به منظور اطمینان از شبکه‌بندی مورد استفاده، استقلال نتایج بدست آمده از تعداد شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر مد نظر در این بررسی استقلال از شبکه، ضریب افزایش فشار کل می‌باشد. در این مسیر، شش نوع شبکه‌بندی مختلف از شبکه‌بندی درشت تا شبکه‌بندی ریز، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش المان‌های محاسباتی تا میزان 778816 ضریب افزایش فشار تغییرات زیادی می‌کند. اما از این میزان به بعد تا میزان حدود 1000000 المان، تغییرات ضریب افزایش فشار بسیار ناچیز است. بنابراین شبکه‌بندی در حدود 898476 برای این مطالعه مناسب است.



شکل ۳- هندسه حل محاسباتی و شبکه‌بندی بر روی دیواره



شکل ۴- ساختار شبکه‌بندی میدان جریان

¹ Shy

پلاسمایی مطابق مدل شای می‌باشد. همانطور که اشاره شد، این توزیع نیروی حجمی تنها در ناحیه مثلثی کوچکی اعمال می‌شود. شبیه‌سازی این مدل در نرم افزار CFX انجام پذیرفته است. این توزیع نیروی حجمی به صورت یک جمله اضافی مولد اندازه حرکت به معادلات ناویر استوکس اضافه می‌شود تا اثرات عملگرهای پلاسمایی بر روی میدان جریان پیاده‌سازی شود.

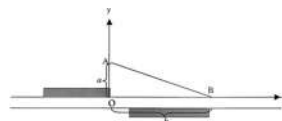
جدول ۲- مشخصات متغیرهای به کارگرفته شده در شبیه‌سازی مدل

شای [۲۲]

متغیر	نماد	واحد	مقدار
فرکانس اعمالی	θ	kHz	۳
چگالی بار کل	ρ_c	1/cm ³	۱۰ ^{-۱۱}
زمان تخلیه پلاسما	Δt	s	۶۷ × ۱۰ ^{-۶}
میدان الکتریکی شکست	E_b	kV/cm	۳۰
ولتاژ اعمالی	U_a	kV	۴
فاکتور راندمان	α	-	۱
ارتفاع ناحیه پلاسمایی	a	mm	۱/۵
عرض ناحیه عملگرپلاسمایی	b	mm	۳
فاصله بین عملگرهای پلاسمایی	d	mm	۰/۲۵
طول الکتروود در معرض	-	mm	۰/۵
طول الکتروود پوشیده	-	mm	۳
ارتفاع الکتروود	-	mm	۰/۱

عملگرهای پلاسمایی در این شبیه‌سازی در روی پوسته و در بالادست روتور پیاده‌سازی شده‌اند. همچنین قابل توجه است که شعاع ناحیه پلاسمایی در قیاس با شعاع پوسته بسیار کوچک است. توزیع نیرو در مختصات دکارتی مطابق رابطه (۷) به مختصات استوانه‌ای معادل، تصویر شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل به کار گرفته شده در این مطالعه، در ابتدا این مدل بر روی صفحه تخت، پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این مدل بر روی صفحه تخت در قیاس با نتایج مرجع اصلی که بر روی صفحه تخت بوده، در شرایط ولتاژ ۴ کیلوولت و فرکانس ۳ کیلوهرتز مقایسه شده است (شکل ۷). لازم به ذکر است، مقایسه نتایج در سرعت‌های جریان آزاد مختلف و مطابق هندسه ارائه شده در مرجع انجام شده است. نتایج این مقایسه نشانگر این است که شبیه‌سازی مدل شای، با نتایج ارائه شده در مرجع مطابقت مناسبی دارد. در ادامه به منظور پیاده‌سازی این مدل بر روی پوسته یک کمپرسور محوری با تغییر مختصات کارتزین به استوانه‌ای در مدل شای، این مدل در داخل یک استوانه و بر روی پوسته آن به کار گرفته شده است. در واقع مدل پلاسما بر روی سطح استوانه‌ای پیاده‌سازی و جریان در داخل آن شبیه‌سازی شده است. فاصله قرارگیری عملگرهای پلاسمایی در این حالت نیز از ورودی، معادل مدل صفحه تخت مورد استفاده توسط شای است [۲۲]. نتایج بدست آمده از به کاربردن مدل خطی شای، بر روی یک استوانه نشانگر این است که اثرات عملگرهای پلاسمایی در استوانه نیز با افزایش سرعت همانند اثرات این عملگرهای پلاسمایی بر روی صفحه تخت می‌باشد (شکل ۸).

با در نظر گرفتن شدت میدان الکتریکی در مرز میان پلاسما و سیال برابر مقدار شکست^۱ در طول خط A-B، مقدار ثوابت k_1 و k_2 نیز از طریق روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود. در روابط (۳) و (۴)، E_{cr} شدت میدان الکتریکی در حالت شکست است. مولفه‌های میدان الکتریکی در راستای x و y به صورت روابط (۵) و (۶) است. لازم به ذکر است که در زیر خط A-B میزان شدت میدان الکتریکی کمتر از شدت میدان الکتریکی در حالت شکست است.



شکل ۶- توزیع نیروی حجمی خطی در مدل شای [۲۲]

$$k_1 = \frac{E_o - E_{cr}}{b} \quad (۳)$$

$$k_2 = \frac{E_o - E_{cr}}{a} \quad (۴)$$

$$E_x = \frac{Ek_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (۵)$$

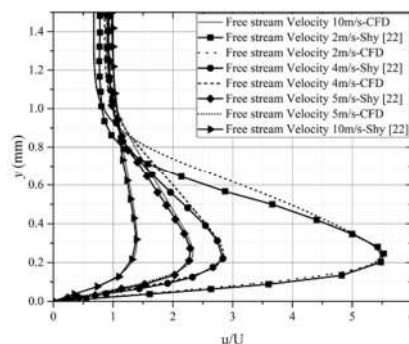
$$E_y = \frac{Ek_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (۶)$$

$$(F_x, F_y) = Eap_c e_c f \Delta t \left(\frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}, \frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \right) \quad (۷)$$

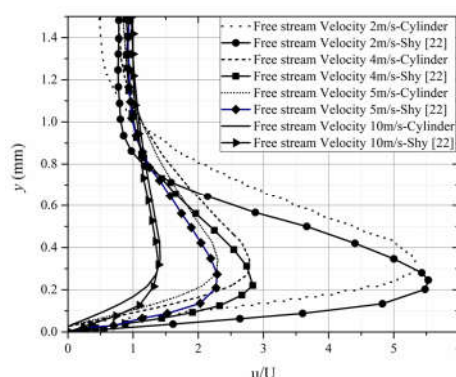
توزیع نیروی حجمی متوسط گیری شده زمانی در طول x و y در این مدل در هر نقطه از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. جزئیات محاسبه این توزیع نیروی خطی در منبع [۲۲] به طور کامل ارائه شده است. در رابطه فوق f فرکانس ولتاژ اعمالی و Δt بیانگر مدت زمان تخلیه عملگرهای پلاسمایی می‌باشد که در قیاس با مقیاس‌های زمانی جریان بسیار کوچک‌تر است. علاوه بر این، e_c بار مقدماتی و ρ_c چگالی بار کل می‌باشد. α نیز فاکتور راندمان برخورد می‌باشد. این نیرو فقط در طول زمان Δt (زمانی که پلاسما درحال شکل‌گیری است) به سیال اعمال می‌شود که فقط شامل نیمی از چرخه جریان متناوب می‌باشد که تولید پلاسما فقط در طی این بازه زمانی انجام می‌شود. از نیروی حجمی حاصل در نیمه دوم چرخه جریان متناوب می‌توان به دلیل عدم تولید و یا مقدار بسیار کم پلاسما صرف نظر کرد. همچنین به دلیل فرکانس بالای تخلیه، می‌توان نیروی اعمالی بر سیال را به صورت یک نیروی متوسط ثابت در زمان فرض کرد که در تمام طول چرخه ثابت می‌باشد و تغییر نمی‌کند. فرکانسی اعمالی در این شبیه‌سازی ۳ kHz و ولتاژ اعمالی ۴ kV به نظر گرفته شده است. مشخصات متغیرهای به کارگرفته شده در شبیه‌سازی مدل شای نیز مطابق جدول ۲ است. در نهایت رابطه (۷) توزیع خطی نیروی حجمی عملگرهای

¹ Breakdown

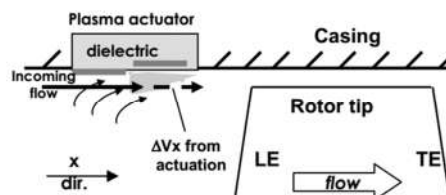
در شبیه‌سازی اثر عملگرهای پلاسمایی به عنوان یک روش کنترل فعال در یک کمپرسور محوری، این عملگرهای پلاسمایی در فاصله ۷ درصدی طول وتر پره، در بالا دست روتور تعبیه شده است. این فاصله در مطالعه وو و همکاران به عنوان فاصله بهینه در روتورهای سرعت پایین پیشنهاد شده است [۱۲]. نمایی از طرح‌واره قرارگیری عملگر پلاسمایی در بالادست روتور در شکل ۹ نشان داده شده است. این عملگر پلاسمایی به صورت محیطی در سرتاسر محیط پوسته در بالادست روتور اعمال شده است.



شکل ۷- نتایج اعمال عملگرهای پلاسمایی بر روی صفحه تخت در سرعت‌های جریان آزاد مختلف و مطابق هندسه مطالعه شای



شکل ۸- نتایج اعمال عملگرهای پلاسمایی بر روی استوانه در سرعت‌های جریان آزاد مختلف



شکل ۹- طرح‌واره قرارگیری عملگر پلاسمایی در بالادست روتور [۱۲]

۳- نتایج

۳-۱- نتایج عملکردی

به منظور صحت‌سنجی روش حل عددی (بدون عملگرهای پلاسمایی)، نتایج کسب شده با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۱۷] مقایسه شده است (شکل ۱۰). در این شکل مقادیر مربوط به ضریب افزایش فشار متوسط (ψ) در مقابل ضریب جریان (ϕ)، یا به عبارتی منحنی عملکرد کمپرسور در سرعت دورانی ۱۳۰۰ rpm، در دو حالت حل عددی و نتایج تجربی مقایسه شده است. مقادیر ضریب افزایش فشار و ضریب جریان در این نمودار، مطابق روابط (۸) و (۹) تعریف می‌شود. در این روابط نیز، ΔP_t بیانگر اختلاف فشار کل قبل و بعد از روتور، U_t بیانگر سرعت در نوک پره و C_x بیانگر سرعت محوری ورودی به روتور می‌باشد. مطابق این شکل مدل عددی پیش‌بینی قابل قبولی در طیف ضرایب جریان مورد بررسی ارائه داده و همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد.

$$\psi = \frac{\Delta P_t}{\frac{1}{2} \rho U_t^2} \quad (8)$$

$$\phi = \frac{C_x}{U_t} \quad (9)$$

در ادامه پس از تعبیه عملگرهای پلاسمایی در بالا دست روتور، منحنی عملکردی در شرایط فعال بودن عملگر پلاسمایی و خاموش بودن آن در مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، این عملگرهای پلاسمایی در فاصله ۷ درصد طول وتر پره در نوک، در بالادست روتور تعبیه شده است. منحنی عملکردی کمپرسور در شرایط فعال بودن عملگرهای پلاسمایی و بدون آن در سرعت دورانی ۱۳۰۰ rpm در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق این شکل وجود عملگرهای پلاسمایی افزون‌بر افزایش نسبت فشار در ناحیه نزدیک به واماندگی موجب شده است که حاشیه واماندگی کمپرسور را افزایش دهد و در واقع شرایط واماندگی در کمپرسور در ضریب جریان بالاتری رخ دهد. همچنین مشاهده می‌شود که وجود عملگرهای پلاسمایی اثر نامطلوبی در شرایط طراحی بر روی عملکرد کمپرسور نداشته است و اثرات آن در محدوده طراحی ناچیز است. لازم به ذکر است، شرایط نزدیک به واماندگی در شکل ۱۱ مشخص شده است. همچنین قابل توجه است که شرایط واماندگی کمپرسور متناسب با ناحیه‌ای است که با کاهش دبی جرمی جریان، ضریب افزایش فشار نیز کاهش می‌یابد.

یکی از روش‌های بیان تاثیرگذاری روش‌های کنترل جریان در کمپرسورها استفاده از مقیاس جابجایی نقطه واماندگی در شرایط وجود روش کنترلی و شرایط بدون روش کنترلی است. به منظور کمی نمودن میزان اثرگذاری عملگرهای پلاسمایی بر روی عملکرد کمپرسور محوری مورد مطالعه، از یکی از مقیاس‌های ارائه شده در منابع جهت بررسی میزان افزایش حاشیه پایداری کمپرسور استفاده شده است (رابطه (۱۰)).

$$\Delta \varphi_{\text{stall}} = \left[(\varphi_{\text{stall}})_i - (\varphi_{\text{stall}})_s \right] / (\varphi_{\text{stall}})_i \quad (10)$$

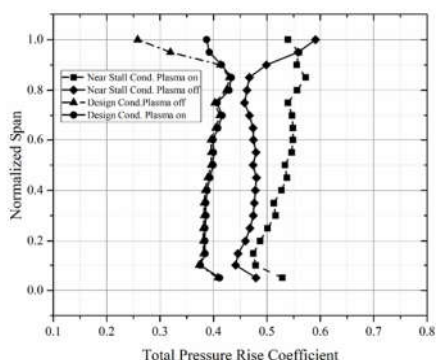
در رابطه فوق i اندیس عملکرد در حالت فعال بودن عملگر و s در شرایط پوسته بدون عملگر است. در جدول (۳) مقادیر افزایش حاشیه واماندگی و ضریب عملکرد را در اثر تزریق هوا مطابق با رابطه (۱۰) نشان می‌دهد. نتایج محاسبه حاشیه واماندگی نشان می‌دهد که

افزایش یافته و منحنی به سمت راست جابجا شده است. اما با اعمال عملگرهای پلاسمایی، ضریب افزایش فشار کل (به طور میانگین از پایه تا نوک پره) افزایش یافته است. علاوه بر این در شرایط طراحی، استفاده از عملگرهای پلاسمایی تأثیری به افزایش فشار در روتور ندارد اما در ناحیه درز نوک پره، استفاده از عملگرهای پلاسمایی تأثیر قابل توجهی در افزایش فشار می‌گذارد. علاوه بر این از آنجایی که افزایش فشار در ناحیه نوک پره (۱۰٪ انتهای طول پره) منجر به یک بارگذاری شدید در این ناحیه می‌شود، استفاده از عملگر پلاسمایی موجب توزیع یکنواخت ضریب افزایش فشار کل در کل پره می‌گردد.

در منابع مختلف ضریب افت در یک روتور مطابق رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۱۷]. در این رابطه اندیس‌های ۱ و ۲ مربوط به صفحات قبل و بعد از روتور و C_θ بیانگر سرعت مماسی می‌باشد که به صورت متوسط از ریشه تا نوک محاسبه شده است. با استفاده از این رابطه ضریب افت روتور مورد مطالعه، بررسی و نتایج آن در شرایط طراحی مطابق شکل (۱۳) است. با توجه به این شکل مشخص است که در حالت بدون عملگرهای پلاسمایی نتایج کسب شده با نتایج تجربی از مطابقت مناسبی برخوردار است. علاوه بر این مشخص است که منبع افت‌های میدان جریان، ناشی از جریان ریشه و نوک پره در یک گذرگاه عبوری از روتور می‌باشد. با اعمال عملگرهای پلاسمایی در این حالت نیز مشخص است که در شرایط طراحی، عملگرهای پلاسمایی تأثیرگذاری لازم را ندارند.

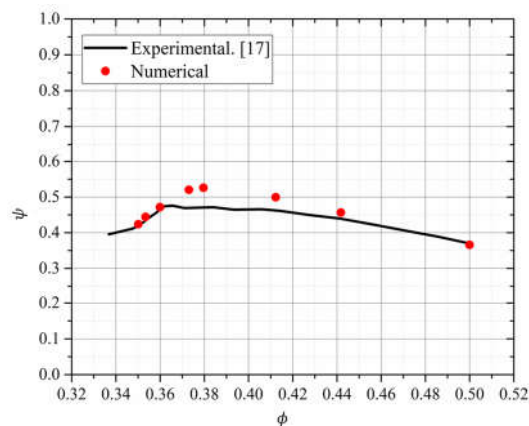
تأثیر استفاده از عملگرهای پلاسمایی بر روی افت در گذرگاه جریان عبوری از روتور در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل که مربوط به شرایط نزدیک به واماندگی (ضریب جریان ۰/۳۷) است، استفاده از عملگرهای پلاسمایی بر روی افت میدان جریان اصلی تأثیر گذار نبوده است اما در ناحیه جریان نشستی نوک که منبع اصلی افت در میدان جریان است، استفاده از این عملگرهای موجب شده است که ضریب افت کاهش یابد که نشانگر اثرگذاری مثبت این عملگرهای پلاسمایی بوده است.

$$\zeta_p = \frac{(u_2 c_{\theta 2} - u_1 c_{\theta 1}) - \Delta P_t / \rho}{U_t^2 / 2} \quad (11)$$

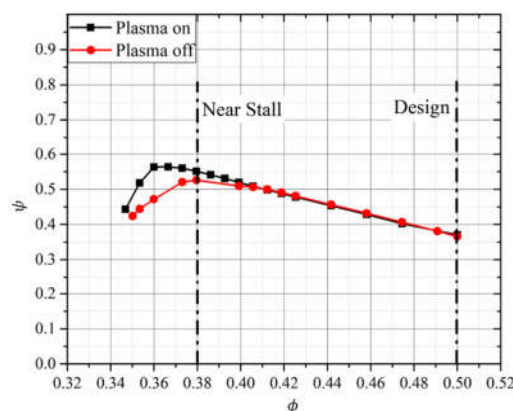


شکل ۱۲- ضریب افزایش فشار کل از پایه تا نوک پره روتور در شرایط ضریب جریان ۰/۳۷

عملگرهای پلاسمایی توانسته‌اند در حدود ۵/۲ درصد، بهبود در حاشیه واماندگی در کمپرسور مورد مطالعه ایجاد کنند.



شکل ۱۰- صحت‌سنجی نتایج حل عددی با نتایج تجربی

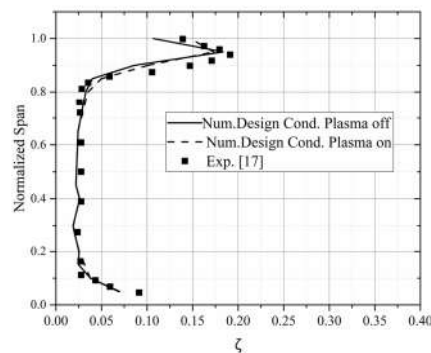


شکل ۱۱- منحنی عملکرد در حالت اعمال و عدم اعمال عملگرهای پلاسمایی

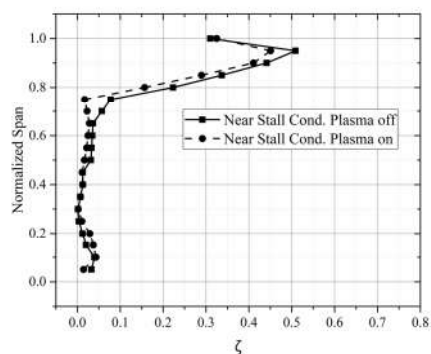
جدول ۳- میزان افزایش حاشیه واماندگی

شرایط	ضریب جریان واماندگی	ضریب افزایش فشار واماندگی	درصد میزان افزایش حاشیه واماندگی	درصد افزایش ضریب فشار واماندگی
بدون عملگر پلازما	۰/۳۸	۰/۵۲	-	-
با عملگر پلازما	۰/۳۶	۰/۵۶	۵/۲	۷

به منظور بررسی بیشتر اثرات عملگرهای پلاسمایی بر عملکرد کمپرسور، توزیع ضریب افزایش فشار کل از پایه تا نوک پره روتور در شرایط ضریب جریان ۰/۳۷، در شکل ۱۲ ارائه شده است. در واقع در این شکل اثر بخشی عملگرهای پلاسمایی در ناحیه نوک ردیف پره با تمرکز بر تغییرات شعاعی ضریب افزایش فشار به خوبی نشان داده شده است. در شرایط نزدیک به واماندگی طبیعتاً نسبت فشار کمپرسور



شکل ۱۳- ضریب افت از پایه تا نوک پره روتور در شرایط طراحی



شکل ۱۴- ضریب افت از پایه تا نوک پره روتور در شرایط ضریب جریان ۰/۳۷

۳-۲- بررسی ساختار جریان

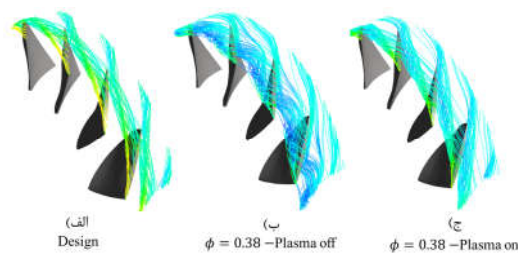
در این بخش به بررسی اثر عملگرهای پلاسمایی بر روی ساختار جریان پرداخته می‌شود. اثر عملگر پلاسمایی بر روی میدان سرعت، ساختار جریان نشتی نوک، افت در ناحیه درز نوک و آنتروپی تولیدی در حضور عملگرهای پلاسمایی در شرایط ضریب جریان ۰/۳۸، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با کاهش دبی جرمی عبوری از کمپرسور و حرکت به سمت ضرایب جریان کمتر، شدت جریان نشتی درز نوک افزایش می‌یابد. این امر ناشی از افزایش زاویه برخورد جریان به پره در ورودی به سبب کاهش دبی است. برهم‌کنش جریان نشتی و جریان جدا شده از نوک موجب شکل‌گیری گردابه‌ای در این ناحیه می‌گردد. وجود این گردابه عملاً باعث مسدودشدگی گذرگاه جریان در ناحیه نوک پره خواهد شد. در واقع با شکل‌گیری گردابه و فروشکست آن، مسدودشدگی در گذرگاه جریان به ویژه در ناحیه نوک پره پدید می‌آید. این مسدودشدگی موجب ایجاد نواحی کم‌فشار محلی در گذرگاه جریان عبوری از روتور می‌شود. شکل ۱۵ ساختار گردابه جریان نشتی نوک قبل و پس از اعمال عملگرهای پلاسمایی در شرایط نزدیک به واماندگی در کنار ساختار این گردابه در شرایط طراحی را نشان می‌دهد. در حالت طراحی، گردابه جریان درز نوک از لبه حمله آغاز شده و به سمت داخل گذرگاه جریان ادامه می‌یابد و نهایتاً از گذرگاه

خارج می‌گردد. در این حالت گردابه جریان درز نوک بدون فروشکست گذرگاه را ترک می‌کند که منجر به افت کمتری در مسیر جریان می‌شود. شکل ۱۵-ب مربوط به شرایط نزدیک به واماندگی (ضریب جریان ۰/۳۸) است. در این شرایط فروشکست گردابه کاملاً مشهود بوده و مسیر گردابه به سمت بالادست متمایل شده است. پس از اعمال عملگرهای پلاسمایی در بالا دست روتور، ساختار گردابه جریان درز نوک از حالت واماندگی خارج و بسیار شبیه به حالت طراحی شده است.

در نزدیکی حد پایداری کمپرسور (مرز آغاز ناپایداری‌ها)، با برهم‌کنش بین جریان اصلی ورودی و جریان نشتی نوک، ناحیه‌ای با گردایان شدید در برخی خواص ترمودینامیکی جریان شکل می‌گیرد. در شرایط ناپایداری، دو پدیده در کمپرسورهای محوری ایجاد می‌شود. این دو پدیده شامل انحراف خطوط جریان در شعاع نزدیک به نوک پره^۱ و دور زدن جریان در لبه فرار پره و ورود به گذرگاه پره کناری^۲ است [۲۳]. نمایی از رخداد این دو پدیده در کمپرسور مورد مطالعه در ضریب جریان ضریب جریان ۰/۳۸ در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

در شکل ۱۷ نمایی از ساختار جریان در ناحیه نزدیکی نوک پره و تاثیر عملگرهای پلاسمایی بر آن را نمایش داده است. در این شکل تاثیر عملگر پلاسمایی بر روی جریان نشتی درز نوک به همراه خطوط جریان به همراه بردارهای جهت جریان در ضریب جریان ۰/۳۸ و در صفحه‌ای در ارتفاع ۰/۹۷ ارتفاع پره ترسیم شده است. با توجه به این شکل هر دو پدیده مذکور در این ضریب جریان در جریان نشتی نوک ایجاد شده است. با اعمال عملگر پلاسمایی این دو مشخصه اصلی وقوع واماندگی از این ناحیه حذف شده است. در واقع عملگر پلاسمایی توانسته است که میزان وقوع ناپایداری‌های جریان در ناحیه درز نوک را کاهش دهد.

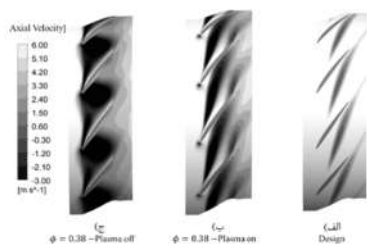
در ادامه کانتور سرعت محوری در گذرگاه روتور و در ۰/۹۷ ارتفاع پره در شکل ۱۸ نشان داده شده است. عملگرهای پلاسمایی با تزریق مومنتوم در بالادست ردیف پره روتور توانسته است با کاهش زاویه برخورد و جدایش ناشی از آن، مسدودشدگی جریان در گذرگاه و در ناحیه نوک پره را کاهش دهد.



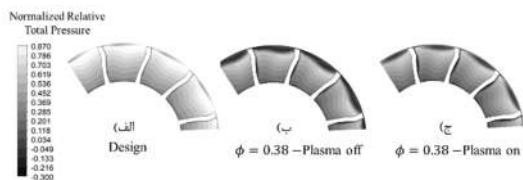
شکل ۱۵- ساختار گردابه درز نوک در شرایط مختلف

¹ Leading edge spillage

² Trailing edge backflow

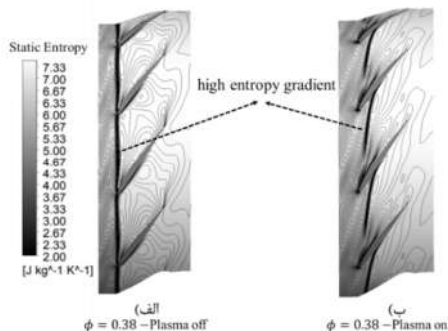


شکل ۱۸- کانتور سرعت محوری در گذرگاه روتور و در ارتفاع ۰/۹۷ متر
پره

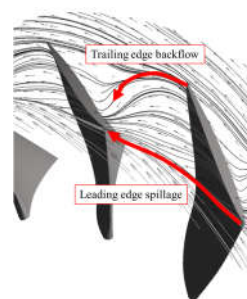


شکل ۱۹- کانتور فشار کل در مختصات نسبی، از نمای روبرو و در
قسمت میانی پره برای شرایط عملکردی در ضریب جریان ۰/۳۸

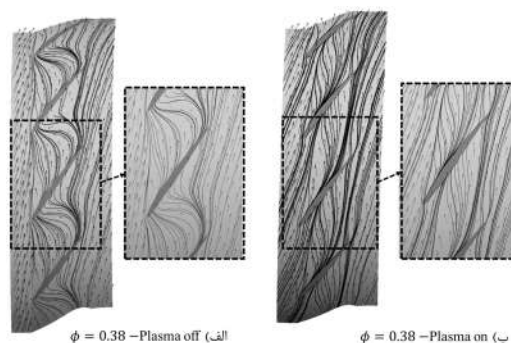
یکی دیگر از اثرات نامطلوب جریان نشتی نوک تولید گردان آنژی با بالا است که منجر به افت در جریان می‌شود. کانتور نواحی با گردان آنژی با بالا در ضریب جریان ۰/۳۸ و در حالت اعمال و عدم اعمال عملگر پلاسمایی در ارتفاع ۰/۹۷ متر در شکل ۲۰ نشان داده شده است. شکل ۲۰-ب کانتور آنژی را در شرایط اعمال عملگرهای پلاسمایی نشان می‌دهد. تراکم خطوط نشانگر گردان بالای آنژی و محل تلاقی جریان اصلی و گردابه جریان درز نوک است. لذا خطوط متراکم، مسیر گردابه را در این شرایط نشان می‌دهد. در واقع با حرکت به سمت نقطه واماندگی، گردابه جریان نوک رشد کرده و به سمت ورودی گذرگاه متمایل می‌گردد. این آنژی با بالا می‌تواند منجر به افت بالا و سرریز جریان به گذرگاه کناری شود. اما پس اعمال عملگر پلاسمایی تراکم خطوط به سمت داخل گذرگاه بیشتر می‌شود که نشانگر تاثیر این عملگرها بر کاهش گردابه نشتی نوک و از بین رفتن سرریز جریان به گذرگاه کناری می‌گردد.



شکل ۲۰- کانتور نواحی با گردان آنژی با بالا در ضریب جریان ۰/۳۸ و در حالت اعمال و عدم اعمال عملگر پلاسمایی در ارتفاع ۰/۹۷ متر
پره



شکل ۱۶- رخداد انحراف جریان در ورودی و دور زدن جریان در لبه
فرار



شکل ۱۷- اثر عملگر پلاسمایی بر روی خطوط جریان در ضریب
جریان ۰/۳۸ و در ارتفاع ۰/۹۷ متر
پره

همانطور که ذکر شد، یکی از اثرات مهم استفاده از عملگرهای پلاسمایی، کاهش میزان افت جریان درز نوک می‌باشد که باعث بهبود حاشیه واماندگی در روتور می‌شود. به منظور بررسی اثر عملگر پلاسمایی بر روی افت در گذرگاه میدان جریان کانتور فشار کل در مختصات نسبی، از نمای روبرو و در قسمت میانی پره برای شرایط عملکردی در ضریب جریان ۰/۳۸ در حالت با و بدون اعمال عملگر پلاسمایی در کنار شرایط عملکردی طراحی در شکل ۱۹ رسم شده است. نواحی تیره رنگ در این شکل، مناطق با تلفات زیاد را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل نواحی تیره رنگ مربوط به افت جریان نشتی نوک در شرایط عملکردی نزدیک به واماندگی بسیار زیاد می‌باشد (شکل ۱۹-ب). از آنجایی که عملگر پلاسمایی موجب تزریق مومنتوم در ناحیه درز نوک می‌شود، این افزایش انرژی موجب می‌شود که گردابه جریان درز نوک کوچک‌تر شده و به سطح مکش پره نزدیک‌تر شود بنابراین پس از اعمال عملگر پلاسمایی افت‌ها در جریان درز نوک کاهش یافته است (شکل ۱۹-ج).

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی روش جدید و نوین کنترل جریان عملگرهای پلاسمایی در کنترل جریان درز نوک و تاثیر آن در افزایش محدوده پایداری یک کمپرسور محوری سرعت پایین پرداخته شده است. به طور کلی این مطالعه نشان داده است که عملگرهای پلاسمایی به عنوان یک روش جدید در حوزه کنترل جریان، توانایی کنترل جریان نشستی نوک در کمپرسورهای سرعت پایین را دارد. در کل مهمترین نتایج کسب شده از این شامل موارد زیر است.

۱- اعمال عملگر پلاسمایی در بالادست روتور کمپرسور محوری موجب شده است که محدوده واماندگی کمپرسور به میزان ۵/۲ درصد افزایش یابد.

۲- عملگرهای پلاسمایی در حالت ضریب جریان طراحی اثرگذاری ندارد و این اثرگذاری تنها در شرایط نزدیک به واماندگی برجسته است.

۳- محدوده تاثیرگذاری عملگرهای پلاسمایی تنها محدود به جریان درز نوک پره است و تاثیر بر میدان جریان اصلی ندارد.

۴- عملگرهای پلاسمایی با تزریق مومنتوم به ناحیه جریان درز نوک منجر به کاهش افت‌های ناشی از گردابه‌های شکل گرفته در این ناحیه می‌شود.

۵- با اعمال عملگر پلاسمایی دو مشخصه اصلی وقوع واماندگی شامل انحراف خطوط جریان در شعاع نزدیک به نوک پره و دور زدن جریان در لبه فرار پره و ورود به گذرگاه پره کناری از میدان جریان حذف شده است. در واقع از جمله اثرات مهم اعمال این روش کنترل جریان، حذف ناپایایی‌های ناشی از جریان درز نوک است

۵- مراجع

- [1] Day I., Stall inception in axial flow compressors, Journal of Turbomachinery, 1993.
- [2] عباغاب‌بهبهانی م., تحقیق عددی و تجربی اثر تزریق جت هوا در ناحیه درز نوک بر روی عملکرد ردیف پره کمپرسور محوری، رساله دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۷.
- [3] Chen H., Huang X., Shi K., Fu S., Ross M., Bennington M. A., A computational fluid dynamics study of circumferential groove casing treatment in a transonic axial compressor, Journal of Turbomachinery, 2014.
- [4] Kim J. H., Choi K. J. and Kim K. Y., Aerodynamic analysis and optimization of a transonic axial compressor with casing grooves to improve operating stability, Aerospace Science and Technology, Vol. 29, pp. 81-91, 2013.
- [5] Feng L., Tong Z., Geng S., Zhang J., Chen J. and Nie C., A summary of stall warning and suppression research with micro tip injection, Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, pp. 1677-1688, 2011.
- [6] McGowan R. C., Corke T. C., Pulsed-DC Plasma Actuator Characteristics and Application in Compressor Stall Control, AIAA Aerospace Science Meeting, 2016.
- [7] McGowan R. C., The Pulsed-DC Plasma Actuator: Characteristics and Stall Control in Axial Compressors and Fans, PhD Thesis, University of Notre Dame, 2018.
- [8] Ashpis D. E. and Thurman D. R., Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators for Flow Control in the
- Laboratory by Density Matching, International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2019.
- [9] Patel M. P., Ng T. T., Vasudevan S., Corke T. C. and He C., Plasma actuators for hingeless aerodynamic control of an unmanned air vehicle, Journal of Aircraft, Vol. 44, pp. 1264-1274, 2007.
- [10] Pouryoussefi S. G., Mirzaei M. and Hajipour M., Experimental study of separation bubble control behind a backward-facing step using plasma actuators, Acta Mechanical, Vol. 226, pp. 1153-1165, 2015.
- [11] دالوند م., ابراهیمی م. و پوریوسفی غ., بررسی تجربی اثر متغیرهای هندسی و الکتریکی بر عملکرد محرک‌های پلاسمایی DBD در رژیم یکنواخت و رژیم رگه‌ای تخلیه‌ی پلاسما، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۶، ش. ۱، ص ۹۵-۱۰۴، ۱۳۹۶.
- [12] Vo H. D., Suppression of short length-scale rotating stall inception with glow discharge actuation, ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, pp. 267-278, 2007.
- [13] Jothiprasad G., Murray R. C., Essenhigh K., Bennett G. A., Saddoughi S., Wadia A., et al., Control of tip-clearance flow in a low speed axial compressor rotor with plasma actuation, Journal of turbomachinery, Vol. 134, 2012.
- [14] Li G., Xu Y., Yang L., Du W., Zhu J. and Nie C., Low speed axial compressor stall margin improvement by unsteady plasma actuation, Journal of Thermal Science, Vol. 23, pp. 114-119, 2014.
- [15] Ashrafi F., Michaud M. and Vo H., Delay of rotating stall in compressors using plasma actuators, Journal of Turbomachinery, Vol. 138, 2016.
- [16] Saddoughi S., Bennett G., Boespflug M., Puterbaugh S. and Wadia A., Experimental investigation of tip clearance flow in a transonic compressor with and without plasma actuators, Journal of Turbomachinery, Vol. 137, 2015.
- [17] Inoue M., Kuroumaru M. and Fukuhara M., Behavior of tip leakage flow behind an axial compressor rotor, 1986.
- [18] Taghavi-Zenouz R. and Abbasi S., Alleviation of spike stall in axial compressors utilizing grooved casing treatment, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 28, pp. 649-658, 2015.
- [19] Taghavi-Zenouz R. and Eslami S., Effects of casing treatment on behavior of tip leakage flow in an isolated axial compressor rotor blade row, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 36, pp. 819-830, 2013.
- [20] Taghavi-Zenouz R. and Behbahani M. H. A., Improvement of aerodynamic performance of a low speed axial compressor rotor blade row through air injection, Aerospace Science and Technology, Vol. 72, pp. 409-417, 2018.
- [21] عبدی زاده غ. و قاسملو س., بررسی عددی اثر عملگر پلاسمایی بر ضرایب آیرودینامیکی یک ایرفویل تحت نوسان انتقالی، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۹، ش. ۳، ص ۲۳۹-۲۴۸، ۱۳۹۸.
- [22] Shyy W., Jayaraman B., and Andersson A., Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics, Journal of applied physics, Vol. 92, pp. 6434-6443, 2002.
- Deppe A., Saathoff H. and Stark U., Spike-type stall inception in Axial Flow Compressors, Proceeding of 6th Conference on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics, Lille, France, 2005