مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۳، ص‌ص ۱۳۶-۱۴۴

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل عددی اثر پوسته با درز نوک پلّه‌ای بر عملکرد یک کمپرسور گریز از مرکز

رضا تقوی زنوز[۱*]، احسان سلکی[۲]، هادی افشاری[۳]

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، taghavi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۴ شهریور ۱۳۹۲
پذیرش: ۱۱ آبان ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:
کمپرسور گریز از مرکز
استال
درز نوک پلّه‌ای
جریان نشتی نوک پرّه
اصلاح پوسته

چکیده

در این مقاله، یکی از روش‌های جدید اصلاح پوسته به‌منظور بهبود عملکرد کمپرسورها مورد بررسی قرار گرفته است. درز نوک پلّه‌ای یکی از روش‌های مناسب اصلاح پوسته کمپرسورهاست که اخیراً کارایی آن در زمینه کمپرسورهای محوری به اثبات رسیده است. در مطالعه حاضر، اثرات درز نوک پلّه‌ای بر بهبود حاشیه استال یک کمپرسور گریز از مرکز، برای اولین بار، به روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار فلوئنت و با بهره‌گیری از مدل آشفتگی k-ε صورت پذیرفته است. به‌منظور یافتن هندسه بهینه درز نوک پلّه‌ای، هفت هندسه پوسته مختلف به همراه کمپرسور با پوسته صاف درنظر گرفته شده‌اند. بررسی کانتورهای سرعت و الگوهای خطوط جریان روی صفحات عمود بر راستای جریان و نصف‌النهاری نشان می‌دهد که با ایجاد پوسته با درز نوک پلّه‌ای، جریان نشتی نوک پرّه تضعیف شده و میزان انسداد جریان در گذرگاه اصلی کمپرسور، کاهش پیدا می‌کند. بنابراین درز نوک پلّه‌ای، سبب افزایش محدوده عملکرد پایدار کمپرسور شده و وقوع پدیده استال را به‌تأخیر می‌اندازد. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با استفاده از درز نوک پلّه‌ای با ابعاد بهینه، حاشیه استال کمپرسور ۷/۳۸٪ بهبود پیدا می‌کند.

Computational analysis of stepped tip gap casing effect on performance of a centrifugal compressor

Reza Taghavi Zenouz[1*], Ehsan Solki[2], Hadi Afshari[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.
3- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16846-13114 Tehran, taghavi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 September 2013
Accepted 02 November 2013
Available Online 17 May 2014

Keywords:
Centrifugal Compressor
Stall
Stepped Tip Gap
Tip Leakage Flo
Casing Treatment

ABSTRACT

In this article, one of the new casing treatment methods for improving of compressor performance have been investigated. Stepped tip gap is one of the appropriate methods of casing treatment that its functionality in axial compressors have been proved lately. In the present study, for the first time, effects of stepped tip gap on stall margin improvement of a centrifugal compressor have been evaluated numerically. Simulation has been done using Fluent software and k-ε turbulence modeling. To find the optimum geometry of stepped tip gap, seven casing geometries with one untreated smooth wall were considered. Results of velocity contours and streamlines patterns on various azimuthal and meridional planes showed that by using casing with stepped tip gap, tip leakage flow has been weaken and flow blockage in compressor main passage has been reduced. Hence, stepped tip gap extends the stable operating range of compressor and delays the occurrence of stall phenomenon. Results of present research, shows that by using stepped tip gap with optimum size, stall margin of the proposed compressor was improved by 7.38%.

۱- مقدمه

در توربوماشین‌ها وجود درز نوک پرّه‌ها[۱]، عمدتاً امری اجتناب‌ناپذیر است. هرچند کمپرسورهایی که از شراد[۲] بهره می‌برند، بدون درز نوک هستند، لیکن، این نوع از کمپرسورها در مقایسه با نوع بدون شراد، در معرض تنش‌های بیشتری بوده و وزن بالاتری را نیز دارا می‌باشند.

جریان نشتی نوک پرّه در اثر اختلاف فشار بین سطوح مکش و فشار پرّه رتور که ناشی از حرکت نسبی بین رتور و پوسته است، ایجاد می‌شود. وجود چنین جریانی علاوه‌بر ازدیاد ماهیت پیچیده جریان در کمپرسورهای گریز از مرکز، اثراتی را نیز متوجه عملکرد کلی این کمپرسورها می‌نماید. برهم‌کنش جریان نشتی نوک پرّه و نیز جریان عبوری از گذرگاه میان دو پرّه و جریان ورتکس پرّه، یک ساختار جریان بسیار پیچیده را تشکیل می‌دهند. جریان نشتی نوک پرّه سبب ایجاد تغییر در الگوی جریان‌های ثانویه شده و تقریباً

1- Tip clearance
2- Shroud

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Taghavi Zenouz, E. Solki, H. Afshari,Computational analysis of stepped tip gap casing effect on performance of a centrifugal compressor, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 136-144, 2014 (In Persian)

۲۰ تا ۴۰٪ از افت‌های کلی کمپرسور را شامل می‌گردد[۱].

در چند دهه اخیر تحقیقات متعددی در زمینه بررسی اثرات جریان نشتی نوک پرّه بر وقوع ناپایداری‌ها در کمپرسورها، هم‌چون استال دورانی و سرج صورت پذیرفته است. روش‌های مختلفی به‌منظور کنترل جریان نشتی نوک پرّه و ناپایداری‌ها در یک کمپرسور پیشنهاد شده‌اند. یکی از این روش‌ها، اصلاح پوسته[1] کمپرسور می‌باشد که مطالعات زیادی بر روی آن انجام پذیرفته است. از میان انواع روش‌های اصلاح پوسته که تاکنون بررسی شده‌اند، می‌توان به شیار محیطی[2][۲]، اسلات[3][۳] و سوراخ‌های بازچرخشی مکشی[4][۴] اشاره نمود.

محققین بسیاری بر روی روش‌های مختلف اصلاح پوسته در کمپرسورهای محوری و گریز از مرکز، با هدف توسعه گستره ناحیه عملکرد پایدار کمپرسور مطالعه نموده‌اند. اما اغلب این روش‌ها، منتج به کاهش بازده کمپرسور شده‌اند. ژائو و همکاران[۵] یک تحلیل عددی سه‌بعدی بر روی کمپرسور گریز از مرکز کم‌سرعت ناسا، همراه با شیارهای محیطی و نیز مکش هم زمان هوا انجام دادند. آن‌ها ساختار جریان را در نوک پرّه‌ها تحلیل نموده و نشان دادند که این نوع اصلاح پوسته می‌تواند گستره ناحیه عملکرد پایدار کمپرسور را حدود ۲۰٪ بدون افت در بازده توسعه دهد.

لگراس و همکاران[۶] اثرات شیارهای محیطی را بر رتور ۳۷ گذر صوت ناسا، با هدف بهبود جریان نشتی نوک پرّه در نزدیکی شرایط سرج بررسی نمودند. محاسبات پایای آن‌ها به‌کمک نرم‌افزار اِلسا[5] و با روش حجم محدود انجام پذیرفت. آن‌ها نشان دادند که شیارها، توسعه ورتکس نشتی نوک پرّه در راستای عمود بر وتر پرّه را با کاهش ممنتوم موجود در مکانیزم چرخشی آن، محدود می‌کنند.

ژائو و همکاران[۷]، سه نوع روش اصلاح پوسته مختلف شامل شیار محیطی، مکش هوا همراه با شیارهای محیطی و پرّه فرورفته[6] را در یک کمپرسور گریز از مرکز سرعت بالا بررسی نمودند. در این تحقیق، مدل‌سازی عددی جریان با استفاده از یک مدل سه‌بعدی انجام گرفت. آن‌ها ثابت کردند که این نوع اصلاح پوسته می‌تواند محدوده عملکرد پایدار کمپرسور را افزایش دهد، لیکن موجب کاهش بازده کمپرسور می‌گردد.

ژائو و ژانگ[۸] هشت شکل مختلف از شیارهای محیطی را به روش عددی تحلیل نمودند. آن‌ها از حل‌گر اورانوس از مجموعه نرم‌افزار نومکا فاین[7] برای حل معادلات سه‌بعدی متوسط‌گیری شده رینولدز با مدل آشفتگی اسپالارت-آلماراس[8] استفاده کردند. ایشان دریافتند که انتخاب مناسب پارامترهای هندسی شیار نقش مهمی در بهبود پایداری کمپرسور دارد.

یک کمپرسور گریز از مرکز تک‌مرحله‌ای متعلق به یک توربوشارژر هواپیما توسط حسن[۹] مورد بررسی قرار گرفت. او چهار نوع اصلاح پوسته مختلف شامل شیار محیطی، جلورفتگی پوسته[9]، ترکیب شیارهای محیطی و جلورفتگی پوسته، و شیارهای شعاعی را درون شکاف میان ایمپلر و دیفیوزر بررسی نمود. نتایج این بررسی نشان داد که این نوع اصلاحات پوسته سبب بهبود محدوده عملکرد پایدار کمپرسور می‌شوند.

ژو و همکاران[۴] اثرات ایجاد سوراخ در پوسته را بر روی عملکرد یک کمپرسور گریز از مرکز به‌روش تجربی و عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این مکانیزم موجب بهبود حاشیه استال و خفگی[10]، بازده و نسبت فشار کمپرسور می‌گردد.

ویلک و کائو[۱۰] اثرات دو مکانیزم شیارهای محیطی و یک نوع خاص از اسلات را بر میدان جریان یک ردیف پرّه کمپرسور فشاربالا، با استفاده از حل معادلات سه‌بعدی متوسط‌گیری شده رینولدز ارائه نمودند. رابه و هاه[۱۱] نیز اثرات استفاده از سه شیار محیطی با نسبت ابعادی مختلف در یک کمپرسور محوری را بر بهبود حاشیه استال بررسی کردند. آن‌ها به‌روش تجربی و عددی اثبات نمودند که این شیارها از طریق کاهش زاویه برخورد جریان و به دنبال آن بهبود میدان جریان، حاشیه استال را بهبود می‌بخشند.

پوسته با درز نوک پلّه‌ای[11]، نوع خاصی از اصلاح پوسته است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. درز نوک پلّه‌ای، قدرت ورتکس نشتی نوک پرّه را تضعیف نموده و اثرات انسدادی این ورتکس را بر جریان اصلی کمپرسور کاهش می‌دهد. درز نوک پلّه‌ای می‌تواند محدوده عملکرد پایدار کمپرسور را بدون اثر قابل ملاحظه‌ای بر بازده آن، توسعه دهد[۱۲]. مطالعات کمی بر روی درز نوک پلّه‌ای انجام گرفته که همگی در کمپرسورهای محوری انجام شده‌اند. براساس اطلاعات نگارندگان، مقاله حاضر نخستین تحقیق انجام گرفته در حوزه کاربرد این نوع اصلاح پوسته در کمپرسورهای گریز از مرکز است.

اثرات درز نوک پلّه‌ای و تغییر میزان درز نوک پرّه تا پوسته بر عملکرد یک کمپرسور محوری گذر صوتی، به‌روش تجربی توسط تامسون و همکاران مورد بررسی قرار گرفت[۱۳]. آن‌ها نه هندسه مختلف پوسته، شامل سه نوع درز نوک پلّه‌ای را، که بر روی سه نوع پوسته با میزان درز نوک پرّه تا پوسته متفاوت اعمال گردیدند، بررسی نمودند. هدف آن‌ها یافتن حالت بهینه این ترکیب از هندسه‌ها بود. نحوه انتخاب حالت بهینه، براساس بالاترین نسبت فشار و بازده یا براساس وسیع‌ترین محدوده عملکرد پایدار کمپرسور، به اهداف طراحی کمپرسور وابسته است.

اثرات درز نوک پلّه‌ای بر عملکرد و میدان جریان یک کمپرسور محوری فرو صوت توسط لو و همکاران[۱۴] به‌روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با حل معادلات ناویر استوکس در حالت پایا، هشت هندسه مختلف پوسته با درزهای نوک پلّه‌ای متفاوت را بررسی نمودند.

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی امکان استفاده از درز نوک پلّه‌ای در کمپرسورهای گریز از مرکز، به‌منظور بهبود عملکرد کمپرسور است. علاوه‌بر این، هندسه بهینه درز نوک پلّه‌ای نیز تعیین می‌شود. در ابتدا، کمپرسور مورد مطالعه و پیکربندی‌های هندسی مختلف برای پوسته با درز نوک پلّه‌ای معرفی می‌گردند. در ادامه روش شبیه‌سازی عددی و شبکه محاسباتی توصیف می‌شوند. در پایان، عملکرد کلی و میدان جریان درون کمپرسور، تحت تأثیر این نوع اصلاح پوسته، به‌طور مفصل بررسی می‌گردند.

۲- معرفی اجمالی ایمپلر کمپرسور مورد مطالعه و اصلاحات پوسته

تحقیق عددی حاضر بر روی "تست ریگ کمپرسور گریز از مرکز آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران"، صورت پذیرفته است. نمایی از این تست ریگ در شکل ۱ نمایش داده شده است. جدول ۱ نیز پارامترهای هندسی ایمپلر و شرایط عملکردی را ارائه می‌نماید. درز نوک پرّه تا پوسته کمپرسور از لبه حمله تا لبه فرار متغیر است. همچنین تست‌های فشار توسط سنسورهای پیزوالکتریک شرکت هانی‌ول[12] با شماره فنی 162PC01D و دقت ۰/۵٪ رنج فشار اندازه‌گیری شده، صورت پذیرفته است. هفت هندسه

1- Casing treatment
2- Circumferential groove
3- Slot
4- Bleeding recirculation holes
5- Elsa software
6- Recess vane
7- Euranus solver of NUMECA FINE software
8- Spalart-Allmaras
9- Protrude
10- Chocking
11- Stepped tip gap
12- Honeywell

مختلف از پوسته با درز نوک پلّه‌ای، به همراه حالت پوسته صاف در این تحقیق، بررسی می‌شوند. حالت‌های مختلف اصلاح پوسته به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

الف) مطابق شکل ۲-الف، به‌منظور یافتن بهترین عمق، چهار نوع درز نوک پلّه‌ای با عمق بی‌بعد (D_g) متفاوت ۰/۰۱، ۰/۰۱۵، ۰/۰۲۴ و ۰/۰۳۲، با طول شعاعی بی‌بعد (R_g) ثابت برابر ۰/۲۱۶، بررسی می‌شوند.

ب) مطابق شکل ۲-ب، به‌منظور یافتن بهترین طول شعاعی، چهار نوع درز نوک پلّه‌ای با طول شعاعی بی‌بعد (R_g) متفاوت ۰/۲۱۶، ۰/۲۶۹، ۰/۵۷۹ و ۰/۶۲۰، که به‌ترتیب در فواصل ٪۷۰ تا ٪۱۰۶، ٪۶۰ تا ٪۱۰۶، ٪۲۰ تا ٪۱۰۶ و ۳- تا ٪۱۰۶ وتر پرّه قرار گرفته‌اند و با عمق بی‌بعد (D_g) ثابت برابر ۰/۰۲۴، بررسی می‌شوند.

در تحقیق حاضر، پیکربندی‌های متفاوتی از حالات مختلف از ترکیبات عمق و طول شعاعی درز نوک پلّه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. حالات مختلف در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

۳- مدل‌سازی عددی

برای انجام محاسبات عددی از یک شبکه سازمان یافته شش وجهی چند بلوکه استفاده شده است. شکل ۳، نمایی از مش سطحی کمپرسور را نشان می‌دهد.

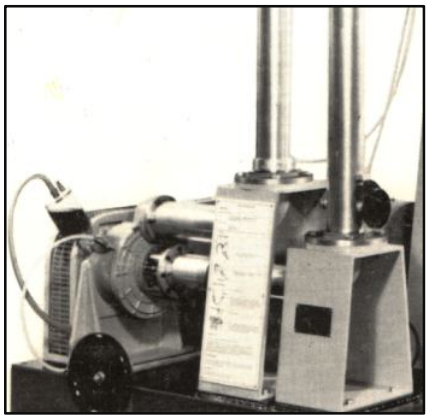
مطالعات استقلال از مش برای کمپرسور موردنظر جهت اطمینان از صحت نتایج عددی ارائه شده، صورت پذیرفت. مجموعه‌ای از شبکه‌های محاسباتی از ۴۱۳۰۰۰ سلول تا ۷۲۸۱۰۰۰ سلول مورد بررسی قرار گرفت. اختلاف در پیش‌بینی نتایج از شبکه اولیه (۴۱۳۰۰۰) تا شبکه حاضر (۴۵۶۵۰۰۰) برای ضریب بار و بازده به‌ترتیب عبارت بودند از ٪۳/۶۶ و ٪۳/۵۷. در ادامه، با افزایش تعداد سلول‌ها بیش از مش حاضر، هیچ تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج مشاهده نشد. لذا مش حاضر (۴۵۶۵۰۰۰) به‌عنوان شبکه عددی منتخب در محاسبات نهایی مورد استفاده قرار گرفت.

کل شبکه محاسباتی شامل ۳۱۲۰۰۰ سلول در مجرای ورودی، ۳۷۰۳۰۰۰ سلول در ایمپلر، ۵۳۱۰۰۰ سلول در حلزونی[1] و ۱۹۰۰۰ سلول در مجرای خروجی است. در بخش ایمپلر، در هر گذرگاه بین دو پرّه، ۲۳۰ گره در راستای جریان، ۴۰ گره از ریشه پرّه تا پوسته و ۶۰ گره نیز در فاصله بین یک پرّه تا پرّه مجاور قرار دارند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر ساختار جریان، ۲۰ گره از نوک پرّه تا پوسته کمپرسور ایجاد شده‌اند. برای مشاهده اثرات لایه مرزی، سلول‌های شبکه در مجاورت دیواره‌ها و سطوح پرّه‌ها ریزتر درنظر گرفته شده‌اند.

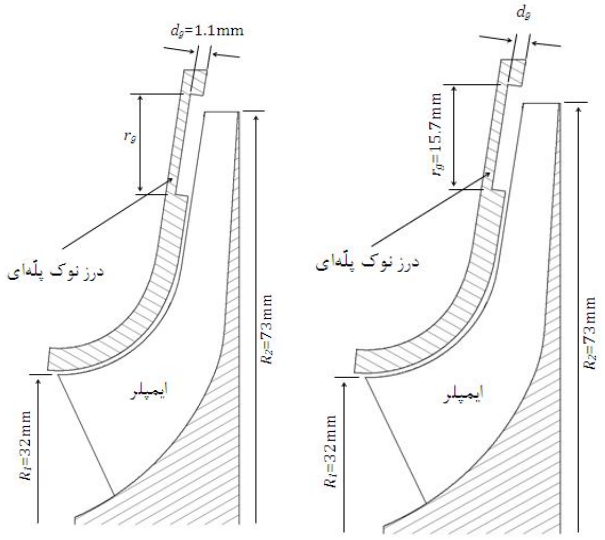
شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار فلوئنت صورت پذیرفته است. معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز در حالت سه‌بعدی به‌روش ضمنی مرتبه دو حل می‌شوند. گسسته‌سازی ترم جابه‌جایی به‌روش تفاضل مرکزی محدود انجام می‌شود. برای محاسبات میدان جریان، حل معادلات انتگرالی حاکم بر بقای جرم و مومنتم با استفاده از روش حجم محدود انجام شده‌است. از الگوریتم سیمپل برای کوپلینگ میدان‌های سرعت و فشار استفاده می‌شود. مدل توربولانسی k-ε استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی مورد استفاده قرار گرفته است.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی در مقاله حاضر نشان می‌دهد که مدل توربولانسی k-ε استاندارد توانایی پیش‌بینی قابل قبول عملکرد کمپرسور مذکور را داراست. چگالی شبکه در نزدیکی دیواره‌ها به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود تا y^+ کوچک‌تر از ۵ باشد.

1- Volute



شکل ۱ نمایی از تست ریگ کمپرسور گریز از مرکز آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران



الف) D_g مختلف در R_g ثابت ب) R_g مختلف در D_g ثابت

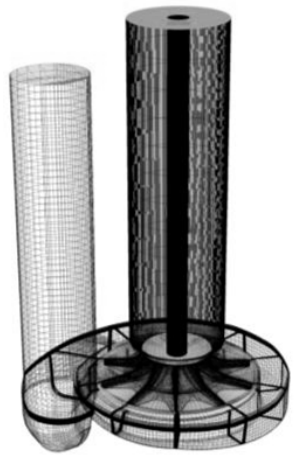
شکل ۲ حالات مختلف اصلاح پوسته

جدول ۱ پارامترهای هندسی ایمپلر و شرایط عملکردی

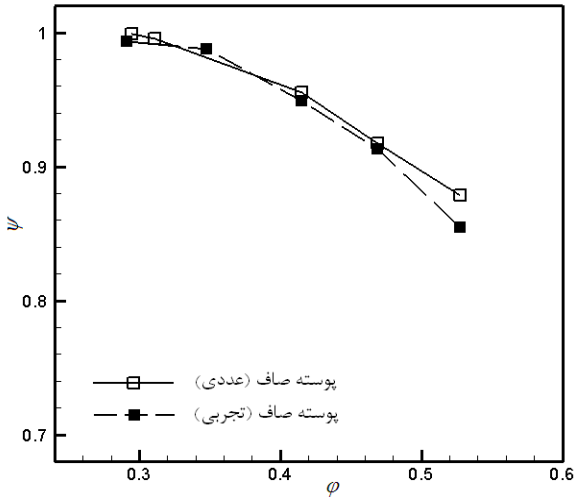
مشخصه	واحد	مقدار
قطر ورودی پرّه	mm	۶۳
قطر خروجی پرّه	mm	۱۴۵
طول وتر در نوک پرّه	mm	۴۶
تعداد پرّه	-	۱۰
سرعت دورانی	rpm	۸۴۰۰
فشار محیط	Pa	۸۷۵۰۰
دمای محیط	K	۳۰۰

جدول ۲ مشخصات حالات مختلف بررسی شده

	عمق بی‌بعد (D_g)	شعاع بی‌بعد (R_g)
حالت ۱ (پوسته صاف)	۰	۰
حالت ۲	۰/۰۱	۰/۲۱۶
حالت ۳	۰/۰۱۵	۰/۲۱۶
حالت ۴	۰/۰۲۴	۰/۲۱۶
حالت ۵	۰/۰۳۲	۰/۲۱۶
حالت ۶	۰/۰۲۴	۰/۲۶۹
حالت ۷	۰/۰۲۴	۰/۵۷۹
حالت ۸	۰/۰۲۴	۰/۶۲۰



شکل ۳ مش محاسباتی سطحی



شکل ۴ منحنی عملکرد عددی و تجربی برای پوسته صاف

بدین ترتیب با ریز شدن شبکه نزدیک دیواره‌ها و نوک پرّه، نرم‌افزار از تابع دیواره بهره نمی‌برد.

در فرآیند محاسبات عددی، تست همگرایی با شرط رسیدن مقادیر باقی‌مانده معادلات حاکم به حدود 10^{-7} انجام می‌گیرد.

همچنین با مانیتورینگ برخی از متغیرهای جریان، در محل برخی از سطوح مشخص، از روند تغییرات آن‌ها در طی فرآیند تکرار، به‌عنوان معیاری مضاعف برای همگرایی استفاده می‌شود. سرعت ورودی یکنواخت پایا و راستای جریان به‌عنوان شروط مرزی ورودی به نرم‌افزار اعمال می‌گردند. همچنین توزیع فشار پایا در مرز خروجی به‌عنوان شرط مرزی خروجی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرط مرزی عدم لغزش و آدیاباتیک بر روی کلیه سطوح جامد اعمال می‌گردد. برای انجام محاسبات از فریم‌های مرجع چندگانه[1] استفاده می‌شود. بنابراین ناحیه حل نسبت به یک فریم مرجع لخت به فریم‌های ساکن[2] و چرخان تقسیم می‌شوند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقایسه منحنی‌های عملکرد عددی و تجربی برای پوسته صاف

شکل ۴ منحنی‌های عملکرد تجربی[۱۵] و عددی $\psi - \varphi$ را برای کمپرسور مورد بررسی در دور چرخش ۸۴۰۰ دور بر دقیقه ارائه می‌نماید. ψ و φ، پارامترهای عملکردی کمپرسور بوده و به‌ترتیب عبارت‌اند از ضریب بار و ضریب جریان. پارامترهای مذکور به‌صورت ذیل تعریف می‌شوند:

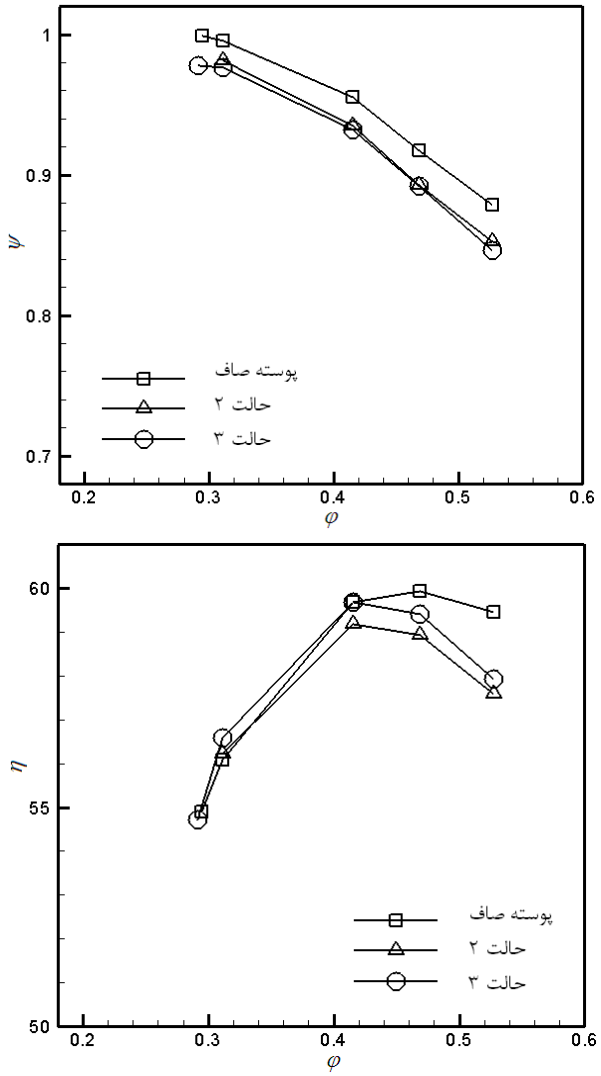
$$\varphi = \frac{Q}{\pi d_2 b_2 U_2} = \frac{C_{r2}}{U_2} \quad (۱)$$

$$\psi = \frac{\Delta P_\circ}{{}^{1}/_{2}\,\rho U_2{}^2} \quad (۲)$$

تکرارپذیری نتایج تجربی انجام گرفته در این تست، نشان داده است که دقت تکرارپذیری ٪۰/۲ می‌باشد. نقطه نزدیک استال کمترین ضریب جریان مربوط به عملکرد پایدار کمپرسور است. یک نقطه ناپایدار شامل نزول پیوسته میزان ضریب بار در منحنی عملکرد کمپرسور می‌باشد. براساس شکل ۴، نتایج شبیه‌سازی عددی از حیث تعیین عملکرد کلی کمپرسور تطابق مناسبی با داده‌های تجربی دارد.

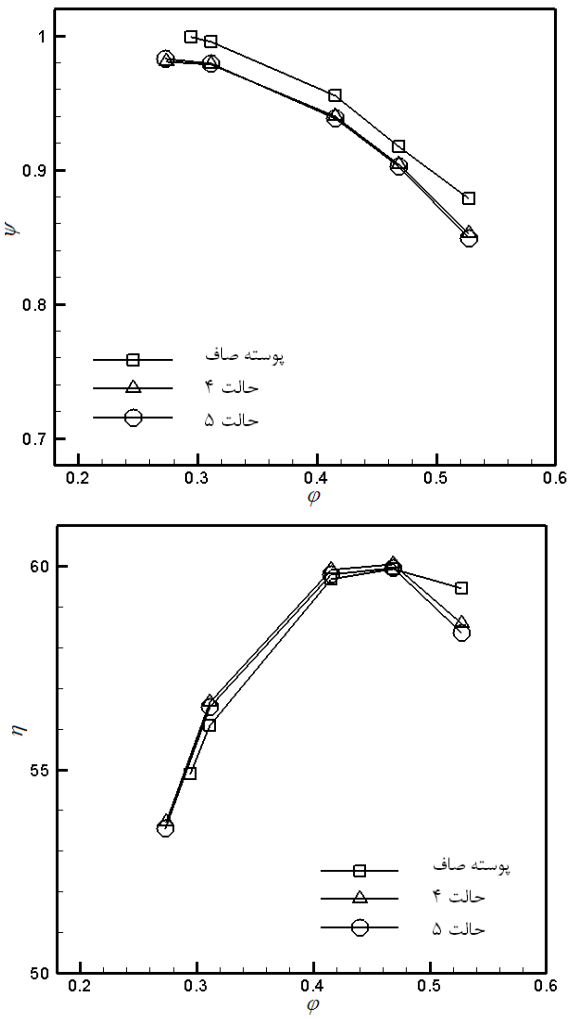
۴-۲- عملکرد کلی کمپرسور تحت تأثیر پوسته با درز نوک پلّه‌ای

منحنی‌های عملکرد $\psi - \varphi$ و $\eta - \varphi$ کمپرسور برای حالات مختلف اصلاح پوسته در شکل‌های ۵ الی ۸ نمایش داده شده است. مطابق شکل‌های ۵ الی ۸، اصلاحات در پوسته در برخی از حالات منجر به ارتقاء حاشیه استال کمپرسور در مقایسه با حالت پوسته صاف شده است. شکل‌های ۵ و ۶ تأثیرات عمق درز نوک پلّه‌ای را بر عملکرد کمپرسور ارائه می‌نمایند.



شکل ۵ منحنی‌های عملکرد کمپرسور برای حالات ۲ و ۳

1- Multiple reference frames
2- Stationary



شکل ۶ منحنی‌های عملکرد کمپرسور برای حالات ۴ و ۵

شکل ۵ نشان می‌دهد که حالت ۳، حاشیه استال را به میزان ٪۱/۱۱ افزایش می‌دهد؛ در حالی‌که حالت ۲ تأثیر منفی بر حاشیه استال داشته و منجر به کاهش ٪۵/۵۷- حاشیه استال می‌گردد. با افزایش میزان عمق درز نوک پلّه‌ای (D_g) در شکل ۶، میزان حاشیه استال کمپرسور افزایش می‌یابد. لیکن تغییر قابل ملاحظه‌ای در حاشیه استال بین حالات ۴ و ۵ رخ نمی‌دهد (٪۷/۰۹ برای حالت ۴ در مقایسه با ٪۷/۳۸ برای حالت ۵). همچنین بازده در کل گستره دبی جرمی کمپرسور با افزایش عمق درز نوک پلّه‌ای، بهبود می‌یابد. همان‌گونه که از شکل‌های ۵ و ۶ بر می‌آید رابطه‌ای مستقیم بین بهبود حاشیه استال کمپرسور و عمق درز نوک پلّه‌ای وجود دارد.

شکل‌های ۷ و ۸ تأثیر طول شعاعی درز نوک پلّه‌ای را بر عملکرد کمپرسور نمایش می‌دهند. براساس شکل ۷، حالت ۶ که در آن درز نوک پلّه‌ای از ٪۶۰ الی ٪۱۰۶ طول وتر گسترده شده است منجر به بهبود حاشیه استال کمپرسور به میزان ٪۵/۹۷ می‌گردد. لیکن همچنان این بهبود حاشیه استال کمتر از حالت ۴ که در آن درز نوک پلّه‌ای بین ٪۷۰ الی ٪۱۰۶ طول وتر قرار گرفته می‌باشد.

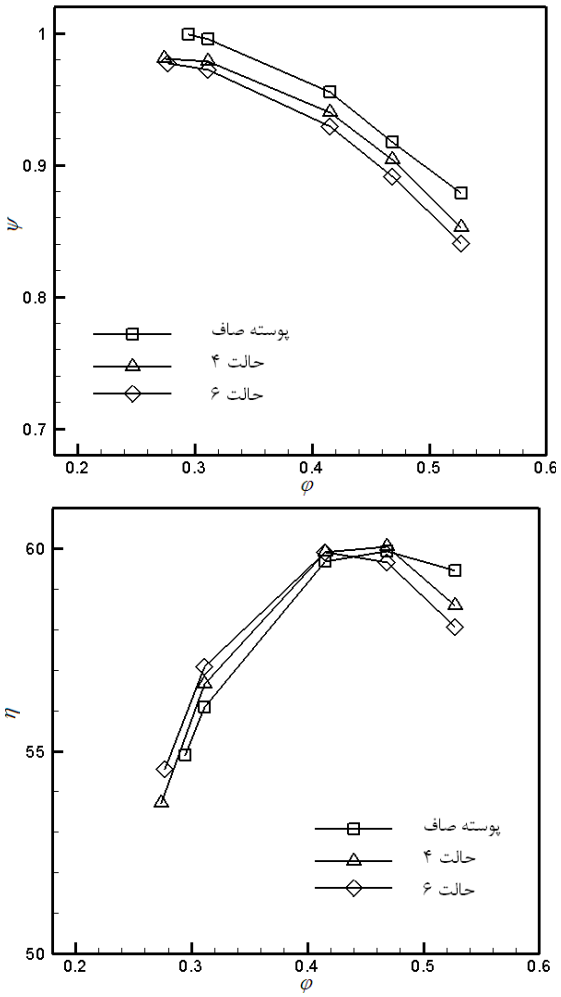
حالت ۷ منجر به کاهش حاشیه استال کمپرسور به میزان ٪۲/۴۸- در مقایسه با پوسته صاف (حالت ۱) می‌گردد. از شکل ۸ می‌توان دریافت که حالت ۸ که در آن درز نوک پلّه‌ای میان ٪۳- الی ٪۱۰۶ طول وتر گسترده شده، بدترین حالت در میان حالات موجود از نقطه نظر ارتقاء عملکرد کمپرسور است. حالت ۸ منجر به کاهش ٪۱۲/۶۱- حاشیه استال کمپرسور در مقایسه با پوسته صاف (حالت ۱) گردیده و سبب می‌شود تا کمپرسور در دبی جرمی بزرگتری در مقایسه با حالت ۱ دچار استال گردد. بنابراین، می‌توان دریافت که هرچه طول شعاعی درز نوک پلّه‌ای کمتر باشد، حاشیه استال کمپرسور نیز بیشتر افزایش خواهد یافت.

در حالت ۸، درز نوک کمپرسور افزایش یافته است. افزایش نسبت درز نوک (اندازه درز نوک به طول وتر در نوک) از ٪۱/۳ (حالت ۱) به ٪۳/۷ (حالت ۸) منجر به افزایش اختلاف فشار میان سطح فشار و مکش پرّه و در نتیجه جریان نشتی نوک پرّه قوی‌تر می‌گردد. بنابراین همان‌گونه که انتظار نیز می‌رود، ضریب بار (ψ)، بازده و حاشیه استال با افزایش میزان درز نوک پرّه کاهش خواهند یافت (مطابق شکل ۸).

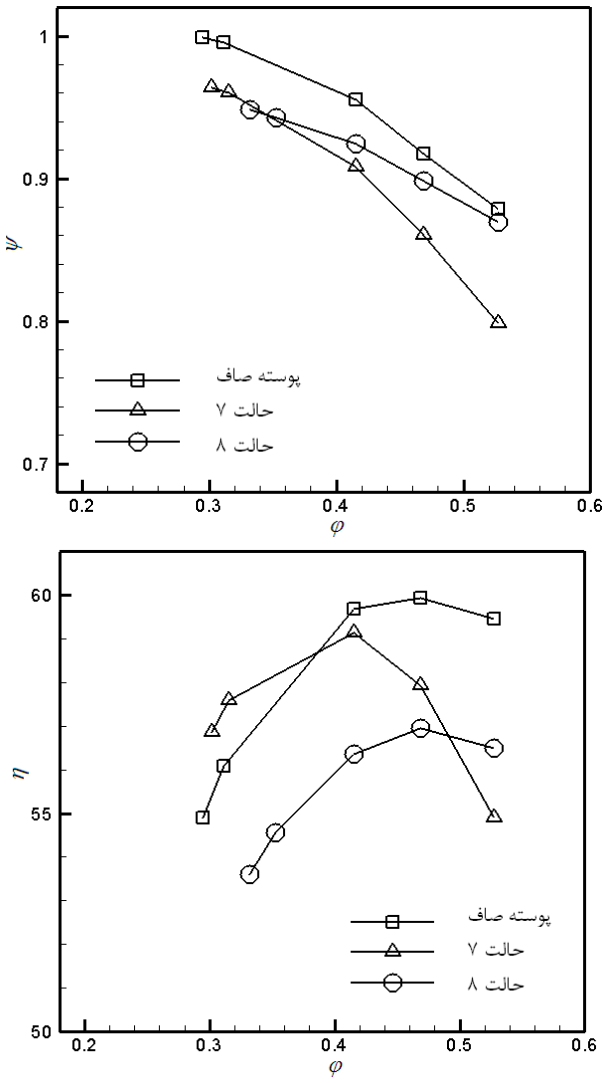
شکل ۹ تغییرات حاشیه استال ($\Delta\varphi$) کمپرسور را در حالات مختلف شیار پوسته نمایش می‌دهد. از نقطه نظر بهبود حاشیه استال، حالات ۴ و ۵ بهینه‌ترین حالات اصلاح پوسته در میان تمامی حالات بیان شده در این مقاله بدون تأثیر منفی بر روی عملکرد کمپرسور (به‌جز در دبی جرمی‌های زیاد) می‌باشند.

۴-۳- نتایج ارزیابی میدان جریان با وجود پوسته با درز نوک پلّه‌ای

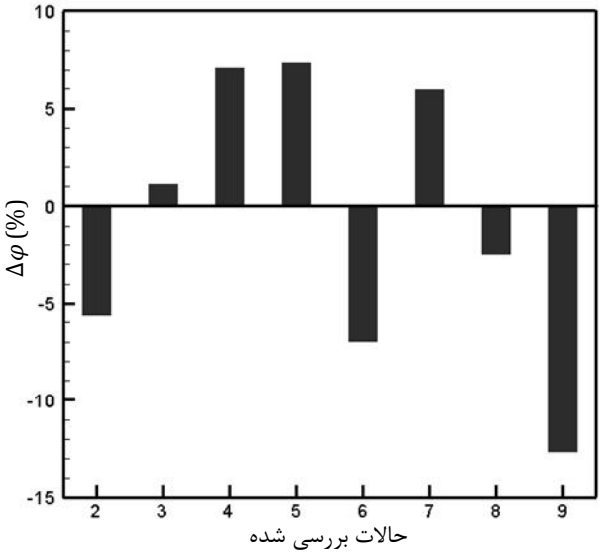
کانتورهای سرعت در صفحات نصف‌النهاری در زوایای °۰، °۹۰، °۱۸۰ و °۲۷۰ و برای حالت نزدیک استال در شکل ۱۰ و برای پوسته صاف (حالت ۱) و پوسته با درز نوک پلّه‌ای (حالت ۴) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۷ منحنی‌های عملکرد کمپرسور برای حالات ۴ و ۶



شکل ۸ منحنی‌های عملکرد کمپرسور برای حالات ۷ و ۸



شکل ۹ تغییر حاشیه استال کمپرسور برای حالات مختلف درز نوک پلّه‌ای

زوایای مذکور در شکل ۱۰-الف نمایش داده شده‌اند. براساس شکل ۱۰ برای زوایای مختلف، یک ناحیه چرخشی محلی در نزدیکی پوسته و در بخش انتهایی ایمپلر برای پوسته صاف ایجاد می‌گردد. این ناحیه چرخشی به‌دلیل نفوذ جریان نشتی نوک پرّه به درون گذرگاه تشکیل می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نیز دیده می‌شود با بهره‌گیری از پوسته با درز نوک پلّه‌ای بین ٪۷۰ الی ٪۱۰۶ طول وتر (حالت ۴)، این ناحیه چرخشی کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

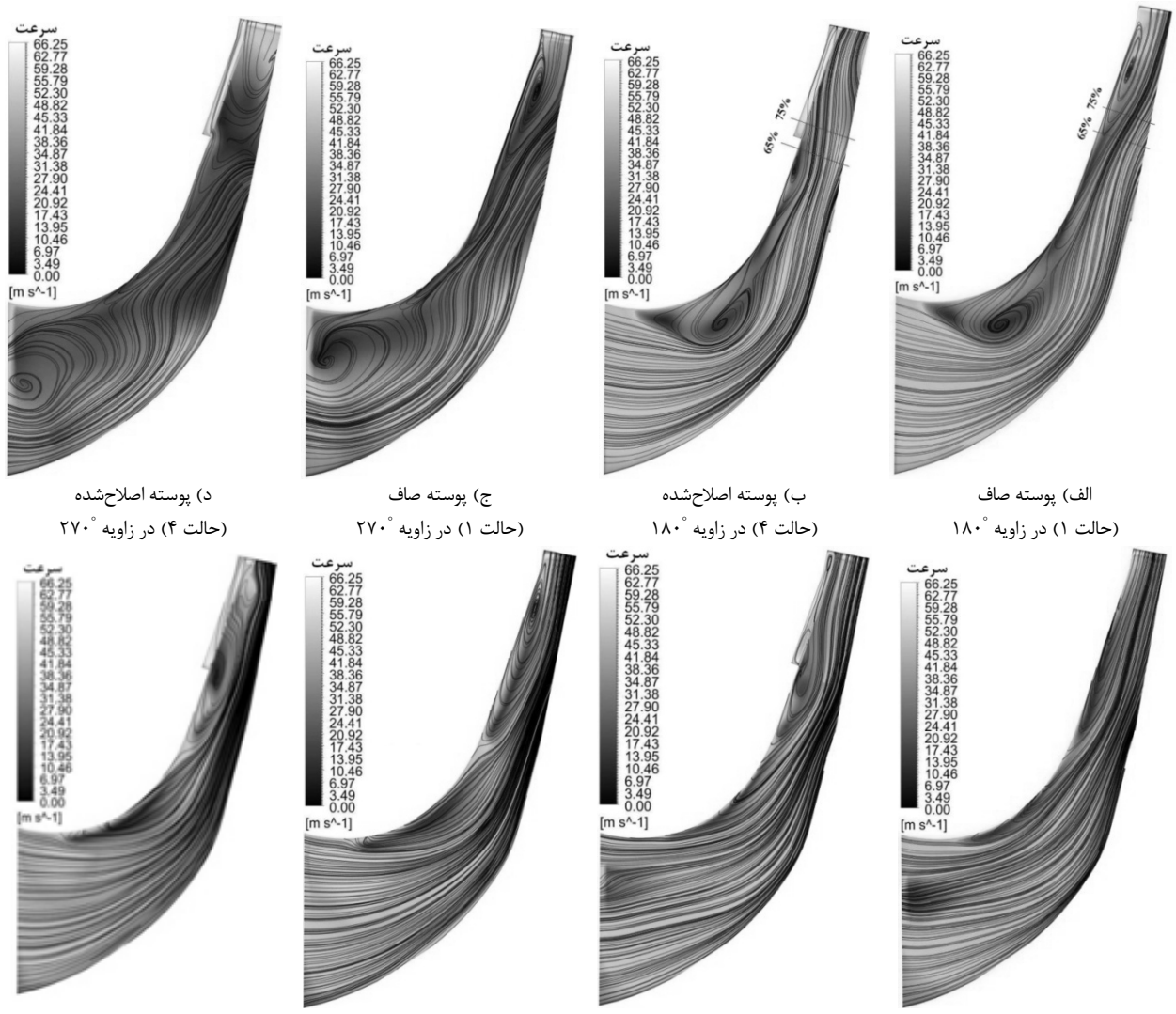
در شرایط پوسته صاف، وجود ناحیه چرخشی کم انرژی محلی نزدیک پوسته سبب ایجاد انسداد در گذرگاه می‌گردد. این انسداد سبب کاهش ناحیه موثر جریان عبوری در گذرگاه و در نتیجه انحراف جریان اصلی عبوری از گذرگاه پرّه‌ها در اطراف این ناحیه کم انرژی می‌گردد. بنابراین، جریان اصلی کمپرسور دچار جدایش شده و استال در طبقه کمپرسور رخ می‌دهد. با اعمال اصلاح در پوسته، جریان نشتی نوک پرّه تضعیف شده و ناحیه چرخشی نزدیک پوسته ازمیان خواهد رفت.

تضعیف جریان نشتی نوک پرّه با بهره‌گیری از پوسته با درز نوک پلّه‌ای را می‌توان از طریق نمایش گسترش دبی نشتی نوک پرّه در طول وتر در نوک ارزیابی نمود. برای این منظور بر روی صفحه S که در واقع صفحه درز نوک ایمپلر است، دبی جریان نشتی نوک انتگرال‌گیری می‌گردد (مطابق شکل ۱۱). در شکل ۱۲، گسترش میزان دبی جرمی نشتی نوک در صفحه S و در طول وتر در نوک پرّه برای حالت پوسته صاف (حالت ۱) و حالت پوسته با درز نوک پلّه‌ای (حالات ۴ و ۵) نمایش داده شده است.

همان‌گونه که انتظار می‌رود، با بهره‌گیری از پوسته اصلاح‌شده، اختلاف فشار میان سطح فشار و مکش در طول وتر پرّه کاهش می‌یابد. بنابراین به‌تبع آن دبی جرمی نشتی نوک پرّه نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت (٪۵۰/۸- و ٪۵۴/۴- به‌ترتیب برای حالات ۴ و ۵). محدود شدن میزان دبی جرمی جریان نشتی نوک پرّه سبب افزایش ناحیه موثر جریان عبوری از گذرگاه می‌گردد. بنابراین نقطه استال با وجود پوسته با درز نوک پلّه‌ای به دبی‌های جرمی کمتر منتقل می‌گردد. لذا گستره ناحیه عملکرد پایدار کمپرسور افزایش می‌یابد.

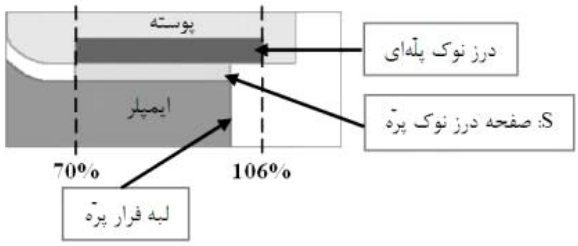
خطوط جریان مربوط به جریان‌های ثانویه در صفحات افقی قرار گرفته در ٪۶۵ و ٪۷۵ طول وتر در نوک برای شرایط نزدیک استال در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده‌اند. موقعیت این صفحات در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۳-الف و ۱۴-الف نیز مشاهده می‌گردد یک ناحیه چرخشی در نزدیکی نوک پرّه در سطح مکش برای حالت پوسته صاف شکل می‌گیرد. این ناحیه چرخشی حاصل نفوذ جریان نشتی نوک پرّه به گذرگاه پرّه و نیز برهم‌کنش این جریان با جریان اصلی عبوری از گذرگاه پرّه است. وجود چنین ناحیه چرخشی‌ایی سبب کاهش سطح موثر جریان عبوری از گذرگاه می‌گردد. مقایسه شکل ۱۳-الف با شکل‌های ۱۳-ب و ۱۳-ج و همچنین شکل ۱۴-الف با شکل‌های ۱۴-ب و ۱۴-ج نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از پوسته با درز نوک پلّه‌ای، این جریان چرخشی تضعیف شده و همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد انسداد جریان درون گذرگاه نیز کاهش خواهد یافت. این امر نیز به نوبه خود سبب بهبود عملکرد کمپرسور می‌گردد.

مقایسه شکل ۱۳-الف با شکل‌های ۱۳-ب و ۱۳-ج و همچنین شکل ۱۴-الف با شکل‌های ۱۴-ب و ۱۴-ج نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از پوسته با درز نوک پلّه‌ای، این جریان چرخشی تضعیف شده و همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد انسداد جریان درون گذرگاه نیز کاهش خواهد یافت. این امر نیز به نوبه خود سبب بهبود عملکرد کمپرسور می‌گردد.



الف) پوسته صاف (حالت ۱) در زاویه °۱۸۰
ب) پوسته اصلاح‌شده (حالت ۴) در زاویه °۱۸۰
ج) پوسته صاف (حالت ۱) در زاویه °۲۷۰
د) پوسته اصلاح‌شده (حالت ۴) در زاویه °۲۷۰
ه) پوسته صاف (حالت ۱) در زاویه °۰
و) پوسته اصلاح‌شده (حالت ۴) در زاویه °۰
ز) پوسته صاف (حالت ۱) در زاویه °۹۰
ح) پوسته اصلاح‌شده (حالت ۴) در زاویه °۹۰

شکل ۱۰ کانتورهای سرعت برای پوسته صاف (حالت ۱) و پوسته با درز نوک پلّه‌ای (حالت ۴) در صفحات نصف‌النهاری برای شرایط نزدیک استال

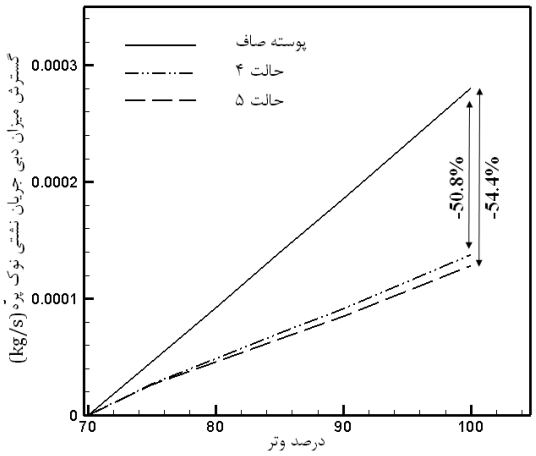


شکل ۱۱ موقعیت صفحه به‌منظور انتگرال‌گیری دبی جرمی نشتی نوک پرّه

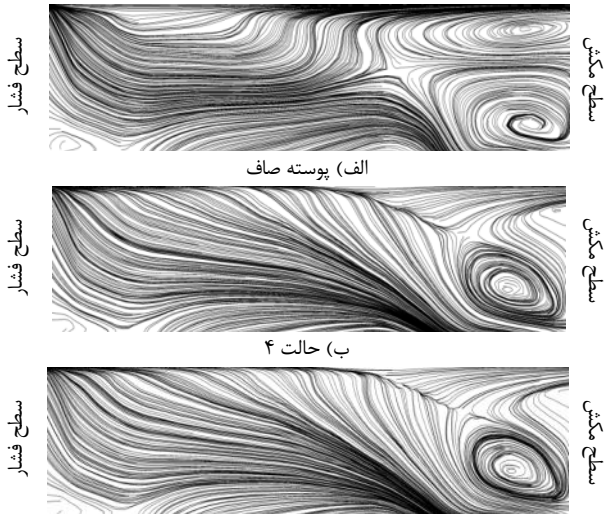
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیرات پوسته با درز نوک پلّه‌ای بر عملکرد یک کمپرسور گریز از مرکز به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. هفت پیکربندی هندسی مختلف برای پوسته اصلاح شده بررسی و نتایج با نتایج مربوط به پوسته صاف به‌منظور یافتن هندسه بهینه شیار مقایسه گردیدند. مهم‌ترین نتایج حاصل از مقاله حاضر به‌صورت ذیل قابل جمع‌بندی می‌باشد:

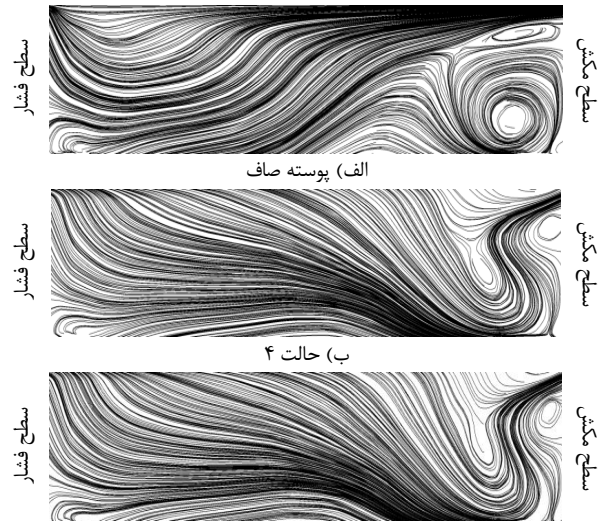
- پوسته با درز نوک پلّه‌ای با عمق بیشتر و طول شعاعی کمتر سبب بهبود حاشیه استال کمپرسور می‌گردد.
- انتخاب هندسه و موقعیت بهینه با درز نوک پلّه‌ای از میان حالات مختلف ممکن، به کاربرد و شرایط عملکردی کمپرسور وابسته می‌باشد. لذا انتخاب حالت بهینه با درز نوک پلّه‌ای به اهداف مد نظر در طراحی یک کمپرسور وابسته است.



شکل ۱۲ گسترش میزان دبی جرمی نشتی نوک پرّه در صفحه برای پوسته صاف و اصلاح‌شده



شکل ۱۳ الگوی خطوط جریان‌های ثانویه در صفحات افقی معادل ٪۶۵ طول وتر در نوک برای شرایط نزدیک استال



شکل ۱۴ الگوی خطوط جریان‌های ثانویه در صفحات افقی معادل ٪۷۵ طول وتر در نوک برای شرایط نزدیک استال

– افزایش درز نوک پرّه سبب کاهش ضریب بار (ψ) و بازده کمپرسور می‌گردد. با افزایش نسبت درز نوک پرّه از ٪۱/۳ به ٪۳/۷ مقدار حاشیه استال کمپرسور به میزان ٪۱۲/۶۱- کاهش می‌یابد.

– شرایط پوسته صاف توأم با جریان نشتی نوک پرّه قوی است. نفوذ جریان نشتی نوک پرّه و برهم‌کنش آن با جریان اصلی گذرگاه سبب تشکیل یک ناحیه کم انرژی در نزدیک پوسته می‌گردد. در نتیجه سطح موثر گذرگاه عبوری جریان کاهش می‌یابد. در شرایط نزدیک استال، جریان اصلی عبوری از گذرگاه، حول این ناحیه کم انرژی منحرف شده و منجر به رخداد استال در گذرگاه کمپرسور می‌گردد.

– با اعمال اصلاح در پوسته و ایجاد پوسته با درز نوک پلّه‌ای، جریان نشتی نوک پرّه محدود خواهد شد. در نتیجه سطح موثر گذرگاه جریان نیز افزایش می‌یابد. وجود پوسته با درز نوک پلّه‌ای سبب گسترش گستره عملکردی کمپرسور و انتقال نقطه استال کمپرسور به دبی‌های جرمی کمتر بدون تأثیر منفی بر روی بازده کمپرسور (به‌جز در دبی‌های جرمی زیاد)، برخلاف آن‌چه در سایر روش‌های متداول در کنترل ناپایداری‌ها در کمپرسور معمول است، می‌گردد.

۶- فهرست علائم

b_2	عرض ایمپلر در خروج (mm)
C	طول وتر پرّه در نوک (mm)
C_{r2}	سرعت شعاعی در خروج از ایمپلر (ms^{-1})
d_2	قطر خارجی ایمپلر (mm)
d_g	عمق درز نوک پلّه‌ای در لبه فرار پرّه (mm)
$D_g= d_g/C$	عمق بی‌بعد درز نوک پلّه‌ای
R_2	شعاع خارجی ایمپلر (mm)
r_g	طول شعاعی درز نوک پلّه‌ای (mm)
$R_g= r_g/R_2$	طول شعاعی بی‌بعد درز نوک پلّه‌ای
U_2	سرعت محیطی در خروج از ایمپلر در نوک (ms^{-1})
Q	نرخ دبی حجمی (m^3s^{-1})
ΔP_s	اختلاف فشار سکون (Pa)
y^+	فاصله دیواره بی‌بعد
S	صفحه درز نوک پرّه

علایم یونانی

ρ	دانسیته سیال (kgm^{-3})
φ	ضریب جریان
ψ	ضریب بار

۷- مراجع

[1] S. eslami, *Numerical and experimental analysis of tip leakage flow of axial compressor blades*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2012. (In Persian)

[2] H. G. Zhang, W. L. Chu, Numerical investigation of the circumferential grooved casing treatment as well as analyzing the mechanism of improve stall margin, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Mechanics*, Shanghai, China, 2007.

[3] Q. Yu, Q. Li, L. Li, The experimental researches on improving operating stability of a single-stage transonic fan, in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002,* Amsterdam, Netherlands, 2002.

[4] W. XU, T. Wang, C. G. Gu, Performance of a centrifugal compressor with holed casing treatment in the large flowrate condition, *Science China Technology Science,* Vol. 54, No. 9, pp. 2483–2492, 2011.

[5] P. Gao, W. L. Chu, Y. H. Wu, The mechanism of stall margin improvement in a centrifugal compressor with the air bleeding circumferential grooves casing treatment, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Mechanics*, Shanghai, China, 2007.

[6] G. Legras, N. Gourdain, I. Trebinjac, Numerical analysis of the tip leakage flow field in a transonic axial compressor with circumferential casing treatment, *Journal of Thermal Science*, Vol. 19, No.3, pp. 198–205, 2010.

[7] P. Gao, Y. Zhang, S. Zhang, Numerical investigation of the different casing treatment in a centrifugal compressor, in *2010 Asia-Pacific Conference on Wearable Computing Systems,* Shenzhen, China, pp. 51-54, 2010.

[8] P. Gao, S. Zhang, The analysis of tip flow field in a centrifugal compressor with different circumferential grooves casing treatment, in *2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, Chengdu, China, pp. 21-24, 2010.

[9] A. S. Hassan, *Stability of a Low-Speed Centrifugal Compressor with Casing Treatments*, in: V. A. Skibin, V. E. Saren, N. M. Savin, S. Frolov, *Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics and Unsteady Aerodynamics*, Eds., pp. 406-420, Moscow: TORUS Press, 2006.

[10] l. Wilke, H. P. Kau, A numerical investigation of the influence of casing treatments on the tip leakage flow in a HPC front stage, in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002,* Amsterdam, Netherlands, 2002.

[11] D. C. Rabe, C. Hah, Application of casing circumferential grooves for improved stall margin in a transonic axial compressor, in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002,* Amsterdam, Netherlands, 2002.

[12] R. Taghavi-Zenouz, S. Eslami, The 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, No. 7, pp. 819-830, 2012.

[13] D. W. Thompson, P. I. King, D. C. Rabe, Experimental investigation of stepped tip gap effects on the performance of a transonic axial-flow compressor rotor, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, No. 3, pp. 477-486, 1998.

[14] X. Lu, J. Zhu, W. Chu, Numerical and experimental investigation of stepped tip gap effects on a subsonic axial-flow compressor rotor, *Proceeding of Institute of Mechanical Engineering Part A-Journal of Power and Energy*, Vol. 219, No. 8, pp. 605-615, 2005.

[15] M. R. Aghamohammadrabie, R. Taghavi-zenouz, E. Solki, Experimental analysis of pressure coefficient distribution along a centrifugal compressor impeller blades with variable tip clearance at different operating conditions, in *The 2th National Gas Turbine Conference*, Tehran, Iran, 2013. (In Persian)