

# بررسی اثر اعمال شیار محیطی در پوسته بر رفتار جریان و عملکرد یک کمپرسور چرخش معکوس

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، s\_abbasi@arakut.ac.ir  
کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، shahab74asteroid@gmail.com

ناراله عباسی\*  
شهاب اسمعیل زاده ولی

## چکیده

در این مقاله به بررسی عددی اثر اعمال اصلاح پوسته از نوع شیار محیطی بر بهبود عملکرد یک کمپرسور محوری چرخش معکوس دوطبقه گذر صوت پرداخته شده است. نتایج بر اساس شبیه‌سازی عددی جریان لزوج به صورت سه‌بعدی با حل معادلات ناویر-استوکس شامل معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی و با استفاده از نرم‌افزار تجاری Ansys CFX ارائه گردیده‌است. در ابتدا، به منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصله با نتایج سایر محققان مقایسه گردیده که تطابق خوبی مشاهده می‌گردد. بررسی منحنی عملکرد کمپرسور در دو حالت پوسته صاف و پوسته شیاردار حکایت از افزایش حاشیه استال در این کمپرسور به میزان حدود ۸٪ دارد. مشاهده می‌گردد که اعمال پوسته شیاردار در شرایط نزدیک استال رخداد سلول استال و پخش محیطی و محوری آن را کاهش می‌دهد. با توجه به تضعیف جریان نشتی نوک در حالت پوسته شیاردار، فصل مشترک جریان اصلی و جریان نشتی نوک به سمت پایین دست گذرگاه حرکت می‌کند. علاوه بر خورد جریان نشتی نوک و امواج شوک نیز که منجر به تولید افت‌های زیاد می‌شود به پایین دست منتقل می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** کمپرسور محوری چرخش معکوس؛ استال؛ شبیه‌سازی عددی؛ منحنی عملکرد؛ پوسته صاف و شیاردار؛ پوسته از نوع شیار محیطی.

## Investigation of the effect of casing circumferential groove on the performance of a contra rotating compressor

S. Abbasi  
Sh. Esmailzadeh Vali

Department of Mechanical Engineering, Arak University of technology, Arak, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Arak University of technology, Arak, Iran

## Abstract

In this paper, the effect of circumferential groove-type casing treatment on improving the performance of a two-stage contra rotating axial compressor is investigated numerically. The results are presented based on numerical simulation of viscous flow in three dimensions by solving Navier-Stokes equations including continuity, momentum and energy using Ansys CFX software. Initially, in order to validate, the results are compared with the results of other researchers and a good agreement is observed. Examination of the compressor performance curve in both smooth and grooved casing indicates an increase in the stall margin in this compressor by about 8%. It is observed that the application of grooved casing in near-stall conditions reduces the occurrence of stall cells and its peripheral and axial distribution. Due to the attenuation of the tip leakage flow in the grooved shell, the interface between the main flow and the tip leakage flow moves downstream of the passage. In addition, the impact of leakage flows and shock waves, which leads to the production of large losses, is transmitted to downstream.

**Keywords:** Counter-Rotating Axial Compressor; Stall; Numerical Simulation; Performance Curve; smooth and grooved casing; circumferential groove-type casing.

مثلث‌های سرعت در یکی از آرایش‌های رایج در کمپرسورهای چرخش معکوس (آرایش روتور-روتور) نشان داده شده‌است.

ایده اصلی کمپرسور چرخش معکوس، دستیابی به فشار بیشتر با استفاده از مراحل کمتر است. در این گونه کمپرسورها وزن هر مرحله از کمپرسور با یکدیگر متفاوت است. کمپرسور ضد چرخش در نهایت وزن موتور را کاهش می‌دهد که به نوبه خود موجب مصرف سوخت کمتری می‌گردد. اگر بتوان از این نوع کمپرسور استفاده کرد تا بتوان اندازه و طراحی موتور را جمع و جور کرد، تعادل و پایداری بهتری نیز به دست می‌آید. بر این اساس با توسعه موتورهای توربوفن بای پس فوق العاده بالا از طریق بکارگیری فن‌های محوری چرخش معکوس، صرفه‌جویی در مصرف سوخت تا ۳۰ تا ۴۰ درصد قابل دستیابی است.

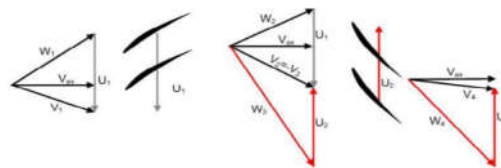
## ۱- مقدمه

در موتورهای توربین گاز معمولی، کمپرسور متشکل از روتورهای است که در همان جهت متصل به یک شفت حرکت می‌کنند. از سوی دیگر، چرخش معکوس مفهومی است که در آن روتورها به طور متوالی در جهت مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند. در سال‌های اخیر، علاقه قابل‌توجهی به آیرودینامیک کمپرسور و فن جریان محوری چرخش معکوس، عمدتاً به دلیل کاربرد عملی آن در موتورهای هواپیماهای نسل آینده، به وجود آمده است. در چنین مرحله‌ای، دو روتور در حال چرخش در جهت مخالف یکدیگر با استاتور و یا بدون آن استفاده می‌شوند. محرک این روتورها می‌تواند مستقیماً توسط یک توربین چرخش معکوس و یا از طریق جعبه دنده تأمین شود. یک طبقه با چرخش معکوس به صورت فوق، ظرفیت جریان بسیار بیشتری را در مقایسه با طبقه روتور-استاتور رایج تأمین می‌کند. در شکل ۱

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s\_abbasi@arakut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۵/۲۴



شکل ۱- مثلث های سرعت در یک نمونه پره های روتور ضد چرخش

در عملکرد معمولی یک کمپرسور، جریان هوای عبوری از کمپرسور اساساً پایا و متقارن محوری می‌باشد. محدوده عملکرد پایدار برای کمپرسورهای محوری و گریز از مرکز در هر دو نرخ جریان جرمی بسیار بالا و بسیار کم محدود می‌گردد. اگر ناپایداری جریان به دلیل نوسانات فشار، جدایش جریان در ورودی یا سایر انواع اغتشاشات جریان به سیستم ایجاد شود ممکن است ناپایداری ها گسترش یافته و عملکرد کمپرسور را مختل نمایند. در تولید و مونتاژ، تیغه های روتور کمپرسور ممکن است با پروفیل های کمی متفاوت یا با زوایای نصب بالاتر تولید شوند. استال چرخشی زمانی اتفاق می افتد که زاویه برخورد جریان به پره روتور کمپرسور خیلی زیاد شود. این امر باعث جدا شدن جریان هوا از سطح مکش تیغه روتور که به آن استال می گویند. ناحیه استال جریان که با عنوان سلول استال نیز شناخته می شود، در جهت محیطی کمپرسور همسو با چرخش روتور از پره‌ای به پره‌ی دیگر حرکت می‌کند. این امر منجر به ایجاد استال دورانی می‌گردد. استال دورانی یک اختلال در جریان هوا در داخل کمپرسور است که باعث توقف کامل ایجاد هوای فشرده نمی‌شود اما راندمان آن را کاهش می‌دهد. گسترش سلول‌های استال و انسداد کامل جریان در کمپرسور منجر به رخداد پدیده سرچ می‌گردد که در آن کمپرسور قادر به عملکرد نمی‌باشد. در سرعت‌های دورانی پایین، ممکن است طبقات ابتدایی کمپرسور دچار استال دورانی شوند. استال دورانی نسبت به محور قرینه نیست و باعث ایجاد جریان غیر یکنواختی حول محیط کمپرسور می‌شود که با سرعتی معادل ۲۰ تا ۵۰ درصد روتور و هم جهت با آن می‌چرخد. بررسی‌های انجام‌شده در یک مرحله کمپرسور چرخش معکوس مجرادار نشان داده‌است که عملکرد کمپرسور در شرایط خارج طرح به ویژه از لحاظ رخداد استال دورانی به طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. شدت استال دورانی کاهش یافته و استال دورانی در نرخ جریان کمتری رخ می‌دهد. این خاصیت چرخش معکوس مزیت مازادی را در بهبود پایداری عملکرد طبقات فن و کمپرسور در موتورهای توربوفن نسل آینده ایجاد می‌کند.

عملکرد پایدار و ایمن موتورهای جت هواپیما در شرایط مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است. این امر در کمپرسورها بخصوص در شرایط نزدیک استال بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در این خصوص دی [۱] با مروری بر تحقیقات در رابطه با استال دورانی اظهار داشت که این پدیده یکی از رخداد‌های ناگوار در کمپرسور است که باید از وقوع و تداوم آن اجتناب نمود. ناپایداری جریان و عوارض جانبی رخداد استال موجب می‌شوند که کمپرسورها نتوانند در دبی‌های جرمی کم عملکرد مطلوبی داشته‌باشند. امروزه طراحی موتورهای هوازی با راندمان و کارایی بالا بسیار مورد توجه‌است. تحت شرایط نزدیک استال بار آیرودینامیکی روی پره‌ها افزایش می‌یابد. با این حال دستیابی به

حاشیه استال کافی و بهبود آن بسیار دشوار است. در سالهای اخیر، تلاش‌های زیادی برای افزایش حاشیه استال کمپرسورها و فن‌ها انجام شده‌است. در این راستا، تحقیقات متعددی پیرامون بکارگیری روش‌های فعال و غیرفعال به منظور توسعه محدوده‌ی عملکردی پایدار کمپرسور انجام شده‌اند [۲ و ۳]. اصلاح پوسته یکی دیگر از روش‌های بهبود حاشیه استال می‌باشد. استفاده از پوسته‌های اصلاح شده برای اولین بار توسط ویلد مطرح شد [۴]. نحوه اعمال اصلاح در پوسته می‌تواند از طریق اعمال شیار محیطی [۵]، شکاف‌ها [۶]، سوراخ‌های بازچرخشی مکشی [۷] و درز نوک پله‌ای [۸] انجام شود. یکی از مشهورترین مشاهدات در خصوص اصلاح پوسته توسط کخ [۹] انجام شد. در این تحقیق پیکربندی‌های متفاوتی استفاده شده و اثرات آنها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج موفقیت‌آمیز این پوسته‌ها در کنترل لایه مرزی در ناحیه نوک پره، شرکت جنرال الکتریک آزمایش‌هایی را بر روی یک کمپرسور تک مرحله‌ای سرعت بالا انجام داد. نتایج آنان نشان داد که استفاده از پوسته متخلخل موجب تاحیر در وقوع ناپایداری‌های جریان می‌شود [۴].

فوجیتا و همکاران [۱۰] نیز نشان دادند که انواع شکل‌ها برای پوسته اصلاح شده بر بهبود حاشیه استال اثرات متفاوتی دارند. تاکادا و همکاران [۱۱] برای اولین بار اهمیت جهت شیارهای مورب را بر روی راندمان و حاشیه استال مطرح کردند. نتایج آنها از تاثیر قابل توجه شیارهای مورب بر گسترش ناحیه استال حکایت دارد.

گوریدین و همکاران [۱۲ و ۱۳] دو روش مختلف را جهت غلبه بر ناپایداری‌های یک کمپرسور مادون‌صوت در نظر گرفتند. روش اول اصلاح پوسته با استفاده از شکاف های نامتقارن و روش دوم استفاده از یک شیار طولی در نوک پره بود. مشخص گردید که بکارگیری شیار طولی در نوک پره موجب افزایش ناحیه عملکرد و نسبت فشار سکون به میزان ۶٪ گردید. همچنین موجب کاهش ناحیه انسداد جریان در نزدیکی لبه حمله گردید. در ضمن مشاهدات آنها نشان داد که بیشترین میزان بازچرخش درون شکاف زمانی به وقوع می‌پیوندد که قسمت انتهایی شکاف در مقابل سطح فشار پره و قسمت جلویی شکاف بالای سطح مکش در لبه حمله واقع شود. در زمینه بکارگیری هندسه‌های مختلف برای اصلاح پوسته محققان دیگری نیز تحقیقات مختلفی انجام داده‌اند. به عنوان نمونه کروک و همکاران [۱۴] و وایلیک و همکاران [۱۵]، در خصوص شیارهای محوری زاویه‌دار، لیو و همکاران [۱۶] در مورد شیارهای خمیده و لیو و همکاران [۱۷]، دجگه‌ری و همکاران [۱۸] و دو و همکاران [۱۹] نیز شیارهای محوری به صورت نیم دایره را مورد بررسی قرار داده‌اند. سری و همکارانش [۲۰] به بررسی اثر شیار بر روی یک کمپرسور شعاعی به صورت عددی پرداختند. آن‌ها دو پوسته مختلف یکی با دو شیار و دیگری با سه شیار در کمپرسور ایجاد نمودند و نشان دادند که در حالت استفاده از دو شیار نسبت فشار به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. شیواویگی و همکاران [۲۱] به صورت عددی به بررسی اثر شیارهای شعاعی و محوری بر عملکرد کلی و حاشیه استال یک کمپرسور محوری پرداختند. نتایج آنها انتقال سیال با انرژی کم در سطح فشار روتورها به داخل شیارها و بازگشت آنها به سطح مکش پره را نشان دادند. مشخص گردید که تداخل جریان داخل شیارها و جریان در گذرگاه اصلی پره در دبی جرمی کم قوی می‌باشد.

با افزایش اندازه درز نوک از مقادیر نرمال به مقادیر زیاد موجب انتقال رخداد استال از روتور دوم به روتور اول می شود. پاندلیز [۲۳-۳۲] در بررسی های تجربی خود به بررسی اثر اصلاح پوسته در یک کمپرسور محوری چرخش معکوس سرعت پایین و مطالعه فاکتورهای مختلف آن پرداختند. انواع مختلف اصلاح پوسته در نسبتهای سرعت مختلف و فواصل متفاوت بین روتورها طبقه مورد بررسی قرار گرفتند. تغییرات شعاعی ساختار جریان و کمیت فشار در پایین دست روتورهای چرخش معکوس در حالت پوسته صاف و پوسته اصلاح شده بررسی گردیدند. در این مطالعه ساختار جریان مورد بررسی قرار نگرفته است و فقط پارامترهای عملکردی فشار و افت مورد بررسی قرار گرفتند. هنریک و همکاران [۳۴] به بررسی عددی اثر شیار محیطی در یک فن محوری چرخش معکوس پرداختند. حالت های مختلفی برای اعمال اصلاح پوسته در نظر گرفتند. مشخص گردید که اعمال شیار در پوسته منجر به کاهش نوسانات جریان می گردد. بعلاوه مشخص گردید که وجود اصلاح پوسته در روتور اول اثر بیشتری نسبت به اعمال آن در روتور دوم دارد.

چرخش معکوس یک دستاورد مهم برای متراکم کردن و افزایش کارایی در کمپرسورها و توربین ها شناخته می شود. بکارگیری روش چرخش معکوس، می توان به کوچک کردن اندازه اجزاء در توربوماشین ها و همچنین سرعت های چرخشی بالاتر در روتورها دست یافت. بر این اساس، این فناوری به عنوان یک فناوری امیدوارکننده در تحقق اهداف آینده صنعت هواپیما در نظر گرفته می شود [۳۶ و ۳۵]. ناپایداری های جریان و رخداد استال دورانی و سرج در کمپرسورهای چرخش معکوس نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. همانطور که ذکر گردید تحقیقات انجام شده در خصوص اعمال اصلاح پوسته در این نوع از کمپرسورها و اثرگذاری آن بر رفتار جریان عمدتاً در کمپرسورهای مادون صوت و سرعت پایین انجام شده اند و در کمپرسورهای گذر صوت که کاربردهای زیادی داشته و پدیده های مختلفی ناشی از سرعت جریان بالا در آنها رخ می دهد مطالعه ای انجام نشده است. بر این اساس در تحقیق حاضر، به بررسی اثر شیار محیطی در یک کمپرسور محوری دو طبقه چرخش معکوس گذر صوت پرداخته می شود. در این راستا با اعمال پوسته اصلاح شده عملکرد کمپرسور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و درک عمیق تری از جزئیات ساختار جریان ناشی از اعمال اصلاح پوسته حاصل می گردد.

## ۲- هندسه و شبکه بندی کمپرسور

در تحقیق حاضر یک کمپرسور جریان محوری چرخش معکوس دو طبقه با آرایش روتور-استاتور-روتور در نظر گرفته شده است. اطلاعات هندسه ای کمپرسور از مرجع [۳۷] استخراج گردیده است. در جدول ۱ برخی از مشخصات این کمپرسور محوری ذکر شده است.

الون و همکاران [۲۲] به صورت تجربی از اصلاح پوسته از نوع زاویه دار خمیده با تخلخل پایین جهت بهبود یا گسترش محدوده عملکردی پایدار یک کمپرسور محوری یک طبقه استفاده کردند. هدف از تحقیق آنها دستیابی به بهترین موقعیت از حیث دستیابی به حاشیه استال بود. بدین منظور شیار در موقعیت های محوری متفاوت به نحوی که در حالت های مختلف ۲۰ درصد تا ۱۰۰ درصد کورد محوری را پوشش دهد لحاظ گردید و تاثیر قابل توجه موقعیت این نوع شیار بر دستیابی به حاشیه استال بررسی گردید. همبر و همکاران [۲۳] به بررسی عددی اعمال اصلاح پوسته از نوع شیار محوری به صورت نیم دایره بدون انحراف در جهت محیطی در طبقه اول یک کمپرسور ۴/۵ طبقه شامل پره راهنمای ورودی، روتور و استاتور پرداختند. نتایج آنها نشان دادند که رفتار جریان در داخل شیارهای محوری در دبی های جرمی واقع در سمت راست منحنی عملکرد مشابه هم هستند. اما با نزدیک شدن به شرایط استال، جریان درون شیار متاثر از تداخل جریان ها و پدیده های مختلف در منطقه نوک پره تغییر زیادی می کند.

دانگ و همکاران [۲۴] به صورت تجربی مطالعاتی در خصوص اثرات اصلاح پوسته به روش SPS<sup>۱</sup> به عنوان روشی جدید بر مبنای نظریه اغتشاشات کم جهت انجام دادند. نتایج آنها نحوه حذف پیش نشانگرهای استال و چگونگی افزایش حاشیه استال را بررسی کرده است.

یو و همکاران [۲۵] به بررسی اثر اصلاح پوسته جدی بر پیش نشانگرهای استال با استفاده از یک مدل پایداری سه بعدی پرداختند. اعتبار نتایج حاصله از این مدل با مقایسه با نتایج تجربی مورد تایید قرار گرفت. تداخل بین شوک امواج پیش نشانگر و اصلاح پوسته محاسبه گردید. دانگ و همکاران [۲۶] به صورت تجربی بر روی اصلاح پوسته SPS توام با دمش و مکش انجام دادند. نتایج نشان دادند که اصلاح پوسته با دمش هوا حتی به میزان کم می تواند حاشیه استال را تا حدود ۸٪ بهبود دهد. در حالی که چنین پوسته ای با جریان مکش قادر به افزایش حاشیه استال در مقایسه با حالت بدون مکش نمی باشد. هاتاوی [۲۷] با بررسی انواع مختلف اصلاحات در پوسته کمپرسور نتیجه گرفت که اصلاح پوسته از نوع شیارهای محیطی و محوری اثرگذاری بیشتری داشته و بنابراین کاربرد بیشتری نیز دارد.

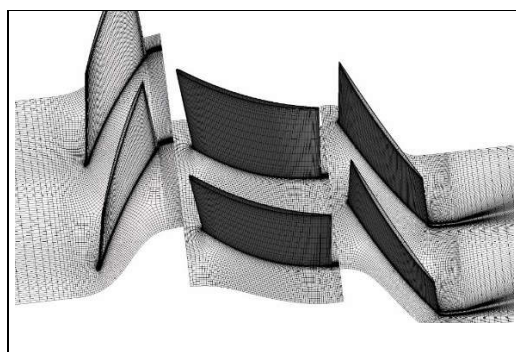
مانو و همکاران [۲۹-۲۸] به بررسی عددی و تجربی اثر اصلاح پوسته بر رفتار ناپایای جریان در یک کمپرسور محوری چرخش معکوس سرعت پایین پرداختند. هدف اصلی آنها بررسی رفتار ناپایای جریان ناشی از اعمال اصلاح پوسته در این کمپرسور بود. بررسی فرکانسی نتایج نشان داد که نوسانات جریان ناشی نوک در فرکانس های کم با اعمال اصلاح پوسته حذف می گردد. مانو و همکاران [۳۱-۳۰] در مطالعات دیگری به بررسی عددی و تجربی به مطالعه اثر موقعیت شیار پوسته بر رفتار جریان در یک کمپرسور چرخش معکوس سرعت پایین با اندازه درز نوک بالا پرداختند. در این تحقیق فهم بهتری از بکارگیری و اثرات شیار پوسته و مکانیزم های کنترلی مرتبط با آن در این کمپرسور استخراج گردیده است. نتایج آنها نشان داد که

<sup>۱</sup> Stall precursor-suppressed

جدول ۱- مشخصات کمپرسور محوری چرخش معکوس [۳۷]

پارامتر	روتور اول	استاتور اول	روتور دوم
شعاع ورودی در پایه (میلی متر)	۲۱۲/۵	۲۱۸/۷	۲۲۵/۸
شعاع خروجی در پایه (میلی متر)	۲۱۶/۷	۲۲۴/۷	۲۲۹
شعاع ورودی در نوک (میلی متر)	۲۸۷/۳	۲۸۲/۲	۲۷۴/۱
شعاع خروجی در نوک (میلی متر)	۲۸۴	۲۷۵/۳	۲۷۱/۳
تعداد پره	۲۸	۳۶	۳۸
سرعت دورانی محور (دور بر دقیقه)	۱۸۰۰۰	-----	۱۸۰۰۰

شبکه‌بندی این کمپرسور با استفاده از نرم افزار Turbogrid به صورت شبکه سازمان یافته انجام شده است. میدان محاسباتی برای یک گذرگاه در نظر گرفته شده است که برای روتور یک، ۳۹۳۶۶۴، برای روتور دو ۴۵۴۷۷۰ و برای استاتور ۲۰۴۱۰۲ و در مجموع ۱۰۵۲۵۳۶ سلول محاسباتی برای کل کمپرسور می‌باشد. تراکم شبکه در نزدیکی دیواره به گونه‌ای است که مقدار  $y^+$  از یک کوچکتر می‌باشد. برای تولید شبکه، میدان محاسباتی در چهار لایه صفحه‌ای شبکه‌بندی شده و سپس این چهار لایه با یکدیگر بلوک شده‌اند. برای چند بلوک کردن، هر لایه به زیرلایه‌هایی تقسیم شده و لایه‌های مختلف مشابه یکدیگر شبکه‌بندی می‌گردند تا بتوان آنها را دو به دو بلوک کرد. در این هندسه اندازه درز نوک یک درصد ارتفاع پره در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ شبکه‌بندی بر روی سطوح پایه و پره‌ها نشان داده شده است.



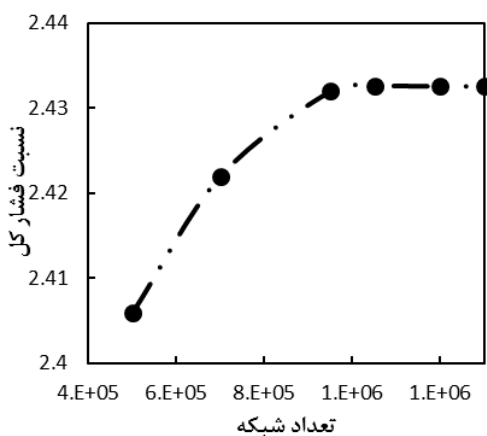
شکل ۲- شبکه‌بندی سطوح پایه و پره ها.

### ۳- شرایط مرزی و تنظیمات حل

حلگر انتخاب شده در مطالعه‌ی حاضر، نرم‌افزار تجاری Ansys- CFX است که قابلیت تحلیل جریان سه‌بعدی، لزج و دقیق زمانی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات بدست‌آمده شامل ممنوم و پیوستگی و انرژی بهره می‌برد. به منظور استخراج تنش‌های رینولدز از مدل توربولانس k- $\omega$ -SST استفاده گردیده است. در تحلیل حاضر دستگاه مرجع مختصات چرخان مورد استفاده قرار می‌گیرد. دور محور روتور اول و روتور دوم به میزان 18000 و در خلاف جهت یکدیگر تنظیم می‌گردد. در مرز ورودی فشار کل (339 kPa) و دمای کل (488 K) و در مرز خروجی فشار استاتیک تنظیم گردیده است. به منظور ایجاد شرایط عملکردی مختلف کمپرسور از خفگی تا نزدیک استال، مقدار فشار استاتیک در مرز خروجی را

تغییر داده می‌شود که این امر منجر به تغییری دبی جرمی کمپرسور می‌گردد. بدین منظور، فشار استاتیک در خروجی، از ۴۰۰ کیلوپاسکال تا ۷۴۰ کیلوپاسکال افزایش داده می‌شود تا شرایط جریان از حالت خفگی تا استال شبیه‌سازی گردد. با توجه به اینکه میدان محاسباتی شامل یک گذرگاه از روتورها و استاتور می‌باشد، در طرفین میدان حل شرط مرزی پرئودیک اعمال گردیده است. بر روی دیوار آدیاباتیک، شرط مرزی عدم لغزش اعمال شده است. در تحقیق حاضر از روش چهارچوب‌های مرجع چندگانه<sup>۱</sup> استفاده شده است. بدین منظور، کمپرسور به قسمت‌های چرخان (روتورها) و ثابت (استاتور) تقسیم شده و سطح مشترک مابین دو منطقه جریان با استفاده از گزینه روتور بدون حرکت<sup>۲</sup> تعریف گردیده است. همچنین در حالت کمپرسور شیاردار، سطح مشترک مابین پروانه و شیار نیز با استفاده از گزینه روتور بدون حرکت تعریف گردیده است. بعلاوه در طرفین شیار نیز از شرط مرزی پرئودیک استفاده شده است.

به منظور اطمینان از شبکه‌بندی و تعداد شبکه‌های در نظر گرفته شده، در شبیه‌سازی حاضر، استقلال نتایج از تعداد شبکه بررسی گردیده است. بدین منظور شبکه‌بندی جریان در شش نوع مختلف انجام شده و عملکرد کمپرسور در هر یک از آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳ مقدار نسبت فشار در تعداد شبکه مختلف ترسیم گردیده است. مشخص است که با افزایش تعداد شبکه از ۵۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی تا ۱۰۵۲۵۳۶ سلول محاسباتی مقدار نسبت فشار تغییر می‌کنند. اما با افزایش تعداد المان‌ها از ۱۰۵۲۵۳۶ سلول محاسباتی تا ۱۳۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی تغییر محسوسی در نسبت فشار کمپرسور ایجاد نمی‌گردد. بنابراین تعداد ۱۰۵۲۵۳۶ المان برای تحلیل حاضر مناسب بوده و از این شبکه‌بندی استفاده شده است.



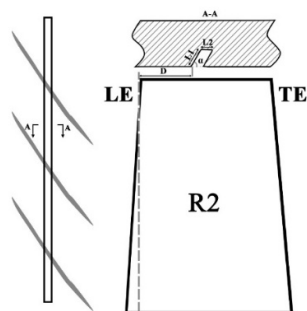
شکل ۳- نسبت فشار کل کمپرسور بر حسب تعداد شبکه محاسباتی

### ۴- اعتبار سنجی

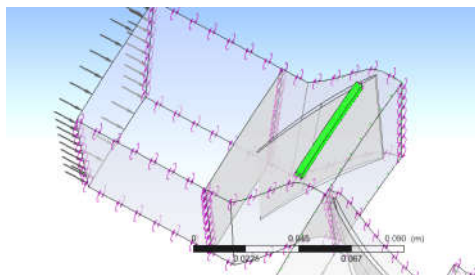
به منظور اعتبارسنجی نتایج، در شکل ۴- الف تغییرات زوایای مطلق جریان در ورودی هر دو روتور در فواصل شعاعی مختلف استخراج گردیده و با نتایج مرجع [۳۷] مقایسه شده‌اند. این نتایج در

<sup>۱</sup> Multiple Reference Frame (MRF)

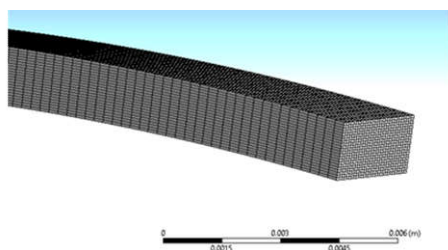
<sup>۲</sup> Frozen Rotor



(الف)



(ب)



(ج)

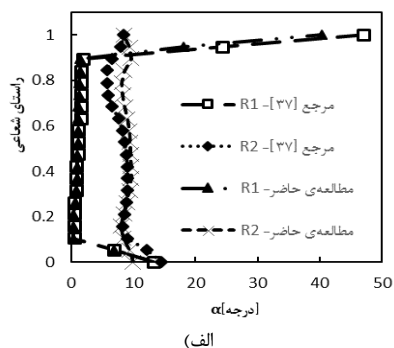
شکل ۵- الف) طرحواره شیار محیطی در روی پوسته روتور اول کمپرسور ب) موقعیت شیار بر روی پوسته روتور اول ج) شبکه بندی شیار

جدول ۲- مقایر اولیه هندسه شیار

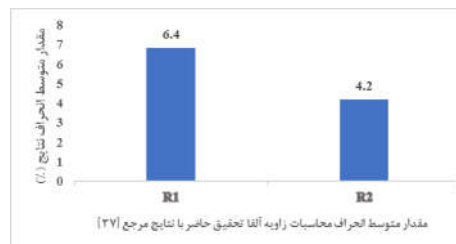
پارامتر	مقدار
$\alpha$	۸۰ درجه
D	۲۰ میلی‌متر
$L_1$	۲ میلی‌متر
$L_2$	۲ میلی‌متر

در شکل ۶ منحنی مشخصه کمپرسور چرخش معکوس در دو حالت (پوسته صاف و پوسته شیاردار) نشان داده شده است. این منحنی شامل ضریب افزایش فشار روتور در مقابل دبی جرمی جریان می‌باشد. جریان در شرایط رخداد استال ناپایا می‌گردد و خواص جریان با گذر زمان تغییر می‌کنند. بر این اساس شبیه سازی پایای جریان در شرایط نزدیک استال همگرا نمی‌شود. بر این اساس مبنای تشخیص نقطه استال عدم همگرایی شبیه‌سازی در تحلیل پایا می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، در حالت بدون شیار، شرایط نزدیک به استال در دبی جرمی ۴۳/۷۴ کیلوگرم بر ثانیه رخ می‌دهد که نسبت فشار در

شرایط طراحی کمپرسور و دور محور ۱۸۰۰۰ دور در دقیقه استخراج گردیده است. ملاحظه می‌گردد که نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج مرجع [۳۷] دارند. همچنین در شکل ۴-ب مقدار متوسط انحراف زاویه آلفا حاصل از تحقیق حاضر با نتایج مرجع [۳۷] به صورت بار چارت آورده شده است. مشاهده می‌گردد که بیشینه انحراف حدود ۶/۴ درصد می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) تغییرات زوایای مطلق جریان (آلفا) در ورودی روتور اول و دوم در راستای شعاعی ب) مقدار متوسط اختلاف زاویه آلفا حاصل از تحقیق حاضر با نتایج مرجع [۳۷]

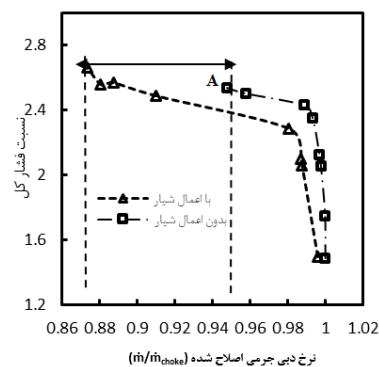
## ۵- نتایج

در این مقاله به بررسی اثر یک شیار محیطی در دیواره داخلی پوسته‌ی روتور اول کمپرسور محوری چرخش معکوس بر عملکرد کلی کمپرسور و رفتار جریان نشتی نوک آن پرداخته می‌شود. در شکل ۵ طرحواره این شیار محیطی به همراه موقعیت قرارگیری بر روی پوسته و شبکه آن نشان داده شده است. در شکل ۵- الف مشخص گردیده است که،  $L_1$  و  $L_2$  ابعاد شیار، D معرف فاصله‌ی ابتدای شیار تا لبه حمله پره (در نوک پره) روتور و  $\alpha$  زاویه داخلی شیار می‌باشد. مطابق شکل ۵- ج مشخص است که شبکه‌بندی شیار محیطی پوسته نیز به صورت سازمان‌یافته انجام گردیده است. تعداد سلول محاسباتی بکارگرفته شده برای شیار محیطی ۱۲۶۹۶۲ می‌باشد. مشخصات هندسی شیار محیطی در جدول ۲ ارائه گردیده است.

۲/۵۴ را ایجاد می نماید. در شکل ۶ این نقطه با نماد A مشخص گردیده است.

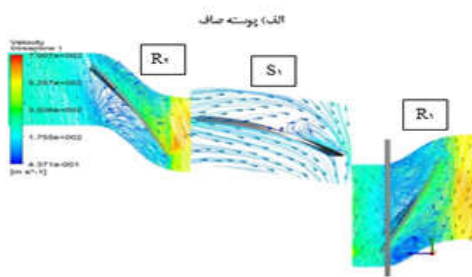
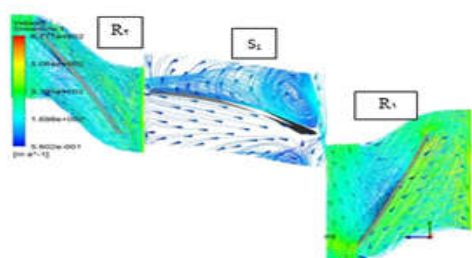
مشاهده می گردد که با اعمال اصلاح پوسته، مقدار نسبت فشار کاهش ناچیزی دارد و اعمال پوسته اصلاح شده منجر به ایجاد افت بیشتر در کمپرسور می گردد. در مقابل اعمال شیار در پوسته حاشیه عملکرد پایدار کمپرسور را افزایش داده و کمپرسور قادر به عملکرد در دبی های جرمی کمتر نیز می باشد. با توجه به محاسبات زیر مشخص است که با اعمال شیار، حاشیه استال ۷/۸۷٪ افزایش پیدا کرده است. بر اساس مطالب ذکر شده، شیار پوسته با اصلاح وضعیت جریان در منطقه نوک منجر به بهبود رفتار جریان و به تعویق انداختن رخداد استال دورانی در کمپرسور می شود. اما در نقطه مقابل، عمدتاً این شیار منجر به افت فشار در جریان و کاهش نسبت فشار و بالتبع کاهش بازدهی می گردد. بر این اساس، گرچه اصلاح پوسته موجب تأخیر در رخداد استال و افزایش حاشیه استال می گردند. اما کاهش میزان راندمان کمپرسور به وجود می آورد.

$$\text{Stall margin Improvement (\%)} = \frac{MFR_{\text{improved}} - MFR_{\text{baseline}}}{MFR_{\text{baseline}}} \times 100 = \frac{43.7484 - 40.2}{43.7484} \times 100 = 7.78\%$$

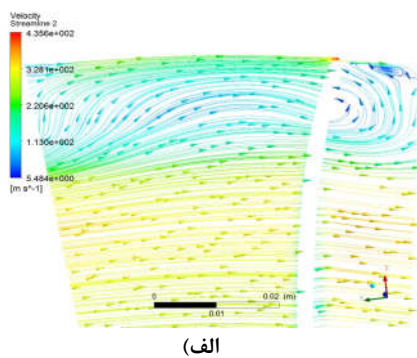


شکل ۶- منحنی عملکرد کمپرسور در دو حالت با پوسته صاف و شیاردار

به منظور بررسی نحوه رخداد سلول های استال و چگونگی پخش محیطی و شعاعی آن، در شکل ۸، سرعت نسبی جریان در موقعیت محوری معادل ۸۵٪ وتر پره روتور اول در راستای جریان (از پایه تا نوک) برای هر دو حالت پوسته صاف و پوسته شیاردار در نقطه عملکردی A (یعنی شرایط نزدیک استال در پوسته صاف) ترسیم گردیده است. مشخص است که در حالت بدون شیار، سلول استال شکل گرفته حدود ۳۰ درصد شعاع پره را اشغال کرده است. با توجه به شکل ۸ ب مشاهده می گردد که اعمال شیار در روی پوسته منجر به حذف این سلول استال و مناطق با جریان برگشتی گردیده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که اصلاح پوسته مانع از پخش سلول های استال در جهت شعاعی می گردد.



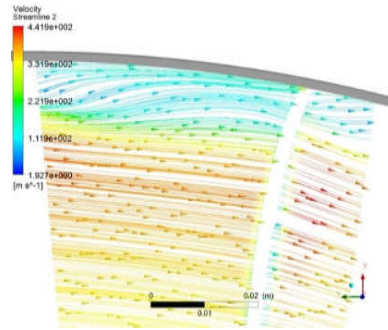
شکل ۷- خطوط جریان در منطقه درز نوک در نقطه عملکردی A (الف) پوسته صاف (ب) پوسته شیاردار



به منظور درک عمیق تر اثرات اعمال پوسته شیاردار، به بررسی جزئیات ساختار جریان در کمپرسور محوری چرخش معکوس در نقطه عملکردی A برای حالت های پوسته صاف و پوسته شیاردار پرداخته می شود. مطابق شکل ۶، نقطه عملکردی A معرف شرایط نزدیک استال در حالت پوسته صاف می باشد که دبی جرمی ۴۳/۷۴ کیلوگرم بر ثانیه معادل دبی جرمی اصلاح شده ۰/۹۴ را نشان می دهد. در شکل ۷ خطوط جریان در منطقه درز نوک برای هر دو پوسته صاف و شیاردار در شرایط نزدیک استال نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که در کمپرسور با پوسته صاف جریان های برگشتی به خصوص در منطقه نوک پره رخ می دهد. تداخل جریان اصلی و جریان نشی نوک منجر به وقوع گردابه های قوی در منطقه درز نوک گردیده است که در مسیر جریان ایجاد انسداد می کنند. وقوع این گردابه ها بخصوص در استاتور کاملاً مشهود است. با توجه به شکل ۷ ب مشخص است که اعمال پوسته شیاردار موجب حذف گردابه های جریان، سلول های استال و کاهش انسداد در مسیر جریان می گردند.



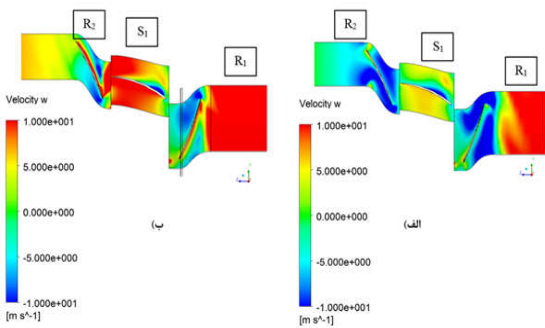
۰/۹۷ فاصله شعاعی برای هر دو پوسته صاف و شیاردار در نقطه عملکردی A نشان داده شده است. گرچه در ورودی روتور اول در هر دو حالت (پوسته صاف و پوسته شیاردار)، امواج ضربه‌ای رخ می‌دهد. اما در پوسته شیاردار وقوع شوک به سمت پایین دست منتقل شده است. به عبارت دیگر رخداد شوک که اثرات نامطلوبی بر ساختار جریان و ایجاد تلفات دارد به مکانی در پایین دست منتقل می‌گردد که امری مطلوب است. این امر می‌تواند ناشی از تضعیف جریان نشتی نوک در مقابل جریان اصلی باشد. با توجه به اینکه تداخل لایه مرزی و امواج ضربه‌ای می‌تواند به جدایش جریان منجر شده و افت‌های موجود در جریان را افزایش دهد رخداد امواج ضربه‌ای ضعیف تر در فاصله پایین دست در واقع به ایجاد منجر به تشدید وضعیت شوک منجر به استال می‌گردد این امر می‌تواند منجر به تاخیر در رخداد استال در پوسته‌های شیاردار گردد.



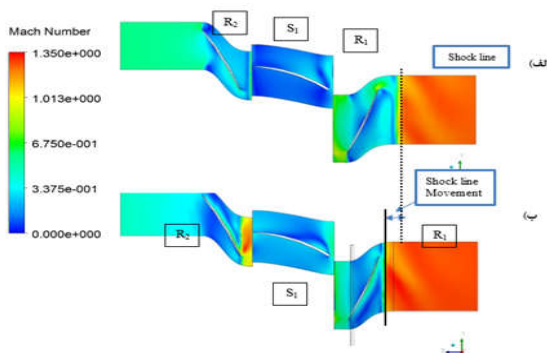
(ب)

شکل ۸- خطوط جریان در صفحه واقع در ۰/۸۵ کورد روتور اول در نقطه عملکردی A (الف) پوسته صاف (ب) پوسته شیاردار

در شکل ۹، خطوط جریان در ناحیه شیار محیطی واقع در روی پوسته نشان داده شده است. اختلاف فشار سطح فشار و مکش منجر به ایجاد جریان نشتی نوک می‌گردد. با کاهش دبی جرمی نسبت فشار کمپرسور افزایش می‌یابد و بالتبع با افزایش اختلاف فشار بین دو سطح پره، جریان نشتی نوک قوی‌تری شکل می‌گیرد. این جریان در مقابل جریان اصلی قرار گرفته و برخورد این دو جریان منجر به ایجاد گردابه نشتی نوک و ایجاد انسداد در مسیر عبور جریان می‌گردد. در شکل ۱۰ مشخص است که با اعمال شیار، گردابه‌های درون شیار محیطی، ایجاد گردیده است. به عبارت دیگر شیار محیطی با قراردادن بخشی از جریان نشتی نوک در داخل خود، از قدرت این جریان کاسته و انسداد ناشی از آن را کاهش می‌دهد. این امر موجب بهبود ساختار جریان در منطقه درز نوک می‌گردد.

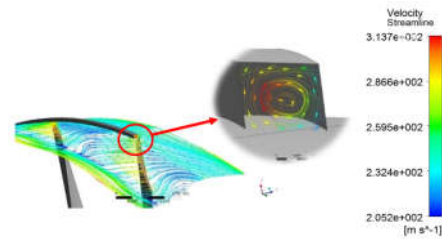


شکل ۱۰- کانتور سرعت محوری جریان در ۰/۹۷ فاصله شعاعی در نقطه عملکردی A (الف) بدون اعمال شیار (ب) با اعمال شیار



شکل ۱۱- کانتور توزیع ماخ نسبی در ۰/۹۷ فاصله شعاعی در نقطه عملکردی A (الف) بدون اعمال شیار (ب) با اعمال شیار

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات ماخ نسبی متوسط‌گیری شده شعاعی از ورودی تا خروجی روتور اول کمپرسور در دو حالت پوسته صاف و شیاردار در نقطه عملکردی A (شرایط نزدیک استال در پوسته صاف) نشان داده شده است. در این شکل جایجایی موقعیت رخداد شوک به سمت پایین دست جریان در پوسته شیاردار نسبت به پوسته صاف کاملاً مشخص است. در شکل ۱۳ کانتور فشار کل نسبی در ۰/۹۷ فاصله شعاعی در شرایط نزدیک استال برای هر دو پوسته صاف و شیاردار نشان داده شده است. به منظور بررسی مسیر حرکت جریان در گذرگاه، خطوط جریان به این کانتورها الحاق گردیده‌اند. مشخص است که با

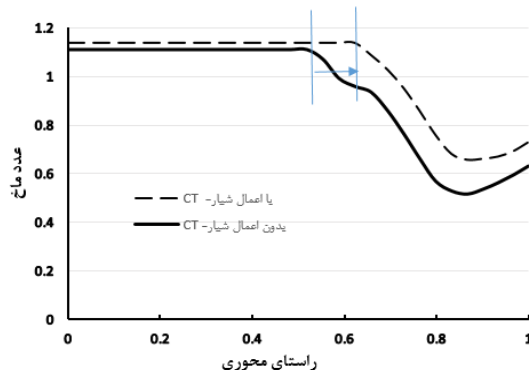


شکل ۹- خطوط جریان درون شیار پوسته در نقطه عملکردی A

به منظور بررسی نحوه گسترش محوری سلولهای استال، کانتور سرعت محوری کمپرسور در فاصله شعاعی ۰/۹۷ و در نقطه عملکردی A در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که در پوسته صاف، تمامی قسمت‌های کمپرسور اعم از روتورها و استاتور (بخصوص در روتورهای اول و دوم) جریان برگشتی منطقه نسبتاً زیادی از گذرگاه را اشغال کرده‌اند. همچنین مومنوم جریان اصلی به واسطه قدرت زیاد جریان نشتی نوک در شرایط استال کم بوده و انسداد جریان زیاد است. این در حالی است که با اعمال شیار در پوسته کمپرسور، با کاهش قدرت جریان نشتی نوک، مناطق با جریان برگشتی و سرعت‌های منفی کاهش یافته و رفتار جریان و بالتبع عملکرد کمپرسور بهبود می‌یابد.

در شکل ۱۱ کانتور عدد ماخ نسبی جریان در کمپرسور محوری در

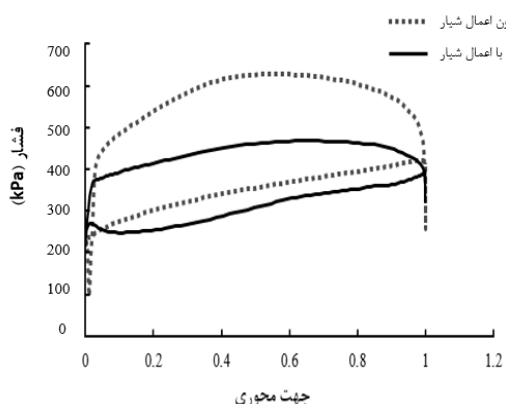
اعمال شیار در پوسته، فصل مشترک جریان نشستی نوک و جریان اصلی به سمت پایین دست حرکت کرده است. این رفتار نشان دهنده تضعیف قدرت جریان نشستی نوک با اعمال شیار است. با توجه به اینکه احتمال رخداد استال با پیشروی فصل مشترک جریان نشستی نوک و جریان اصلی به سمت بالادست لبه حمله پره بیشتر می شود لذا اعمال شیار در پوسته از این امر جلوگیری کرده و رخداد استال را به تعویق می اندازد.



شکل ۱۲- نمودار ماخ جریان در راستای جریان با اعمال شیار و بدون

#### اعمال شیار در نقطه عملکردی A

این امر منجر به کاهش قدرت جریان نشستی نوک در حالت پوسته شیاردار می گردد. به عبارت دیگر شیار محیطی با تغییر در توزیع فشار استاتیک در دو طرف پره از یک طرف موجب کاهش بارگذاری آیرودینامیکی پره و کاهش نسبت فشار پره و عملکرد کمپرسور می شود که نامطلوب است. اما از سوی دیگر این امر منجر به تضعیف جریان نشستی نوک و اثرات نامطلوب آن در رخداد استال می گردد که از این جهت مطلوب است.



شکل ۱۴- منحنی فشار سطح پره در راستای جریان با اعمال شیار و بدون اعمال شیار در نقطه عملکردی A

#### ۶- نتیجه گیری

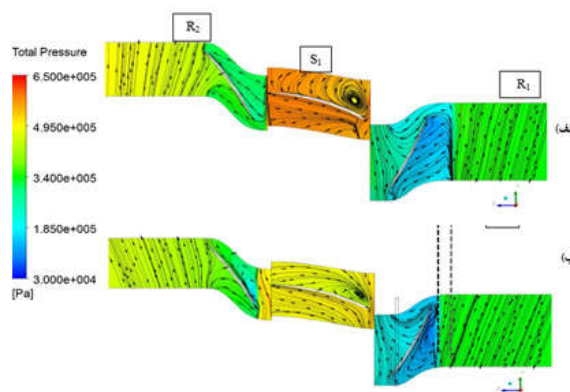
در این مقاله، اثر اصلاح پوسته به صورت شیار محیطی بر عملکرد یک کمپرسور جریان محوری چرخش معکوس بررسی گردید. در ابتدا به منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصله با نتایج تجربی مقایسه گردید که تطابق خوبی مشاهده گردید. مهم ترین نتایج حاصل از این بررسی ها به صورت ذیل قابل جمع بندی می باشد:

اعمال شیار محیطی منجر به توسعه منطقه پایدار کمپرسور محوری چرخش معکوس به میزان ۸٪ گردیده است. به عبارت دیگر حاشیه استال با اعمال شیار افزایش یافته و کمپرسور قادر است در دبی های کمتر نیز عملکرد داشته باشد.

بررسی ساختار جریان نشان داد که با اعمال شیار در پوسته، محل ایجاد امواج ضربه ای به سمت پایین دست منتقل می شود که نسبت به حالت صاف بهبود یافته است.

با اعمال شیار محیطی توزیع فشار در حول پره های روتور کمپرسور بخصوص در منطقه نوک که منشا رخداد سلولهای استال است تغییر می کند. کاهش بارگذاری آیرودینامیکی و کاهش اختلاف فشار سطوح فشار و مکش منجر به کاهش قدرت جریان نشستی نوک گردیده و فصل مشترک جریان اصلی و جریان نشستی نوک را به سمت پایین دست منتقل می کند. بررسی خطوط جریان حکایت از کاهش رخداد جریان های بازگشتی و گردابه های نشستی نوک در کمپرسور محوری می گردد. این امر موجب بهبود ساختار جریان در شرایط نزدیک استال و به تعویق انداختن آن می شود.

#### ۷- فهرست علائم اختصاری



شکل ۱۳- کانتور فشار نسبی کل و خطوط جریان در ۹۷٪ فاصله شعاعی در نقطه عملکردی A بدون اعمال شیار (ب) با اعمال شیار

جریان نشستی نوک از اختلاف فشار در سطوح فشار و مکش در نوک پره ایجاد می گردد. با توجه به اینکه بیشترین چالش کمپرسور در شرایط نزدیک استال و ناشی از رخداد جریان نشستی در منطقه نوک کمپرسور است بررسی اثر اصلاح پوسته بر رفتار جریان در این شرایط عملکردی و در منطقه نوک از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا در شکل ۱۴ توزیع فشار استاتیک حول سطوح فشار و مکش در فاصله شعاعی ۹۷ درصد برای هر دو حالت پوسته صاف و شیاردار در نقطه عملکردی A نشان داده شده است. مشخص است که با اعمال شیار محیطی مقادیر فشار استاتیک در سطوح فشار و مکش و بارگذاری روی پره کاهش یافته است. بعلاوه اختلاف مقادیر فشار دو سطح نیز نسبت به حالت پوسته صاف کاهش یافته است.



mechanical engineers, part a: journal of power and energy, 219(8), pp.605-615. 2005.

[9] Koch C. C. Experimental evaluation of outer case blowing or bleeding of single stage axial flow compressor, part 6 Final report. No. NASA-CR-54592. 1970.

[10] Fujita, H. and Takata, H., A study on configurations of casing treatment for axial flow compressors. Bulletin of JSME, 27(230), pp.1675-1681. 1984.

[11] Takata H., and Tsukuda Y., Stall margin improvement by casing treatment—its mechanism and effectiveness, pp.121-133. 1977.

[12] Gourdain Nicolas, and Francis Leboeuf, Unsteady simulation of an axial compressor stage with casing and blade passive treatments, 021013. 2009.

[13] Legras Guillaume, Gourdain N. and Isabelle Trebinjac. Numerical analysis of the tip leakage flow field in a transonic axial compressor with circumferential casing treatment, Journal of Thermal Science 19, No. 3, pp.198-205. 2010.

[14] Crook A. J., Edward M. Greitzer C. S. Tan. and Adamczyk J. J., Numerical simulation of compressor endwall and casing treatment flow phenomena, pp.501-512. 1993.

[15] Wilke I., and H-P Kau., A numerical investigation of the flow mechanisms in a HPC front stage with axial slots, In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 36894, pp. 465-477. 2003.

[16] Lu, Xingen, Wuli Chu, Junqiang Zhu, and Yangfeng Zhang. "Numerical investigations of the coupled flow through a subsonic compressor rotor and axial skewed slot." 011001. 2009.

[17] Lu Jialing, Wuli Chu, and Yanhui Wu. "Investigation of skewed slot casing on transonic axial-flow fan stage." In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 48883, pp. 133-144. 2009.

[18] Djeghri, Noureddine, Huu Duc Vo, and Hong Yu. "Parametric study for lossless casing treatment on a mixed-flow compressor rotor." In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 56635, p. V02AT37A025. American Society of Mechanical Engineers, 2015.

[19] Du Juan and Joerg R. Seume, Design of casing treatment on a mixed-flow compressor, In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 50787, p. V02AT39A045. American Society of Mechanical Engineers, 2017.

[20] Sri P.U. and Krishna J.D., Computational analysis of centrifugal compressor with grooves on casing. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 6(2), pp.01-09. 2015.

[21] Shivayogi A.K., Nagpurwala Q.H. and Deshpande M.D., Numerical studies on the effect of slotted casing treatment on the performance of a transonic axial flow compressor. SASTech-Technical Journal of RUAS, 8(2), pp.63-70. 2009.

[22] Alone, Dilipkumar B., Subramani Satish Kumar, Shobhavathy Thimmaiah, Janaki Rami Reddy Mudipalli, A. M. Pradeep, Srinivasan Ramamurthy and Venkat S. Iyengar, Performance characterization of the effect of axial positioning of bend skewed casing treatment retrofitted to a transonic axial flow compressor." In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 45608, p. V02AT37A026. American Society of Mechanical Engineers, 2014.

[23] Hembera M., Kau H.P. and Johann E., 2008. Simulation of casing treatments of a transonic compressor stage. International Journal of Rotating Machinery, 2008.

[24] Dong, Xu, Xiaohua Liu, Dakun Sun, and Xiaofeng Sun. "Experimental investigation on SPS casing treatment with bias flow, Chinese Journal of Aeronautics 27, No. 6, pp.1352-1362. 2014.

[25] Yu W.W., Wang X.Y. and Sun X.F., Investigation on the Theoretical Model Combined with the Novel Casting Treatment with Rotating Stall. Hangkong Dongli Xuebao/Journal of Aerospace Power, 20(5), pp.873-881. 2005.

[26] Dong X., Liu X., Sun D. and Sun X., Experimental investigation on SPS casing treatment with bias flow. Chinese Journal of Aeronautics, 27(6), pp.1352-1362. 2014.

[27] Hathaway Michael D. *Passive endwall treatments for enhancing stability*. No. ARL-TR-3878. 2007.

سرعت نسبی ورودی روتور اول	$W_1$
سرعت نسبی خروجی روتور اول	$W_2$
سرعت نسبی ورودی روتور دوم	$W_3$
سرعت نسبی خروجی روتور دوم	$W_4$
سرعت مطلق ورودی روتور اول	$V_1$
سرعت مطلق خروجی روتور اول	$V_2$
سرعت مطلق ورودی روتور دوم	$V_3$
سرعت مطلق خروجی روتور دوم	$V_4$
سرعت مماسی روتور اول	$U_1$
سرعت مماسی روتور اول	$U_2$
آنتروپی استاتیک	$s$
ماخ نسبی	$M$
دبی جرمی جریان	$\dot{m}$
دبی جرمی جریان در حالت خفگی	$\dot{m}_{chock}$
نرخ جریان جرمی	$MFR$
فاصله دیواره بی بعد	$y^+$
سرعت طراحی	$N_d$
سرعت دورانی روتور	rpm
فشار کل نسبی	$P_{t,rel}$
زاویه جریان مطلق	$\alpha$
زاویه جریان نسبی	$\beta$
روتور اول	$R_1$
روتور دوم	$R_2$
استاتور اول	$S_1$

## ۸-مراجع

- Day I. J. Stall, surge, and 75 years of research. Journal of Turbomachinery, 138, No. 1. 2016.
- Epstein A. H. Ffowcs-Williams JE, and Greitzer E. M. Active Suppression of aerodynamic Instabilities in Turbomachines, AIAA Journal of Propulsion and Power, 5, 204-211. 1989.
- Paduano J.D., Greitzer E.M. and Epstein A.H., Compression system stability and active control, *Annual review of fluid mechanics*, 33, p.491. 2001.
- Day I. J., Review of stall, surge and active control in axial compressors. ISABE93-7011. 1993.
- Zhang H. G., Chu W. L., and Wu Y. H., Numerical investigation of the circumferential grooved casing treatment as well as analyzing the mechanism of improve stall margin, In *New Trends in Fluid Mechanics Research*, pp. 448-451. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- Yu Qing, Qiushi Li, and Ling Li, The experimental researches on improving operating stability of a single stage transonic fan, In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 3610, pp. 1133-1139. 2002.
- Xu Wei, Tong Wang, and ChuanGang Gu., Performance of a centrifugal compressor with holed casing treatment in the large flowrate condition, Science China Technological Sciences 54, No. 9, pp. 2483-2492. 2011.
- Lu X., Zhu J. and Chu W., Numerical and experimental investigation of stepped tip gap effects on a subsonic axial-flow compressor rotor. Proceedings of the institution of

- [28] Mao X., Liu B. and Zhao H., Numerical analysis of the circumferential grooves casing treatment in a counter-rotating axial flow compressor. *Applied Thermal Engineering*, 130, pp.29-39. 2018.
- [29] Mao X., Liu B., Abdul R. and Zhao H., Numerical investigation into the effects of casing aspiration on the overall performance and flow unsteadiness in a counter-rotating axial flow compressor. *Aerospace Science and Technology*, 78, pp.671-681. 2018.
- [30] Mao X. and Liu B., Investigation of the casing groove location effect for a large tip clearance in a counter-rotating axial flow compressor. *Aerospace Science and Technology*, 105, p.106059. 2020.
- [31] Mao X., Liu B., Tang T. and Zhao H., The impact of casing groove location on the flow instability in a counter-rotating axial flow compressor. *Aerospace Science and Technology*, 76, pp.250-259. 2018.
- [32] Pundhir D.S., Sharma P.B. and Chaudhary K.K., Effect of casing treatment on aerodynamic performance of a contrarotating axial compressor stage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 204(1), pp.47-55. 1990.
- [33] Pundhir D.S., A study of some factors affecting the effectiveness of casing treatment in a contra-rotating axial compressor stage. 1994.
- [34] Heinrich Martin, Hossein Khaleghi. and Christian Friebe. Numerical Investigation of Circumferential Groove Casing Treatment on a Low Speed Contra-Rotating Fan., In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 58547, p. V001T09A011. American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [35] Day I. J., Active suppression of rotating stall and surge in axial compressors., In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 78989, p. V001T01A035. American Society of Mechanical Engineers, 1991.
- [36] Abbasi S., alizadeh M., Investigation of the effect of speed variations on the contra-rotating axial compressor stages. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 36(2), pp.21-30. 2020.
- [37] Tiwari, Madhur. *Axial Compressor Design with Counter-Rotation and Variable RPM for Stall Mitigation.*, 2014.