



## بررسی تجربی و عددی اثر پوسته شیاردار بر اغتشاشات جریان نشتی نوک در یک کمپرسور محوری

مرحمت زینعلی<sup>۱</sup>، ثاراله عباسی<sup>۲\*</sup> و رضا تقوی زنوز<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

<sup>۳</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۵

### چکیده

در این تحقیق به کاربرد شیار محیطی جهت اصلاح عملکرد کمپرسور و کاهش نوسانات جریان نشتی نوک، به صورت تجربی و عددی پرداخته می‌شود. یک شیار سراسری به عمق ۱/۸ میلی‌متر در مکانی بین ۹۰٪ تا ۱۰۸٪ اندازه وتر نوک رتور در دیواره داخلی پوسته کمپرسور ایجاد شده است. فشار استاتیک لحظه‌ای روی پوسته با بکارگیری سنسورهای فشار فرکانس بالا (کولایت)، اندازه‌گیری می‌شود. نتایج بدست آمده حکایت از افزایش محدوده عملکردی کمپرسور و همچنین نسبت فشار آن با پوسته شیاردار دارد. بررسی فشار استاتیک گذرا، نشان دهنده ناچیز بودن نوسانات جریان در منطقه درز نوک در شرایط طراحی است؛ بطوری‌که فرکانس عبوری پره، فرکانس غالب در طیف فرکانسی می‌باشد. در شرایط نزدیک استال، نوسانات جریان در پوسته صاف افزایش قابل توجهی دارد؛ در حالی‌که در پوسته شیاردار نوسانات به طور چشم‌گیری کاهش یافته است. به منظور درک اثر شیار پوسته بر ساختار جریان، تحلیل عددی جریان در شرایط نزدیک استال صورت گرفته است. نتایج تحلیل عددی جریان نشان دهنده وقوع ورتکس نشتی نوک قوی در لبه حمله پره، انسداد جریان در این منطقه و برگشت جریان در شرایط نزدیک استال در پوسته صاف دارد که با اعمال پوسته اصلاح شده، انسداد جریان کاهش یافته و سلول استال مضمحل می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** کمپرسور محوری؛ اصلاح پوسته؛ تست ریگ؛ منحنی عملکرد.

## Experimental and Numerical Investigation of grooved shroud Effects on Tip Leakage Fluctuation in an axial compressor

M. Zienali<sup>1</sup>, S. Abbasi<sup>2\*</sup>, R. Taghavi Zenouz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In this paper the effect of the casing treatment on suppression of rotating stall in an isolated axial compressor rotor blade row has been experimentally investigated. The continuous grooved casing treatment, covering the whole compressor circumference, is of 1.8 mm in depth located between 90% and 108% of the blade tip chord measured from its leading edge. Measurements of unsteady pressure in compressor's casing as a stall precursor have been made using high frequency response pressure Kulite sensors positioned in properly pressure taps. Results obtained from these latter measurements together with signal frequency analyses, provides the description of the stall process and consequent flow induced fluctuations and also stall alleviation due to casing treatment. The results show that casing treatment has augmented the loading coefficient, indicating improvement in the blade row performance. Hence, stepped tip gap extends the stable operating range of compressor and delays the occurrence of stall phenomenon. Results of the present research, show that by using stepped tip gap, stall margin of the proposed compressor was improved by 6%. Numerical results show that the Casing treatment causes flow blockages to reduce due to alleviation of backflow regions. Eventually, it can be concluded that the casing treatment of the circumferential groove type could increase the stall margin of the compressor.

**Keywords:** Axial Compressor; Casing Treatment; Unsteady Tip Leakage Flow, Frequency Analysis.

## ۱- مقدمه

امروزه گرایش طراحی طراحان به سوی کمپرسورهای با وزن کمتر و محدوده عملکرد گسترده تر رو به افزایش است. وزن کمتر به معنای کاهش تعداد مراحل و تعداد پره‌ها است که این امر به معنای بارگذاری بیشتر پره می‌شود. با توجه به اینکه وجود درز نوک رتور در کمپرسورهای محوری امری اجتناب ناپذیر است، بارگذاری بیشتر پره‌ها، منجر به تولید جریان نشتی نوک قوی‌تری می‌شود. در چند دهه اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه بررسی اثرات جریان نشتی نوک پره بر وقوع ناپایداری‌ها در کمپرسورها، هم‌چون استال دورانی (Rotating stall) و سرچ (Surge) صورت پذیرفته است. استال دورانی، به عنوان یکی از عوامل محدودکننده پایداری کمپرسورها، سبب رخداد شرایط عملکردی بحرانی از جمله، ازدیاد بار دینامیکی روی پره‌ها و در نتیجه بروز صدمات مکانیکی می‌شود. بر این اساس کنترل جریان نشتی نوک به سبب اهمیت آن در عدم شکل‌گیری ناپایداری‌های چرخشی و استال دورانی، امری ضروری است. تاکنون روش‌های مختلفی برای کنترل و یا به تعویق انداختن رخداد استال در کمپرسورها معرفی گردیده است. یکی از این روش‌ها، اصلاح پوسته کمپرسور است که به عنوان یک روش کارا و موثر در افزایش کارایی و پایداری کمپرسورهای محوری شناخته شده است. مطالعات زیادی روی روش‌های مختلف اصلاح پوسته صورت پذیرفته است که از آن میان می‌توان به شیار محیطی (circumferential groove) [۱-۲]، اسلات‌ها (slot) [۳] و سوراخ‌های بازچرخشی (self-recirculating casing treatment) [۴] اشاره کرد.

همانطور که ذکر گردید، محققان بسیاری به صورت عددی و تجربی روی روش‌های مختلف اصلاح پوسته در کمپرسورهای محوری و گریز از مرکز، با هدف توسعه گستره ناحیه عملکرد پایدار کمپرسور مطالعه نموده‌اند. لگراس<sup>۱</sup> و همکاران [۵]، اثرات شیارهای محیطی را بر ناسا رتور ۳۷ گذرصوت، با هدف بهبود جریان نشتی نوک پره در نزدیکی شرایط سرچ بررسی نمودند. محاسبات پایای آن‌ها با روش حجم محدود انجام پذیرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که شیارها، توسعه ورتکس نشتی نوک پره در راستای عمود بر وتر پره را

با کاهش ممنتوم موجود در مکانیزم چرخشی آن، محدود می‌کنند. ژائو<sup>۲</sup> و همکاران [۶]، سه نوع روش اصلاح پوسته مختلف شامل، شیار محیطی، مکش هوا همراه با شیارهای محیطی و پره فرورفته را در یک کمپرسور گریز از مرکز سرعت بالا بررسی نمودند. در این تحقیق، مدل سازی عددی جریان با استفاده از یک مدل سه بعدی انجام گرفت. آن‌ها ثابت کردند که این نوع اصلاح پوسته می‌تواند محدوده عملکرد پایدار کمپرسور را افزایش دهد، لیکن موجب کاهش بازده کمپرسور می‌شود. ژائو<sup>۳</sup> و ژانگ [۷]، هشت شکل مختلف از شیارهای محیطی را به روش عددی تحلیل نمودند. ایشان دریافتند که انتخاب مناسب پارامترهای هندسی شیار، نقش مهمی در بهبود پایداری کمپرسور دارد. یک کمپرسور گریز از مرکز تک مرحله ای متعلق به یک توربوشارژر هواپیما توسط حسن<sup>۴</sup> [۸]، مورد بررسی قرار گرفت. او چهار نوع اصلاح پوسته مختلف شامل، شیار محیطی، جلورفتگی پوسته، ترکیب شیارهای محیطی و جلورفتگی پوسته و شیارهای شعاعی را درون شکاف میان ایمپلر و دیفیوزر بررسی کرد. نتایج این بررسی نشان داد که این نوع اصلاحات پوسته، سبب بهبود محدوده عملکرد پایدار کمپرسور می‌شوند. ویلک<sup>۵</sup> و همکاران [۹]، اثرات دو مکانیزم شیارهای محیطی و یک نوع خاص از اسلات را بر میدان جریان یک ردیف پره کمپرسور فشاربالا، با استفاده از حل معادلات سه بعدی متوسط گیری شده رینولدز ارائه کردند. تامیسون<sup>۶</sup> و همکاران [۱۰]، آزمایش‌هایی را در مورد اثر شیار پوسته در اندازه‌های درز نوک مختلف انجام دادند. آنها آزمایش‌های خود را در یک رتور کمپرسور محوری گذرصوت انجام داده، دریافتند که در اندازه‌های درز نوک کوچک و متوسط، شیار پوسته سبب اصلاح کارایی و افزایش نسبت فشار در محدوده وسیعی از شرایط عملکردی می‌شود. کینگ<sup>۷</sup> و همکاران [۱۱]، اثرات سه نوع تغییر شکل پوسته را روی یک فن گذرصوت یک مرحله‌ای آزمایش کردند. آنها کارایی کمپرسور را در وضعیت پوسته صاف و پوسته تغییر یافته با هم مقایسه

<sup>2</sup> Gao<sup>3</sup> Gao<sup>4</sup> Hassan<sup>5</sup> Wilke<sup>6</sup> Thompson<sup>7</sup> Qing<sup>1</sup> Legras

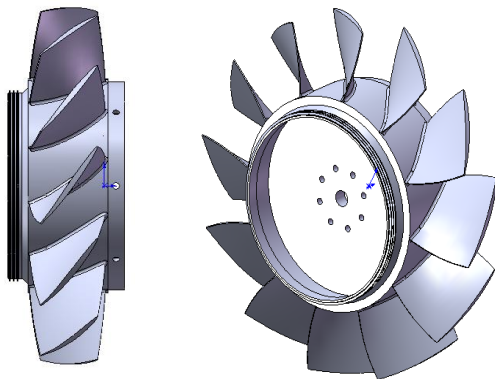
محوری، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ بنابراین با استفاده از ابزارهای تجربی و عددی، درک عمیق‌تری از اثر اصلاح پوسته بر نوسانات جریان نشتی نوک و تغییرات ساختار جریان حاصل می‌شود.

## ۲- معرفی مجموعه آزمایشگاهی

### ۲-۱- تست ریگ کمپرسور محوری سرعت پایین

مطالعات تجربی حاضر در یک تست ریگ کمپرسور محوری انجام شده است که شامل یک رتور ایزوله شده منفرد است. برخی از مشخصه‌های هندسی این کمپرسور، در جدول ۱ شرح داده شده است. نمایی از پره کمپرسور محوری، در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

اجزای اصلی سیستم محرکه تست ریگ کمپرسور شامل، موتور الکتریکی، اینورتر (inverter) (کنترل کننده دور محور) و گیربکس است. دبی جرمی کمپرسور به وسیله یک شیر تنظیم می‌شود که در پایین دست رتور قرار گرفته است. شماتیک تست ریگ کمپرسور محوری، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ - نماهای مختلف رتور کمپرسور محوری

جدول ۱- مشخصه‌های رتور کمپرسور محوری تک مرحله‌ای

مقدار	واحد	مشخصه
۲۷۰	میلی متر	قطر پایه
۱/۷	-	اندازه درز نوک (نسبت به کورد)
۱۱۷/۵	میلی متر	طول کورد نوک
۱۲	-	تعداد پره
۱۳۰۰	دور بر دقیقه	سرعت دورانی
۵۶/۲	درجه	زاویه نصب در نوک

کردند. مشخص گردید که شکل‌های مختلف پوسته، اثرات متفاوتی بر بازده و پایداری کمپرسور می‌گذارند. رابه<sup>۱</sup> و هاه<sup>۲</sup> [۱۲]، اثرات شیار پوسته بر حاشیه استال را به دو روش عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها دلیل بهبود حاشیه استال را اثر شیار پوسته بر زاویه برخورد جریان ذکر کرده، دریافتند که شیارهای کم‌عمق، اثر بهتری بر بهبود حاشیه استال می‌گذارند. لو<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۳]، اثرات انواع شیار پوسته را روی کارایی و میدان جریان یک کمپرسور محوری بررسی کردند. آنها مطالعات خود را به دو روش عددی و آزمایشگاهی روی اندازه‌های درز نوک مختلف و نیز هشت شکل مختلف پوسته انجام داده، برای حل عددی از معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز استفاده کردند. شبیر<sup>۴</sup> و آدامسزیک<sup>۵</sup> [۱۴]، تحلیل عددی پایا را برای درک مکانیزم بهبود حاشیه استال به کار بردند. آنها این تحلیل را روی یک رتور کمپرسور محوری متأثر از شیار پوسته به کار بردند. این تحلیل نشان داد که محدوده عملکرد رتور متأثر از شیار پوسته افزایش می‌یابد.

همان طور که ذکر شد، اصلاح پوسته یکی از روش‌هایی است که جهت اصلاح کارایی و بهبود حاشیه استال به کار می‌رود. شکل‌های گوناگون پوسته و اثرات آنها بر کارایی کمپرسور توسط محققان متعددی مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات عمدتاً به تاثیر شیار پوسته بر کارایی کمپرسور (بازده و نسبت فشار) پرداخته‌اند و اثر پوسته اصلاح شده بر دینامیک جریان، کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ در حالی که کاملاً واضح است که میدان جریان نشتی نوک به خصوص در شرایط بارگذاری زیاد، طبیعتی ناپایا دارد. به علاوه ناپایایی ورتکس نشتی نوک ممکن است، منجر به وقوع اغتشاشاتی در ساختار جریان شود؛ لذا در مقاله حاضر، علاوه بر بررسی اثر شیار پوسته بر منحنی عملکرد، دینامیک جریان و مکانیزم اثرگذاری پوسته اصلاح شده از نوع شیار محیطی در نوسانات جریان در شرایط مختلف عملکردی اعم از طراحی و شرایط نزدیک استال در یک رتور کمپرسور

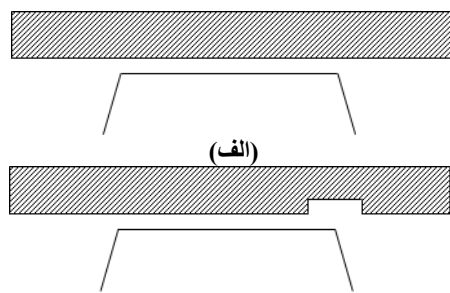
<sup>1</sup> Rabe

<sup>2</sup> Hah

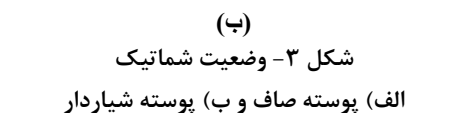
<sup>3</sup> Lu

<sup>4</sup> Shabbir

<sup>5</sup> Adamczyk



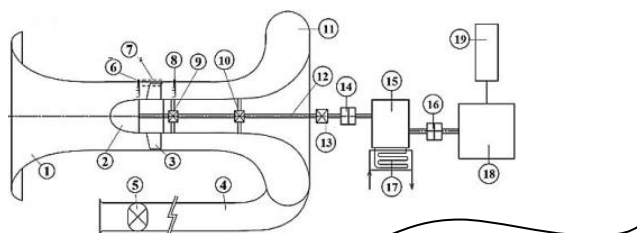
(الف)



(ب)

شکل ۳- وضعیت شماتیک

(الف) پوسته صاف و (ب) پوسته شیاردار



- |                          |                        |                        |
|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 1- Bell Mouth Air Intake | 8- Rear Pressure Rakes | 15- Increasing Gearbox |
| 2- Spinner               | 9- Bearing #1          | 16- Coupling #2        |
| 3- Rotor Blade Row       | 10- Bearing #2         | 17- Oil Cooler         |
| 4- Outlet Duct           | 11- Spiral Collector   | 18- Electro-motor      |
| 5- Throttle Valve        | 12- Rotor Shaft        | 19- Inverter           |
| 6- Front Pressure Rakes  | 13- Bearing #3         |                        |
| 7- Casing Treatment      | 14- Coupling #1        |                        |

شکل ۲- شماتیک کمپرسور محوری تست ریگ کمپرسور محوری

#### ۴- تجهیزات اندازه گیری

فشارهای کل با ریک‌های چند سوراخه شعاعی نصب شده در بالادست و پایین دست طبقه مورد نظر، اندازه‌گیری می‌شوند. به‌طور معمول از چندین ریک به‌صورت جداگانه و با فواصل محیطی یکسان استفاده می‌شود. نسبت فشار طبقه با استفاده از فشار متوسط اندازه‌گیری شده از ریک‌های فشار کل ورودی و خروجی محاسبه می‌شوند. تعداد ریک‌ها باید طوری انتخاب شوند که میدان جریان را به اندازه کافی پوشش داده، در عین حال مسیر جریان توسط ریک‌های نصب شده نه مسدود شود و نه به طور قابل توجهی تغییر کند. در تحقیق حاضر، به منظور اندازه‌گیری فشار کل از چهار ریک فشار در ورود و چهار ریک فشار در خروج بهره گرفته شده است. برای اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی، از مجرای شیپوری ورودی تست‌ریگ کمپرسور استفاده شده است. فشار استاتیک با تپ‌های نصب شده همسطح دیواره‌های مجرای روی پوسته بیرونی اندازه‌گیری می‌شود. تصویری از محل قرارگیری ریک فشار کل و یک ردیف تپ‌فشار استاتیک روی پوسته کمپرسور، در شکل ۴ نشان داده شده است.

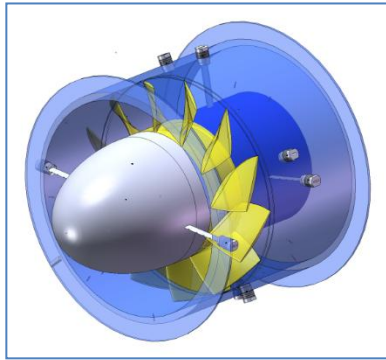
برای اندازه‌گیری فشار ناپایا در پوسته کمپرسور، از ترنسدیوسرهای کولایت<sup>۱</sup> به همراه برد الکترونیکی واسط و نیز کارت داده‌برداری مناسب بهره گرفته شده است. در شکل ۵، نمایی از این سنسورها نشان داده شده است. این ترنسدیوسرها، فشار را با یک پل ولتستون از نوع مقاومت پیرو اندازه‌گیری می‌کنند. ترنسدیوسرها دارای پاسخ فرکانسی ۳۰

<sup>۱</sup> kulite

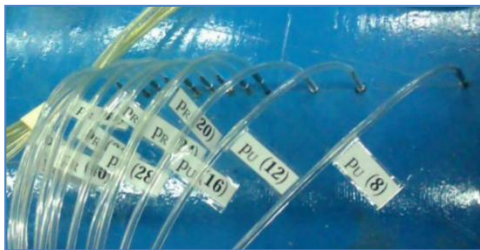
#### ۳- شکل هندسی پوسته شیاردار

در تحقیق حاضر، یک شیاردار سراسری در دیواره داخلی پوسته کمپرسور ایجاد شده، اثر وجود این شیاردار بر عملکرد کلی کمپرسور، جریان نشتی نوک و ناپایداری‌های حاصل از آن، مورد مطالعه قرار گرفته است. این شیاردار به عمق ۱/۸mm بوده و در مکانی بین ۹۰٪ تا ۱۰۸٪ اندازه وتر نوک رتور واقع شده است. شکل ۳، وضعیت شماتیک پوسته صاف و شیاردار را نشان می‌دهد.

مشابه این هندسه شیاردار توسط لو و همکاران [۱۳]، در رتور دیگری مورد استفاده قرار گرفته است. لو و همکاران در تحقیق خود به بررسی اصلاح پوسته از نوع شیاردار محیطی با عمق‌ها و عرض‌های مختلف در اندازه درز نوک‌های کوچک، متوسط و بزرگ پرداختند. آنها حاصل تحقیقات تجربی و عددی خود را به این صورت جمع‌بندی کردند که شیاردار واقع بین ۹۰٪ تا ۱۰۸٪ اندازه وتر نوک پره، موجب افزایش عملکرد پره‌ها با درز نوک متوسط (۱/۹ درصد اندازه وتر در مقطع نوک پره) می‌شود؛ بنابراین گرچه شکل هندسی و عملکرد کلی آیرودینامیکی رتور مورد مطالعه در تحقیق حاضر با رتور مطالعه شده در تحقیق لو و همکاران [۱۳] متفاوت است، اما به دلیل شباهت بین اندازه درز نوک رتور حاضر (۱/۷ درصد اندازه وتر در مقطع نوک پره) با اندازه درز نوک رتور لو و همکاران (۱/۹ درصد اندازه وتر در مقطع نوک پره)، اصلاح پوسته مشابهی بکار گرفته شده است. برای اینکه مقایسه بین نتایج پوسته صاف و شیاردار میسر باشد، موقعیت تمامی تپینگ‌های فشار استاتیک و همچنین ریک‌های فشار کل در هر دو پوسته صاف و شیاردار یکسان می‌باشند.

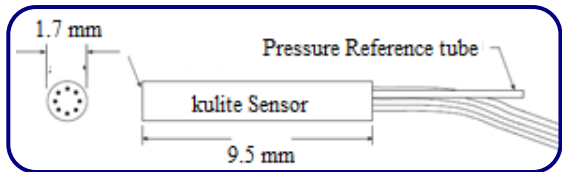


(الف)

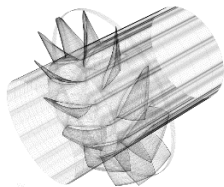


(ب)

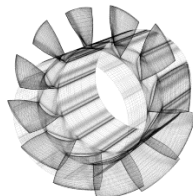
شکل ۴- الف) موقعیت ریک‌های فشار کل و ب) تپ‌های فشار استاتیک روی دیواره‌ی کمپرسور



شکل ۵- ترنس‌دیوسرهای فشار کولایت



(ب)



(الف)

شکل ۶- هندسه محاسباتی و توزیع شبکه روی دیواره‌ها (الف) پوسته صاف و (ب) پوسته شیاردار

کیلوهرتز بوده، قادر به اندازه‌گیری فشار در محدوده ۰ تا ۵psi می‌باشند؛ همچنین حساسیت ترانس‌دیوسرها، ۰/۰۰۲ میلی‌ولت بر پاسکال است. ترنس‌دیوسرها در تونل باد مادون صوت کالیبره گردیده‌اند. به منظور تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال، از یک کارت تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال (A/D) دوازده کاناله شانزده بیتی استفاده شده است. کارت داده‌برداری (تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال) با فرکانس داده‌برداری ۲۰۰ کیلوهرتز است. لوله‌های تپینگ‌های فشار به ترنس‌دیوسرها ناپایا متصل شده، این ترانس‌دیوسرها فشار را به ولتاژ تبدیل می‌نمایند. ولتاژ حاصل توسط برد الکترونیکی به کارت داده‌برداری اکسترنال منتقل و پس از تبدیل داده‌های ثبت شده به داده‌های رقمی به رایانه داده‌برداری منتقل می‌گردند.

#### ۵- تحلیل عددی جریان و تنظیمات حل

برای فهم بهتر رخداد‌های موجود در کمپرسور محوری و با توجه به محدودیت‌های بسیاری که در انجام آزمایشات تجربی وجود دارد، تحلیل عددی جریان می‌تواند کمک بسیاری در فهم عمیق‌تر جزئیات ساختار جریان در شرایط مختلف عملکردی انجام دهد. بر این اساس در تحقیق حاضر، تحلیل جریان با یک نرم‌افزار تجاری انجام شده است که قابلیت تحلیل سه‌بعدی، ویسکوز و گذرا را داراست. این نرم افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر مسئله شامل، مومنتوم و پیوستگی بهره می‌برد. در حل معادلات گذرا، گسسته‌سازی زمانی با استفاده از روش ضمنی مرتبه دوم در نرم‌افزار تنظیم گردیده است. کوپل کردن میدان‌های فشار و سرعت از طریق الگوریتم سیمپل صورت می‌گیرد. شبکه‌بندی این مجموعه به صورت مش سازمان‌یافته چندبلوکه انجام شده است. در شکل ۶، سیستم مش سطوح روی دیواره مدل نشان داده شده‌اند. هر گذرگاه جریان شامل، ۷۴ نود در جهت جریان، ۵۰ نود در جهت شعاعی و ۶۰ نود در جهت محیطی است، فضای شعاعی بین نوک پره و پوسته کمپرسور به ۱۶ نود تقسیم می‌شوند. دانسیته مش در نزدیکی دیواره‌ها طوری است که  $\gamma^+ < 5$  بوده تا بدون استفاده از توابع دیواره و با اعمال شرط عدم لغزش و آدیاباتیک، میزان فلاکس ویسکوز در مجاورت دیواره ارزیابی شود. به منظور بررسی اثر پوسته شیاردار بر رفتار جریان نشتی نوک، یک شیاردار سراسری در

ناشی از تکرارپذیری آزمایشات نیز، استخراج گردیده است.

$$U(\psi) = \sqrt{\left(\frac{\partial \psi}{\partial P_{01}} U_{P_{01}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial P_{02}} U_{P_{02}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial U_t} U_t\right)^2} \quad (1)$$

با توجه به شکل ۷ مشخص است که میزان خطا در داده‌های اخذ شده بسیار کم است؛ لذا این اطمینان حاصل می‌شود که نتایج اخذ شده، صحیح و قابل قبول است.

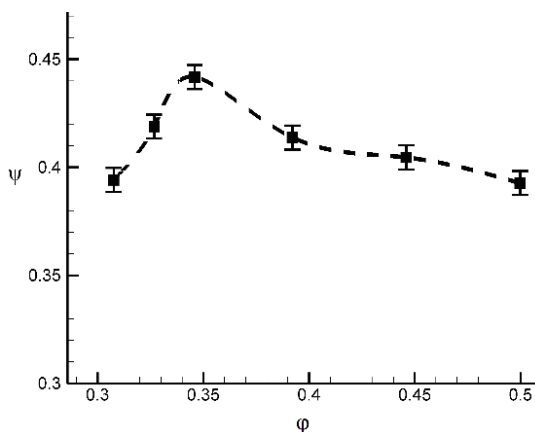
### ۶-۲- منحنی‌های عملکرد کمپرسور برای دو حالت پوسته صاف و شیاردار

در تحقیق تجربی با تغییر دبی جرمی از طریق شیر تراشل و از طریق اندازه‌گیری فشار کل در ورود و خروج توسط ریک‌های فشار کل و همچنین مقادیر دبی جرمی، منحنی‌های عملکرد کمپرسور به صورت تغییرات نسبت فشار برحسب دبی استخراج می‌شود. در شکل ۸، منحنی مشخصه کمپرسور به صورت نمودار  $(\psi - \varphi)$  برای هر دو پوسته صاف و شیاردار ترسیم شده است. مقادیر  $\psi$  و  $\varphi$  از روابط (۱-۲) به دست آمده‌اند.

$$\varphi = \frac{C_X}{U_t} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\Delta P}{1/2 \rho U_t^2} \quad (3)$$

در روابط بالا،  $\psi$  ضریب افزایش فشار،  $\Delta P$  افزایش فشار کل مرحله و  $U_t$  سرعت محیطی نوک پره رتور است.



شکل ۷- منحنی مشخصه کمپرسور به همراه عدم قطعیت فشارهای اندازه‌گیری شده

دیواره داخلی کمپرسور ایجاد شده است. تعداد سلول‌های محاسباتی در شیاردار محیطی به ترتیب، ۱۰ و ۱۰ و ۳۰۰ در جهت‌های شعاعی، محوری و محیطی می‌باشند. مجموع کل سلول‌های محاسباتی در سیستم شبکه‌بندی، ۳۵۴۶۰۰۰ است. روش حل و شرایط مرزی به کار رفته در تحلیل پوسته شیاردار، مشابه پوسته صاف است. به منظور استخراج تنش‌های رینولدز و تخمین ویسکوزیته ادی، از مدل توربولانسی دو معادله‌ای  $k-\omega$ -SST استفاده شده است [۱۵]. برای شبیه‌سازی ناپایای جریان، مقدار گام زمانی به نحوی انتخاب شده است که یک گام پره در ۱۲۰ گام زمانی تکمیل شود. از این رو یک گردش کامل در ۱۴۴۰ گام زمانی تکمیل شده است و از آنجا که سرعت گردش رتور ۱۳۰۰ دور در دقیقه است، هر گام زمانی در  $3/2 \times 10^{-5}$  ثانیه و یک دور کامل در  $4/6 \times 10^{-2}$  ثانیه تکمیل می‌شود. در تحلیل حاضر، فریم‌های مرجع چندگانه<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور، پوسته کمپرسور به قسمت‌های ثابت و چرخان تقسیم شده، سطح مشترک لغزان<sup>۲</sup> مابین دو منطقه جریان تعریف گردیده است.

در مرز ورودی، سرعت ورودی و جهت جریان اعمال شده است. توزیع فشار استاتیک با استفاده از قانون تعادل شعاعی در مرز خروجی تحمیل شده است. شرط عدم لغزش روی تمام دیواره‌های جامد لحاظ گردیده است. معیار همگرایی در حل عددی مقادیر باقیمانده معادلات اصلی، به حدود  $10^{-7}$  در نظر گرفته شده است.

### ۶- نتایج

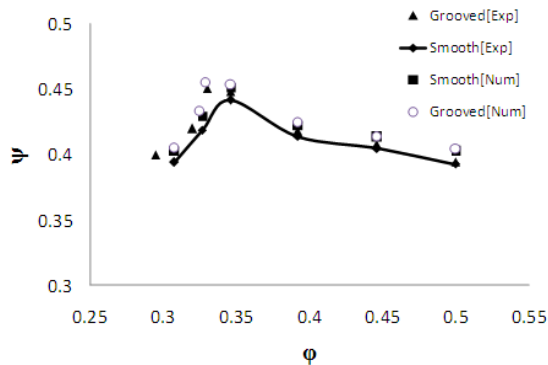
#### ۶-۱- بررسی عدم قطعیت

عدم قطعیت کلی یک اندازه‌گیری، از مجموع عدم قطعیت سیستمی و عدم قطعیت ناشی از تکرارپذیری بدست می‌آید. عدم قطعیت سیستمی ضریب بار  $(\psi = 2\Delta P_0 / \rho U_{tip}^2)$ ، با بهره‌گیری از روش مجموع مربع ریشه<sup>۳</sup>، از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود. در این رابطه  $P_{01}$  و  $P_{02}$  به ترتیب، فشار کل در ورود و خروج از کمپرسور می‌باشند. همچنین عدم قطعیت

<sup>1</sup> Multiple Reference Frames

<sup>2</sup> Sliding Interface

<sup>3</sup> Rss; Root Sum Square



شکل ۸ - منحنی عملکرد کمپرسور برای دو حالت پوسته صاف و شیاردار

طیف فرکانسی بر اساس اعمال اپراتور فوریه (FFT) بر سیگنال‌های فشار استخراج می‌شود. با اعمال این اپراتور مقادیر دانسیته طیف قدرت بر حسب مقادیر فشار بدست آمده، سیگنال‌های فشار از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل می‌شوند. به منظور بی‌بعد سازی فرکانس و مقایسه فرکانس‌ها با فرکانس عبوری پره، مقادیر فرکانس نوسانات فشار بر فرکانس عبوری پره تقسیم شده است؛ بنابراین محور x در نمودارهای ۹ و ۱۰ مقادیر فرکانس بر فرکانس عبوری پره (Frequency/Blade Passing Frequency) را نشان می‌دهد که در بازه صفر تا ۱/۲ ترسیم گردیده‌اند. در محور y نیز، مقادیر دانسیته طیف توان قرار داده شده است.

مقایسه شکل‌های ۹-الف و ۱۰-الف نشان می‌دهد که در پوسته صاف در شرایط نزدیک استال، نوسانات جریان به مراتب بیشتر از نوسانات جریان در شرایط طراحی است؛ بطوری‌که فرکانس غالب در شرایط طراحی فرکانس عبوری پره است، اما در شرایط نزدیک استال ناشی از وقوع ورتکس نشستی نوک و نوسانات ناشی از آن در میدان جریان، فرکانس‌های مختلفی در منطقه درز نوک به وجود می‌آید. این نوسانات می‌تواند بر ارتعاش پره‌ها اثر گذاشته، موجب گسیختگی شود؛ همچنین با توجه به اینکه تداخلات جریان اصلی و جریان نشستی منجر به وقوع ورتکس نشستی نوک گردیده است، تداوم این وضعیت منجر به پخش نوسانات و سلول‌های استال در راستای شعاعی و محیطی کمپرسور گردیده که با ایجاد انسداد در مسیر جریان اصلی، عملکرد کلی کمپرسور و ایجاد نسبت فشار را دچار اختلال جدی می‌کند. با توجه به شکل ۹ مشخص است که در ضریب

مشخص است که نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. شکل ۸ نشان می‌دهد که رتور با پوسته اصلاح شده، در شرایط نزدیک استال نسبت فشار بیشتری ایجاد می‌کند؛ همچنین مشخص است که در پوسته اصلاح شده، ماکزیمم نسبت فشار در ضریب جریان کمتری رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، طرح مورد استفاده برای پوسته شیاردار علاوه بر اینکه افزایش کمی در میزان نسبت فشار ایجاد می‌کند، محدوده عملکرد پایدار کمپرسور را نیز توسعه داده، وقوع ناپایداری‌ها را به تاخیر می‌اندازد.

از جمله مشخصه‌های مهم در طراحی کمپرسور، میزان حاشیه استال است. فاصله بین نقاط عملکردی و نقاط ناپایداری یک کمپرسور با حاشیه استال شناخته می‌شود. در تحقیق حاضر، بهبود حاشیه استال ناشی از اعمال پوسته شیاردار با استفاده از رابطه (۴) تقریباً ۶٪ بدست آمده است. به عبارت دیگر، کمپرسور محوری حاضر با اعمال پوسته شیاردار قادر است تا ۶ درصد محدوده عملکردی بیشتری داشته باشد که نتیجه مطلوبی است.

Stall Margine Improvement (SMI) =

$$\frac{\rho_{Smooth} - \rho_{Groove}}{\rho_{Smooth}} = 5.7\% \quad (4)$$

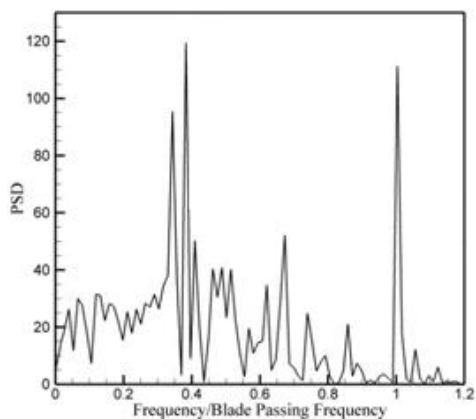
## ۶-۲- بررسی نوسانات جریان نشستی نوک

طبیعت ناپایایی ورتکس نشستی نوک را می‌توان با اندازه‌گیری فشار استاتیک گذرا در منطقه درز نوک، مورد بررسی قرار داد. بدین منظور با استفاده از سنسورهای فشار با پاسخ فرکانسی بالا (کولایت)، سیگنال‌های فشار در موقعیت‌های مختلف روی پوسته استخراج گردید. به منظور بررسی اثرات شیار پوسته در شرایط مختلف عملکردی، نتایج برای دو حالت طراحی (φ=۰/۵) و شرایط نزدیک استال (φ=۰/۳۵) در هر دو پوسته استخراج گردیده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که نوسانات جریان در شرایط نزدیک استال در موقعیت لبه حمله، بیشتر از موقعیت‌های دیگر است. بر این اساس در شکل ۹، طیف فرکانسی جریان در لبه حمله برای پوسته‌های صاف و شیاردار در شرایط طراحی و در شکل ۱۰، نتایج مشابه در شرایط نزدیک استال ارائه گردیده است.

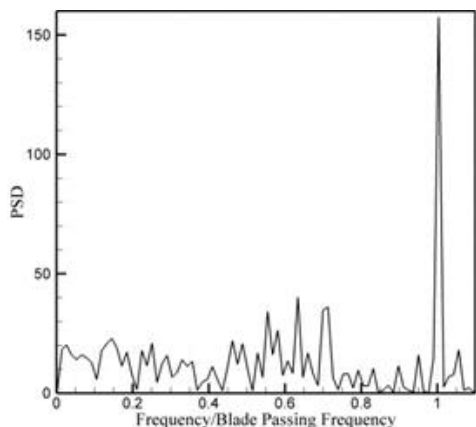
این نمودارها از طریق تحلیل فرکانسی سیگنال‌های استخراج شده توسط ترنزدیوسرهای فشار بدست می‌آیند.

محدوده 0.5BPF-0.7BPF قرار می‌گیرد، ثانیاً قدرت فرکانس جریان نشستی نوک در پوسته شیاردار کاهش یافته است. این امر بیانگر کاهش قدرت جریان نشستی نوک و بالتبع کاهش قدرت ورتکس نشستی نوک ایجاد شده در حالت شیاردار نسبت به پوسته صاف است. به عبارت دیگر، در حالت پوسته اصلاح شده میدان جریان در منطقه درز نوک، تاثیر کمتری از جریان نشستی نوک پذیرفته است؛ بنابراین اصلاح پوسته استفاده شده از نوع شیار محیطی منجر به بهبود پایداری کمپرسور در شرایط نزدیک استال می‌شود. بدین ترتیب نوسانات جریان بسیار کمتر شده، لذا اثرات مخرب آن از بین می‌رود.

جریان طراحی ( $\varphi=0/5$ ) که شدت نوسانات فشار در پوسته شیاردار نسبت به پوسته صاف به میزان کمی افزایش یافته است. افزایش میزان اغتشاشات در شرایط طراحی، می‌تواند ناشی از تداخل جریان محوری و شعاعی در محل شیار واقع در منطقه درز نوک و توسعه آن به بخش‌های دیگر باشد. در ضریب جریان نزدیک استال ( $\varphi=0/35$ )، طیف فرکانسی در حالت پوسته صاف بروز فرکانس‌هایی در محدوده 0.3BPF-0.5BPF را با شدت زیاد نشان می‌دهد که بیانگر اثر غالب ورتکس نشستی نوک بر ساختار جریان است؛ بطوریکه در کنار فرکانس عبوری پره، فرکانس‌های دیگری نیز به عنوان فرکانس غالب وجود دارند، اما در پوسته شیاردار در شرایط نزدیک استال، اولاً فرکانس نوسانات کمی افزایش یافته و در

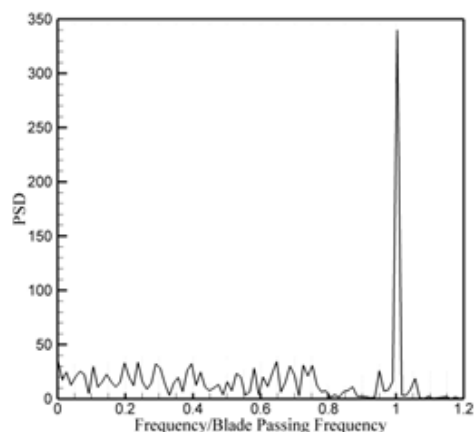


(الف)

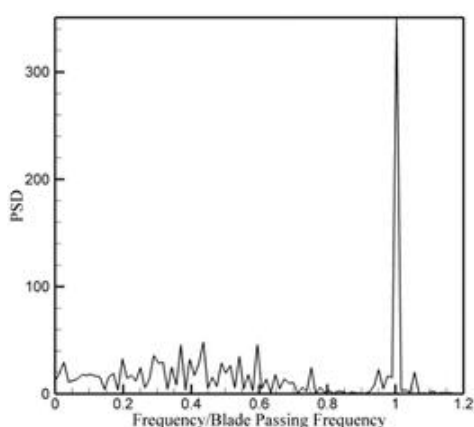


(ب)

شکل ۱۰- طیف فرکانسی در لبه حمله در شرایط نزدیک استال (الف) پوسته صاف و (ب) پوسته شیاردار



(الف)

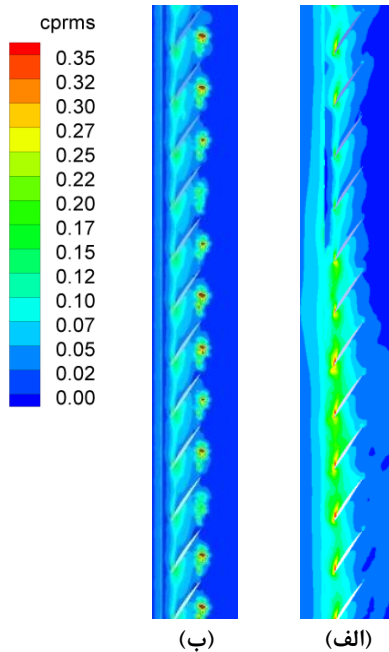


(ب)

شکل ۹- طیف فرکانسی در لبه حمله در شرایط طراحی ( $\varphi=0/5$ ) (الف) پوسته صاف و (ب) پوسته شیاردار



فصل مشترک پوسته اصلی و شیار، ناشی از برخورد جریان شعاعی و جریان محوری ناپایایی‌ها افزایش یافته است. در شکل ۱۲ کانتور ضریب فشار کل نسبی در ۹۷٪ فاصله شعاعی برای هر دو پوسته صاف و شیاردار نشان داده شده است. برای درک بهتر ساختار جریان، خطوط جریان به این دو کانتور الحاق گردیده است.



شکل ۱۱- کانتور نوسانات ناپایای متوسط‌گیری شده فشار استاتیکی در ۹۷٪ فاصله شعاعی (الف) پوسته صاف و (ب) پوسته شیاردار

همانطور که در شکل ۱۲-الف ملاحظه می‌شود، در حالت پوسته صاف، برگشت جریان رخ داده است. خطوط جریان از یک گذرگاه به سمت لبه حمله پره مجاور حرکت کرده، وارد آن گذرگاه می‌شوند؛ همچنین ورتکس نشستی قوی در نزدیکی لبه حمله پره ایجاد گردیده است. این امر حکایت از قدرت جریان نشستی نوک در مقابل جریان اصلی و وقوع ورتکس نشستی نوک قوی در این منطقه دارد. این نتیجه تاییدی بر نتایج تجربی طیف فرکانسی در شرایط نزدیک استال (شکل ۱۱) است که از افزایش شدت نوسانات در لبه حمله خبر می‌دهد. به عبارت دیگر، افزایش شدت نوسانات در لبه حمله پره‌ها در اندازه‌گیری تجربی (شکل ۱۱-الف)،

### ۳-۶- تاثیر شیار پوسته بر رفتار کلی ورتکس نشستی نوک ناپایا

به منظور ارزیابی بهتر نحوه اثربخشی پوسته شیاردار لازم است که ساختار جریان در کمپرسور با پوسته صاف و پدیده‌های رخ داده در این حالت به درستی شناسایی گردند. بررسی تجربی نوسانات جریان نشان دادند که در شرایط نزدیک استال، نوسانات جریان در کمپرسور با پوسته صاف بسیار بیشتر از پوسته شیاردار است. با توجه به محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌های تجربی، برای درک عمیق‌تر تغییرات ساختار جریان با اعمال پوسته شیاردار، به بررسی کانتورهای حاصل از تحلیل عددی در شرایط نزدیک استال پرداخته می‌شود.

برای شناسایی بهتر رفتار جریان نشستی نوک ناپایا، ضریب نوسانات ناپایای متوسط‌گیری شده فشار استاتیکی در ۹۷٪ فاصله شعاعی پره در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این ضریب توسط رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$C_{p,rms} = p_{rms} / 0.5\rho u_t^2 \quad (5)$$

در این رابطه  $p_{rms}$  جذر مربع نوسانات متوسط‌گیری شده فشار استاتیکی است که از رابطه (۶) حاصل می‌شود.

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (p(t) - \bar{p})^2} \quad (6)$$

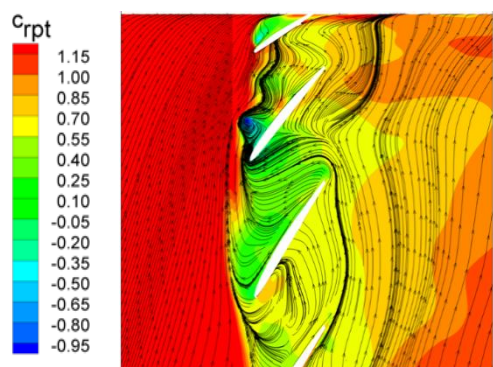
در رابطه بالا  $p$  فشار ناپایای استاتیکی و  $\bar{p}$  متوسط آن است و از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N p(t)} \quad (7)$$

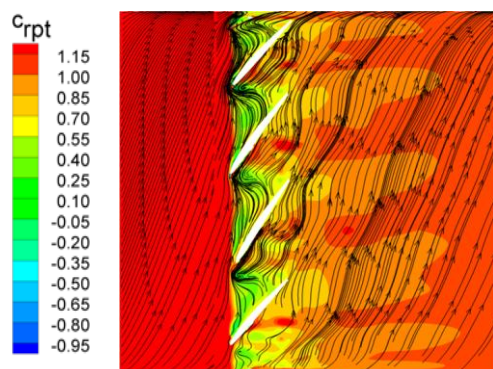
این کانتورها رفتار کلی جریان نشستی نوک ناپایا را نشان می‌دهند که شامل، شدت، مکان و اندازه ورتکس نشستی نوک است.

در شکل ۱۱ مقادیر نوسانات ناپایای متوسط‌گیری شده فشار استاتیکی به صورت بی‌بعد در ۹۷٪ فاصله شعاعی برای هر دو پوسته صاف و شیاردار نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که در پوسته صاف برخلاف پوسته شیاردار، مقادیر این پارامتر در همه گذرگاه‌ها یکسان نمی‌باشد. این امر ناشی از اختلاف در قدرت جریان نشستی نوک در گذرگاه‌های مختلف است. با مقایسه مقادیر دو پوسته صاف و شیاردار، این حقیقت آشکار می‌شود که اصلاح پوسته موجب کاهش قدرت ورتکس نشستی نوک می‌شود. هر چند در



(الف)

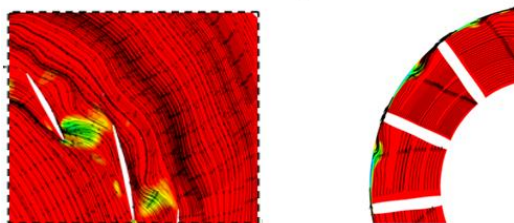


(ب)

شکل ۱۲- کانتور ضریب فشار کل نسبی در ۹۷٪ فاصله شعاعی (الف) پوسته صاف و (ب) پوسته شیاردار



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- کانتور ضریب سرعت محوری در ۹۷٪ فاصله شعاعی (سمت چپ) و ۵۰٪ وتر پره (سمت راست) (الف) پوسته صاف (ب) پوسته شیاردار

ناشی از وقوع ورتکس نشتی نوک قوی در این منطقه است؛ این در حالی است که با اعمال پوسته شیاردار، ورتکس لبه‌حمله بکلی مضمحل گردیده، ورتکس بسیار ضعیفی در میانه گذرگاه ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، ایجاد شیار محیطی روی پوسته منجر به تضعیف جریان نشتی نوک، نوسانات ناشی از آن و همچنین انسداد ایجاد شده می‌شود. بعلاوه در پوسته شیاردار هیچ جریان برگشتی به سمت بالادست مشاهده نمی‌گردد. بر این اساس مشخص می‌شود که آنچه موجب بهبود عملکرد کمپرسور محوری و بهبود حاشیه استال با اعمال پوسته شیاردار گردیده است، تضعیف جریان نشتی نوک و حذف اثرات نامطلوب آن نظیر، رخداد ورتکس نشتی نوک و انسداد و نوسان ناشی از آن است.

به منظور شناسایی مشخصه‌های پخش سلول‌های استال در جهت‌های محوری، شعاعی و محیطی، نتایج ضریب سرعت محوری در صفحه‌ای واقع در ۹۷٪ فاصله شعاعی و همچنین صفحه‌ای واقع در ۵۰٪ وتر پره برای هر دو پوسته صاف و شیاردار در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

مقدار ضریب سرعت محوری به کمک رابطه (۸) محاسبه شده است.

$$C_{av} = \frac{C_z}{u_t} \quad (8)$$

برای نمایش مناطق با جریان برگشتی، کانتورهای با مقادیر ضریب سرعت محوری منفی ارائه گردیده‌اند. همانطور که در شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود که در پوسته صاف یک سلول استال ایجاد گردیده است که در حدود ۲۵٪ شعاع پره را اشغال کرده است. در محل رخداد سلول استال جریان‌های برگشتی ایجاد شده، منجر به ایجاد انسداد قابل توجهی در مسیر جریان اصلی می‌گردند. مقایسه شکل ۱۳-ب با شکل ۱۳-الف، نشان‌دهنده این حقیقت است که اعمال پوسته شیاردار، موجب عدم رخداد سلول استال قوی و جریان برگشتی می‌شود.

این در حالی که در پوسته شیاردار مناطق مسدودکننده جریان شامل، نوار بسیار باریک در نزدیک پوسته بوده که در جهت‌های مختلف نیز گسترش اندکی داشته است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح پوسته مانع از پخش سلول‌های استال در جهت شعاعی گردیده است.

### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج آزمایشگاهی و عددی پیرامون عملکرد کمپرسور محوری با پوسته‌های صاف و شیاردار ارائه گردیده است. آزمایشات در تست ریگ کمپرسور محوری انجام گردیده است که شامل یک رتور منفرد است. عملکرد کلی کمپرسور در قالب نمودارهای تغییرات ضریب‌بار بر حسب ضریب جریان برای پوسته‌های صاف و شیاردار به صورت تجربی و عددی استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهد که با ایجاد شیاری کوچک در فاصله ۹۰ درصد تا ۱۰۸ درصد فاصله وتر پره روی پوسته، حاشیه استال حدود ۶ درصد افزایش می‌یابد؛ همچنین مقادیر نسبت فشار کمپرسور در پوسته شیاردار در شرایط نزدیک استال نسبت به پوسته صاف افزایش کمی یافته است. بررسی نوسانات فشار با استفاده از سنسورهای فشار نشان می‌دهد که در پوسته صاف نوسانات جریان ناشی نوک در شرایط نزدیک استال نسبت به شرایط طراحی افزایش زیادی دارد که اثرات نامطلوبی بر عملکرد کلی کمپرسور و ارتعاشات سازه خواهد داشت. بررسی نوسانات در شرایط پوسته شیاردار، حکایت از تضعیف جریان ناشی نوک و فرکانس‌های مرتبط با آن در شرایط نزدیک استال دارد. بررسی جزئیات ساختار جریان حاصل از تحلیل عددی جریان، نشان‌دهنده وقوع ورتکس ناشی نوک قوی در نزدیکی لبه حمله و برگشت جریان به سمت بالادست در شرایط نزدیک استال دارد که با اعمال پوسته شیاردار موارد فوق رخ نمی‌دهند. بر این اساس مشخص می‌شود که آنچه موجب بهبود عملکرد کمپرسور محوری و بهبود حاشیه استال با اعمال پوسته شیاردار گردیده است، تضعیف جریان ناشی نوک و حذف اثرات نامطلوب آن نظیر رخداد ورتکس ناشی نوک و انسداد و نوسان ناشی از آن است.

### ۸- فهرست علائم

اندازه وتر نوک رتور (m)	$c$
ضریب سرعت محوری	$C_{av}$
ضریب فشار کل نسبی	$C_{rpt}$
ضریب نوسانات فشار	$C_{p,rms}$
افزایش فشار کل در هر مرحله (Pa)	$\Delta P$
نرخ جریان	$Q$
شعاع پوسته (m)	$r_c$

شعاع ریشه (m)	$r_h$
شعاع (m)	$r$
سرعت مماسی پره ( $ms^{-1}$ )	$u$
سرعت مماسی نوک رتور ( $ms^{-1}$ )	$u_t$
دور محور (rpm)	$N$
فرکانس عبوری پره (1/s)	$BFP$

**علائم یونانی**

دانسیتته سیال ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$
ضریب جریان	$\varphi$
ضریب بار	$\psi$

### ۹- مراجع

- [1] Zhang HG, Chu WL (2007) 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.
- [2] Taghavi Zenouz R, Solki E, Afshari H (2014) Computational analysis of stepped tip gap casing effect on performance of a centrifugal compressor. Modares Mechanical Engineering 14(3): 136-144. (In Persian)
- [3] Yu Q, Li Q, Li L (2002) The experimental researches on improving operating stability of a single-stage transonic fan. in Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, Netherlands.
- [4] XU W, Wang T, Gu CG (2011) Performance of a centrifugal compressor with holed casing treatment in the large flowrate condition. Science China Technology Science 54(9): 2483-2492.
- [5] Legras G, Gourdain N, Trebinjac I (2010) Numerical analysis of the tip leakage flow field in a transonic axial compressor with circumferential casing treatment. J Therm Sci 19(3): 198-205.
- [6] Gao P, Zhang Y, Zhang S (2010) Numerical investigation of the different casing treatment in a centrifugal compressor. Asia-Pacific Conference on Wearable Computing Systems, Shenzhen, China 51-54.
- [7] Gao P, Zhang S (2010) The analysis of tip flow field in a centrifugal compressor with different circumferential grooves casing treatment. International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, Chengdu, China 21-24.
- [8] Hassan AS (2006) Stability of a low-speed centrifugal compressor with casing treatments.

- [12] Rabe DC, Hah C (2002) Application of casing circumferential grooves for improved stall margin in a transonic axial compressor. ASME Paper No. 2002-GT-30641.
- [13] Lu X, Zhu J, Chu W (2005) Numerical and experimental investigation of stepped tip gap effects on a subsonic axial-flow compressor. Rotor Proc Inst Mech Eng A 219(8): 605-615.
- [14] Shabbir A, Adamczyk JJ (2004) Flow mechanism for stall margin improvement due to circumferential casing grooves on axial compressors. ASME Paper No. 2004-GT-53903, 2004.
- [15] Wilcox DC (2006) Turbulence modeling for CFD. DCW Industries Press, La Canada Flintridge, California, USA 124-128
- aeroelasticity aeroacoustics and unsteady aerodynamics. TORUS Press, Moscow.
- [9] Wilke HP, Kau (2002) 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, Amsterdam, Netherlands.
- [10] Thompson DW, King PI, Robe DC (1998) Experimental Investigation of Stepped Tip Gap Effects on the Performance of a Transonic Axial-Flow Compressor Rotor. J Turbomach 120(3): 477-486.
- [11] Qing Y, Qiushi L, Ling L (2002) The experimental researches on improving operating stability of a transonic fan. ASME Paper No. 2002-GT-30640.