ماهنامه علمى يژوهشى





mme modares ac ir

مطالعه تجربی تاثیر تزریق هوا در از بین بردن استال دورانی در یک کمپرسور محوری

رضا تقوى زنوز 1^* ، محمد حسين عياباف بهيهاني 2^* ، على خوش نژاد 1^*

1- دانشيار، مهندسي مكانيك، دانشگاه علم و صنعت ايران، تهران

2- دانشجوى دكترى، مهندسي مكانيك، دانشگاه علم و صنعت ايران، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستى 13114-16846، taghavi@iust.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله، حذف استال دورانی در یک کمپرسور جریان محوری با به کارگیری تزریق هوا در ناحیه نوک ردیف پره، به صورت تجربی مطالعه شده است، بدین منظور دوازده انژکتور با فواصل یکسان پیرامون پوسته کمپرسور و در بالادست رتور تعبیه گردیدند. در ابتدا بهبود عملکرد کلی کمپرسور از طریق تزریق هوا به ویژه در نقطه استال بررسی شد. سرعت لحظهای جریان در موقعیتهای مختلف شعاعی و محیطی به طور همزمان با استفاده از جریان سنجی سیم داغ لندازه گیری شده است. دادههای حاصل از این اندازه گیریها به همراه تحلیلهای فرکانسی سیگنال، برای توصیف فرایند شکل گیری استال و نوسانات جریان القا شده حاصل از آن از یک سو، و فرایند از بین رفتن استال حین اعمال تزریق هوا از سوی دیگر آرائه شده است. تنایج نشان میدهند که تزریق مقدار کمی هوا در ناحیه نوک پره قادر به اثرگذاری قابل تولی برای افزایش فشار و همچنین حاشیه استال می باشد. تزریق کمتر از 1% از دبی جرمی کلی کمپرسور از طریق انژکتورها، موجب بهبود حاشیه استال تا و ۷ شده است. تزریق هوا در ناحیه نوک پرهه باعث شده تا اثرات مفید آن در تمام ارتفاع پره گسترش یابد، خصوصا مادامی که کمپرسور در نزدیکی	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 13 اردیبهشت 1395 پذیرش: 26 خرداد 1395 ارائه در سایت: 20 مرداد 1395 کلید <i>واژگان:</i> وقوع استال تزریق در نوک پره حاشیه استال
شرايط استال كار مي كند.	

Experimental investigation of air injection effects on rotating stall alleviation in an axial compressor

Reza Taghavi Zenouz^{*}, Mohammad Hosein Ababaf Behbahani, Ali Khoshnejad

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran * P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, taghavi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 02 May 2016 Accepted 15 June2016 Available Online 23 July 2016

Keywords: Axial compressor Stall inception Tip injection Stall margin

S. 15

ABSTRACT

Rotating stall alleviation in an axial compressor with deployment of air injection at its rotor blade row tip region has been experimentally investigated. Twelve air injectors were mounted evenly spaced around the compressor casing upstream the rotor blade row. Initially, improvement of the compressor overall performance was examined through air injection, especially at stall point condition. Instantaneous flow velocities at various radial and circumferential positions were measured simultaneously utilizing hot wire anemometry. Results obtained from these latter measurements together with signal frequency analyses, provided to describe the stall inception process and consequent flow induced fluctuations and also stall alleviation during the air injection process. Results show that a small amount of air injection at the rotor blade tip region can affect the rise in total pressure and more specifically, increase the compressor stall margin efficiently. Air injection of less than 1% of the compressor main flow rate through the injectors has improved the stall margin by 9%. Air injection at the blade row tip enables this beneficial effects to extend throughout the blade whole span, especially while working at the near stall conditions.

1- مقدمه

ارتعاشات پره و تولید نویز آکوستیکی را به همراه دارد. دو شکل از رخداد کمپرسورهای جریان محوری به عنوان یکی از قسمتهای مهم موتورهای استال دورانی عبارتند از "استال مودال¹" و استال اسیایک²" [1]. استال مودال از رشد اغتشاشات³ با شدت کم **(**در مقایسه با سرعت میانگین) و با طول موج بلند (مقیاس طولی کمپرسور) شکل می گیرد. نوع دوم که استال اسپایک نامیده می شود، دارای مقیاس طولی کمتری (یک یا

توربین گاز، میتوانند کارایی موتور و محدوده عملکرد پایدار آن را محدود کنند. در نقاط عملکردی کمیرسور که با تولید نسبتهای فشار بالاتری همراه میباشد، استال دورانی پدیده مهمی است که معمولا پس از وقوع، افزایش

¹ Modal

Please cite this article using:

جرای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: SID.ir

² Spike ³ Disturbance

R. Taghavi Zenouz, M. H. Ababaf Behbahani, A. Khoshnejad, Experimental investigation of air injection effects on rotating stall alleviation in an axial compressor, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 267-274, 2016 (in Persian)

چند گام پره) بوده و توسط یک پراب نصب شده در بالادست ردیف پره، با شدت اغتشاشات زیاد در مقایسه با سرعت میانگین قابل رصد شدن می،اشد. معمولا استال اسپایک متداول ترین نوع شکل گیری استال در کمپرسورهای موتورهای هوایی می،اشد [2]. تنها چند دوران رتور زمان لازم است تا اغتشاشات اولیه شکل گرفته تبدیل به استال اسپایک کاملا توسعه یافته شود [2]. جریان نشتی درز نوک کمپرسور، نقش مهمی در شکل گیری استال ایفا می کند و موجب افزایش افتها و کاهش بازدهی در کمپرسورهای سرعت پایین [4,3] و سرعت بالا [5] می گردد. مطالعات اخیر با به کار گیری روشهای عددی پیشرفته و همچنین اندازه گیریهای لحظهای میدان جریان، سعی در شناخت بیشتر و ارائه درک کامل تری از چگونگی شکل گیری پدیده استال در کمپرسورهای محوری دارند [7,7].

تاکنون روشهای مختلفی برای کنترل و یا به تعویق انداختن شکل گیری استال در کمپرسورها معرفی گردیده است. بهطور کلی می توان این روشها را در قالب انواع فعال و غیرفعال¹ طبقهبندی نمود. روشهای اصلاح پوسته² در طراحیهای مختلف، متداول ترین مکانیزم غیرفعال برای افزایش حاشیه عملکرد پایدار کمپرسورها می باشند. مطالعات زیادی پیرامون هندسههای مختلف اصلاح پوسته شامل شیارهای محیطی³ [9,8] و اسلاتها⁴ [01] انجام شده است.

ایده اولیه روش فعال در کنترل ناپایداریهای کمپرسور توسط اپستین⁵ [11] مطرح گردید. حدود یک دهه بعد مطالعات گستردهتری پیرامون تزریق جت هوا در بالادست ردیف پره کمپرسور محوری آغاز گردید که از آن جمله سودر و همکارانش اثربخشی تزریق هوا از طریق چندین انژکتور را در افزایش بازه عملکرد پایدار کمپرسور نشان دادند [12]. در ادامه تحقیقات، تلاش برای کسب بیشترین حاشیه استال با استفاده از کمترین میزان هوای تزریقی در کمپرسورهای سرعت پایین و سرعت بالا، موضوع مطالعه محققین قرار گرفت [15-13]. طى دهه گذشته با افزايش قابليتهاى محاسباتى، چندين مطالعه عددی پیرامون تاثیر تزریق هوا بر بهبود عملکرد کمپرسورهای محوری انجام پذیرفته است. از جمله این مطالعات می توان به مدل سازی عددی جریان یک کمپرسور سرعت بالا با به کارگیری همزمان تزریق هوا و اصلاح پوسته از نوع شيار محيطي اشاره كرد [16]. ويژگي اين سيستم تزريق، افزايش مولفه محوری جت خروجی از انژکتور به واسطه شرایط قرارگیری انژکتورها است. كسب حاشيه استال بيشتر با تزريق مقدار كم هوا مزيت اين سيستم كنترلى ترکیبی بوده است. در سالهای اخیر تلاش برای درک کامل تری از مکانیزم اثربخشی تزریق هوا و جزئیات میدان جریان به ویژه در ناحیه نوک پره موضوع مورد توجه محققین بوده است [18,17]. به کار گیری تحلیلهای دقیق عددی و انجام تستهای آزمایشگاهی با هدف مشاهده میدان لحظهای جریان، اندازه گیری نوسانات سرعت و فشار از جمله مهم ترین راهبردها در این راستا بهشمار میآید. هدف از انجام این مطالعه بررسی فرآیند شکل گیری استال و چگونگی گسترش سلول استال در طول پره کمپرسور میباشد. همچنین فرآیند بازیابی از استال با به کارگیری تزریق هوا و به کمک اندازه گیری سرعت لحظهای جریان در بالادست رتور مطالعه شده است. بررسی تاثیر تزریق هوا در نوک پره بر میدان جریان به کمک اندازه گیریهای یایا و ناپایا (لحظهای) تاثیر این روش را در بهبود عملکرد کمپرسور و حذف

استال دورانی نشان داده است. در اغلب مطالعات انجام شده پیرامون این موضوع، تمرکز اندازه گیری پارامترهای جریان (همانند سرعت و فشار) در ناحیه نوک پره و یا پوسته کمپرسور میباشد. اندازه گیری همزمان نوسانات سرعت در سه مقطع نزدیک به نوک، میانه و ریشه پره از نوآوریهای مطالعه حاضر است.

2- معرفی مجموعه آزمایشگاهی 1.2. سبب عبر ک

1-2- تست ریگ کمپرسور محوری سرعت پایین

اندازهگیریها در تست ریگ کمپرسور سرعت پایین با یک رتور منفرد (بدون استاتور) انجام شده است. مشخصات رتور کمپرسور در جدول 1 ارائه شده است. این تست ریگ در آزمایشگاه تحقیقاتی آیرودینامیک و توربوماشینهای تراکمپذیر دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته و نصب گردیده است.

تست ریگ با یک الکتروموتور به چرخش در میآید و سرعت گردش آن به وسیله یک تبدیل کننده فرکانسی⁶ کنترل می شود. دبی جرمی کمپرسور نیز به وسیله یک شیر که در پایین دست رتور قرار گرفته است، تنظیم میشود. شماتیک تست ریگ کمپرسور محوری به همراه موقعیت نصب انژکتورها در "شکل 1" نشان داده شده است.

2-2- سيستم تزريق

سیستم تزریق شامل 12 انژکتور با قطر 2 mm بوده که بر روی تست ریگ نصب شده است. هوای فشرده مورد نیاز برای تزریق توسط یک کمپرسور ثانویه تامین و با بهکارگیری یک منیفولد به صورت یکنواخت در انژکتورها توزیع میشود. شماتیک سیستم تزریق و اجزای آن در "شکل 2" نشان داده شده است. دبی جرمی سیستم تزریق توسط یک تنظیم کننده فشار⁷ کنترل می شود. انژکتورها بهصورت موازی با محور کمپرسور با زاویه شیب⁸ **10** و در فاصله mm 12 از لبه حمله پرهها و در بالادست رتور قرار گرفته اند.

3-2- تجهیزات اندازه گیری

تستریگ مجهز به سیستمهای اندازه گیری استاندارد برای اندازه گیری فشار کل قبل و بعد از رتور و همچنین دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور می،اشد. بدین منظور از 4 پراب فشار پنج سوراخه استاندارد استفاده شده است. همچنین توزیع فشار استاتیک به کمک 6 تپ فشار روی پوسته قابل اندازه گیری است. بهمنظور مطالعه ناپایاییهای جریان از سیستم جریانسنجی سیم داغ بهره گرفته شده است. 3 پراب سیم داغ در موقعیتهای مختلف محیطی و شعاعی قرار گرفته و به صورت همزمان نوسانات میدان سرعت را

، رتور	پرہ	رديف	مشخصات	1	جدول
--------	-----	------	--------	---	------

[able <u>1</u>	Rotor blade r	ow specifications	
	مقدار		مشخصه
	1300		سرعت دورانی (rpm)
	600		قطر پوسته (mm)
	0.6		نسبت پایه به نوک
	117.5		طول وتر در نوک (mm)
	1		نسبت منظرى
	56.2		زاویه نصب پره (deg)

⁶ Frequency inverter

⁷ Pressure regulator ⁸ Pitch angle

¹ Active and Passive

² Casing treatment ³ Circumferential groove

⁴ Slot

⁵ Epstein







Fig. 2 Schematic Drawing of injection system

شكل 1 طرحواره سيستم تزريق هوا

اندازه گیری میکنند. از آنجایی که بیشترین فرکانس مورد توجه در میدان جریان و در این مطالعه حدود 260 هرتز است، دادهبرداری با فرکانس 2 کیلوهرتز نیز قابل قبول میباشد. با این حال با توجه به ظرفیت داده برداری سیستم جریان سنج سیم داغ و همچنین بکارگیری یک کارت داده برداری A/D مناسب، دادهبرداری با فرکانس 10 کیلوهرتز (10000 نمونه در ثانیه) انجام شده است.

4-2- نحوه انجام آزمایش

عملکرد کمپرسور محوری در شرایط طراحی و نزدیک به استال (ضریب جریان نزدیک به نقطه استال در شرایط پیش از تزریق هوا) در دو حالت، با تزریق جت هوا در نوک پرهها و بدون تزریق هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. در تمامی حالات دبی تزریق شده از تمامی انژکتور ها از 1% دبی جرمی کمپرسور در شرایط طراحی فراتر نمیرود. توزیع فشار کل از پایه تا نوک پره، با میانگین گیری از پرابهای فشار استاندارد تعبیه شده در چندین موقعیت محیطی استخراج گردیده است. همچنین اندازهگیری نوسانات سرعت به کمک چندین پراب سیم داغ که به صورت محیطی پیرامون رتور تعبیه شدهاند، انجام پذیرفته است. پرابهای سیم داغ در بالادست رتور و در فاصله 20% طول وتر محوری در نوک پره نصب شدهاند. با هدف مطالعه گسترش

نوسانات سرعت جریان در طول پره ترکیبی از پرابهای سیم داغ در موقعیتهای شعاعی نزدیک به پایه، میانگین و نزدیک به نوک پره نصب گردیدهاند.

3- نتايج

نتایج پیش رو با دو راهبرد کلی مطالعه اثر تزریق جت هوا بر عملکرد کمپرسور محوری و همچنین کنترل ناپایاییها¹ و چگونگی از بین بردن اغتشاشات جریان ناشی از شکل گیری استال دورانی می پردازد.

1-3- بهبود عملكرد كمپرسور

اولین هدفی که در این اندازه گیری ها دنبال می شود این است که تزریق جت هوا در نوک پرههای رتور، در یک دیدگاه میانگین زمانی² چه میزان باعث افزایش محدودهی عملکرد پایدار کمپرسور³ شده و مشخصههای عملکردی را بهبود می بخشد. تغییرات در میزان افزایش فشار کمپرسور در دبی های جرمی مختلف با تنظیم شیر کنترل کننده دبی، اندازه گیری شده و در قالب منحنی عملکرد ارائه گردیده است. منحنی عملکرد استخراج شده کمپرسور در mp 1300 در "شکل 3" نشان داده شده است. در این شکل ضریب افزایش فشار کل نسبت به ضریب جریان بی بعد شده ترسیم گردیده است. ضریب جریان نیز به صورت نسبت سرعت محوری در ورودی رتور به سرعت نوک پره رتور تعریف و با مقدار آن در نقطه طراحی بی بعد شده است.

منحنی عملکردی کمپرسور در شرایط بدون تزریق و تزریق جت هوا در "شکل 3" ترسیم و مقایسه شده است.

دبی جرمی هوای تزریق شده در دو حالت 5.0% و 8.0% دبی جرمی کمپرسور در شرایط طراحی تنظیم گردیده که از طریق 12 انژکتور، که در فواصل زاویهای برابر پیرامون محیط رتور قرار گرفتهاند، وارد میشود. بهبود حاشیه استال به همراه افزایش ضریب فشار کل کمپرسور از نتایج به کارگیری تزریق هوا بوده است. جدول 2 میزان افزایش فشار در نقطه استال و همچنین حاشیه استال بهدست آمده را نشان میدهد.

پروفیلهای تغییرات شعاعی فشار کل در سه نقطه عملکردی (φ_{norm,1}φ پروفیلهای تغییرات شعاعی فشار کل در سه نقطه عملکردی (_{norm,1}φ نزدیک orm,3φ ، مorm,3φ ، مناحیه استال و نقطه _{norm,5}φ در inorm,5φ استال و نقطه _{norm,5}φ ناحیه استال و نقطه _{norm,5}φ ناحیه استال توسعه یافته قرار دارد.

همان گونه که در شکل (4-a) نشان داده شده است (ϕ_{1-m})، تزریق هوا اگرچه در ناحیه نوک پره باعث کاهش ضریب افزایش فشار کل گردیده اما در مجموع و به صورت میانگین افزایش فشار از پایه تا نوک پره کاهش نیافته است. تاثیر قابل ملاحظهتر تزریق هوا در نوک پرهها، مطابق شکلهای (4-b) و (2-4) در نقاط $\phi_{morm,0} e \phi_{morm,0}$ دیده میشود. پروفیل افزایش فشار کل در این شرایط بهواسطه تزریق هوا به صورت کامل به سمت راست جابجا شده است و این افزایش فشار در نواحی بالاتر از 80% ارتفاع پره به خوبی مشخص میشود. بهبود ضریب افزایش فشار کل از پایه تا نوک پره تطبیق خوبی با نتایج ارائه شده توسط هیلر و همکاران دارد [19].

2-3- ناپایایی های جریان

در نزدیکی نقطه استال، میدان جریان کمپرسور به ویژه در ناحیه نوک پره با ناپایاییها و اغتشاشاتی همراه است.

¹ Unstead iness ² Time average

³ Stable operating range



Fig. 3 Performance curves of the compressor at injection and noinjection cases

بدون تزريق	با و	درشرايط	کمپرسور	عملكردى	منحنى	شکل 2
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						

جدول 1 نتایج بهبود عملکردی کمپرسور

Table 2 Compressor performance improvement results					
افزایش حداکثر	افزايش حاشيه	دبی جرمی	درصد تزريق	رديف	
ضريب فشار (%)	استال (%)	تزريق (kg/s)	هوا (%)		
3.45	4.63	0.006	0.5	1	
8.422	9.05	0.0096	0.8	2	

رشد و گسترش این اغتشاشات در نهایت شکل گیری استال دورانی را سبب می شود. با هدف بررسی فرآیند شکل گیری استال از یک سو و همچنین فرآیند بازیابی کمپرسور از شرایط استال با تزریق جت هوا از سوی دیگر، اندازه گیری سرعت لحظه ای جریان در بالا دست ردیف پره انجام شده است.

موقعیت محوری پرابها در تمامی حالات در بالادست پره و به فاصله 20% طول وتر محوری در نوک پره از لبه حمله میباشد. تنها در یک حالت به منظور اندازه گیری نوسانات جریان بعد از ردیف پره، یک پراب در پایین دست

ر تور قرار داده شد.

شکل گیری استال با افزایش اغتشاشاتی در گذرگاه جریان همراه است. این اغتشاشات در بالا دست پرههای رتور قابل اندازه گیری و مشاهده میباشد. منحنی مشخصه های فرکانسی جریان در نقاط مختلف عملکردی (norm,1 الیφ norm,5 و در سرعت 1300 rpm در شکل 5 نشان داده شده است. در تمامی این حالات پراب سیم داغ در ناحیه نوک پره و به فاصله mom 10 از پوسته قرار گرفته است. در ضرایب جریان φرorm و ۱۹ ماتی از دوران پرههای محدوده شکل گیری استال هستند، تنها نوسان غالب ناشی از دوران پرههای رتور میباشد. فرکانس پیک در این شرایط برابر 260 Hz است که برابر فرکانس گذر پره میباشد

با کاهش دبی جرمی کمپرسور در نقطه _{norm,3}0 نوسانات و ناپایداریهای جریان افزایش مییابد و پیک شدید ایجاد شده در مقادیر فرکانسهای پایین، نشانگر شکلگیری استال دورانی در کمپرسور است. این وضعیت در ضرایب _{norm,4}0 و norm,59 نیز وجود دارد.

اولین پیک پدیدار شده در این سه ضریب جریان که در فرکانس 14 Hz بوجود آمده، فرکانس سلول استال را نشان میدهد. با توجه به این که در 1300 rpm، فرکانس دورانی رتور برابر 21Hz میباشد، فرکانس استال 66% فرکانس دوران رتور است. فرکانس استال میتواند جندین هارمونیک داشته باشد. در مطالعه حاضر یک هارمونیک از فرکانس استال معادل دو برابر فرکانس استال (28 Hz) دیده میشود.

با هدف توصیف دقیق تری از فرایند شکل گیری استال دورانی، از یک تابع تبدیل فوریه زمان کوتاه برای تحلیل دادههای سرعت لحظهای جریان استفاده گردید.

سیگنالهای غیرایستا به سیگنالهایی اطلاق میشود که ویژگیهای آماری آنها با زمان تغییر میکند. فرم متداول تبدیل فوریه اطلاعاتی از تغییرات فرکانس با زمان ارائه نمیدهد به همین منظور از روش تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده میشود. در این روش نه تنها فرکانسهای غالب نمایان میشود بلکه زمان وقوع هریک نیز معین میگردد.



Fig. 4 Spanwise total pressure rise coefficient

شكل 3 تغييرات شعاعي ضريب فشار كل



Fig. 5 Velocity spectra in the frequency domain during different operating conditions

شکل 5 منحنی طیف فرکانسی در نقاط مختلف عملکرد کمپرسور

در این روش یک تابع پنجره¹، سیگنال را به قطعاتی کوچکتر (فریمهایی) تقسیم میکند. طول هر قریم به اندازهای میباشد که میتوان سیگنال را در آن بازه به صورت ایستا در نظر گرفت. تبدیل فوریه بر روی هر یک از فریمها اعمال شده و با حرکت تابع پنجره در طول محور زمانی روابط بین تغییرات فرکانس و زمان قابل دستیابی است. تبدیل فوریه زمان کوتاه برای یک

$$\mathsf{STFT}\{u[t]\} \equiv V(m,\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v[n] \,\omega[n-m] e^{-j\omega n} \qquad (1)$$

سیانگر تابع پنجره است و مطابق رابطه (2) تعریف میشود. در این رابطه N طول پنجره و ۱/N ضریب مقیاس میباشد که بیانگر وضوح هر جزء از سیگنال است.

$$\omega[n] = \sin\left[\frac{\pi}{N} (n + 0.5)\right], n = 0, 1, 2, ..., N - 1$$
⁽²⁾

"شکل 6" سیگنال سرعت لحظهای جریان را در rpm 1300 و در موقعیت نوک پره نشان می دهد. این سیگنال در فرایند شکل گیری استال ثبت گردیده است. در بازه زمانی متناظر با دور 109 تا 142 (عملکرد در شرایط قبل از وقوع استال)، سیگنال لحظهای سرعت منظم بوده و تنها عامل متناوب ناشی از تاثیر چرخش رتور بر میدان جریان می باشد. در همین شرایط مطابق "شکل (6-6)" و در کانتور تبدیل فوریه زمان کوتاه، تنها فرکانسی که دارای شدت بالایی بوده و به وضوح در طیف فرکانسی مشاهده می گردد، فرکانس گذر پره (Hz 200) و با شدتی کمتر هارمونیک آن (520

به هم ریختگی و اغتشاش شده است. در همین زمان و با توجه بهشکل (۵-6) مشاهده می گردد که به جز فرکانس گذر پره که همچنان غالب است، در مقادیر دیگر فرکانسی نیز علائمی مشاهده می گردد که بیان گر شکل گیری نوساناتی جدید در میدان جریان است. شدت این نوسانات طی چندین دوران بعدی کمپرسور افزایش یافته و نهایتا در دور 154 کاملا گسترش یافته (استال کاملا توسعه یافته) و از این زمان به بعد دیگر فرکانس گذر پره، پیک غالب نبوده و این فرکانس استال است که بیشترین شدت را دارا می باشد. تراکم خطوط کانتور در "شکل (۵-6)" در مقادیر پایین فرکانسی بیانگر این موضوع می باشد.

در قسمت قبل پیرامون تاثیر تزریق جت هوا بر بهبود پارامترهای جریان در دیدگاه میانگین زمانی بحث گردید. با هدف اندازه گیری دقیق روند از بین رفتن استال و ناپایاییهای وابسته به آن به کمک تزریق هوا، اندازهگیری سرعت لحظهای جریان به طور همزمان در سه موقعیت شعاعی نزدیک به نوک پره، میانگین و نزدیک به پایه انجام پذیرفت. در ابتدا کمپرسور در شرایط عملکردی استال قرار گرفت. سپس هوای فشرده از طریق انژکتورها به ناحیه نوک ردیف پره تزریق گردید. "شکل 7" فرآیند از بین رفتن استال دورانی و بازگشت کمپرسور به شرایط خارج از استال را نشان می دهد. نوسانات شدیدی (در مقایسه با میانگین سرعت) که روی سیگنال سرعت مشاهده می شود، اثر شکل گیری استال دورانی در گذرگاه جریان است. این ناپایاییها قبل از تزریق هوا در نقاط اندازه گیری از پایه تا نوک پره دیده می شود. هرچند که شدت اغتشاشات در ناحیه نوک پره بیشتر بوده اما حضور اغتشاشات در سراسر ارتفاع پره نشان دهنده شکل گیری سلول استالی در تمام ارتفاع پره میباشد. پس از انجام تزریق در نوک ردیف پره فرآیند تضعیف اعتشاشات آغاز و نهایتا استال دورانی بهطور کامل محو گردیده است. این اتفاق که در واقع بازیابی از استال می باشد از دور 135ام گردش رتور یدید آمده و از این زمان به بعد نوسانات ناشی از وقوع استال دیده نمی شود.

تاثیر تزریق هوا در نوک پرههای کمپرسور در حذف سلول استال و متعاقبا از بین رفتن اغتشاشات جریان ناشی از آن در فضای فرکانسی در "شکل 8" دیده میشود. این نمودار شامل منحنیهای طیف فرکانسی در سه موقعیت نزدیک به نوک، میانی و نزدیک به پایه پره میباشد. در هر سه موقعیت اندازه گیری، مقایسهای بین رفتار فرکانسی جریان قبل و بعد از تزریق هوا در ضریب جریان $\phi_{norm,4}$ انجام شده است. قبل از تزریق هوا پیک ناشی از استال و هارمونیک آن در محدوده فرکانسی زیر 50 هرتز در هر سه نقطه اندازه گیری به خوبی دیده می شود. با توجه به "شکل 8"، نتایج حاکی از حذف کامل پیکها در فرکانس استال در تمامی طول پره بعد از اعمال تزریق هوا به میزان 1% دبی جرمی کل کمپرسور میباشد. در این شرایط استال دورانی بهطور کلی از گذرگاهای جریان محو گردیده است، در حالی که کمپرسور در شرایط عملکرد پایدار و با نسبت فشار بیشتری کار می کند. برای وضوح بیشتر نمودارها در این شکل، محور افقی (فرکانس) از میانه آن منقطع شده است. پیش از این تاثیر تزریق هوا بر حذف نوسانات جریان و پیک فرکانسی ناشی از آن با تمرکز بر ناحیه درز نوک در چند مطالعه عددی نیز ارائه شده است [21].

یکی از پارامترهای مهم روش کنترلی تزریق هوا، دبی جریان هوای تزریق شده میباشد. با در نظر گرفتن تعداد مشخصی از انژکتورها با قطر معین، با افزایش دبی تزریق، ممنتوم ورودی به ناحیه درز نوک بیشتر شده و نقش موثرتری در از بین بردن ساختار سلول (های) استال خواهد داشت. تعیین کمینه دبی هوای تزریقی با میزان اثربخشی موردنیاز بهعنوان

¹ Window function



شكل 6 فرايند شكل گيرى استال (الف: كانتور تحليل فركانسى ب: سيگنال سرعت لحظه)

مشخصهای با اهمیت، قابل بررسی است.

"شکل 9" کانتور تحلیل فوریه زمان-کوتاه سرعت جریان را در بالادست رتور و در ضریب جریان φ_{-norm4} (شرایط استال)، نشان میدهد. این شکل در وضعیت عدم تزریق هوا در نوک پره و همچنین تزریق هوا با دبیهای جرمی متفاوت ترسیم شده است. در این شکل ترکیبی از سیگنال سرعت و تحلیل فوریه زمان-کوتاه آن برای هر حالت در یک بازه زمانی مشخص ارائه شده است.

پیش از تزریق هوا (شکل a-9) باند فرکانس های پایین بیشترین شدت را دارا میباشد که حاکی از غالب بودن نوسانات حاصل از استال در میدان جریان است. شدت بالای این فرکانس ها با تراکم خطوط کانتور در این ناحیه مشخص گردیده است. پس از اعمال تزریق جت هوا، ناپایی های میدان جریان تضعیف و سیگنال سرعت به شکل موجی خود در شرایط عدم وجود ناپایایی ها نزدیک می گردد. این امر با تقویت محسوس شدت کانتور در فرکانس گذر پره همراه است (شکل های c-b). در این شرایط با این که سیگنال سرعت لحظهای به ظاهر بدون اغتشاش بوده و نوسانات شدید حاصل از استال دورانی روی آن تاثیر نگذاشته، اما در کانتورهای تحلیل فوریه زمان -کوتاه هنوز مقداری نوسان در محدوده فرکانسی زیر 260 هرتز مشاهده می شود.

با افزایش دبی جرمی تزریق تا حدود 1% دبی جرمی طراحی کمپرسور (شکل G-d)، تمامی نوسانات و اغتشاشات میدان جریان از بین رفته و تنها فرکانس 260 Hz (فرکانس گذر پره) دارای شدت غالب است. در این حالت تنها عامل تغییر دهنده مقدار سرعت لحظهای از میانگین آن، نوسان حاصل از دوران رتور میباشد.

4- نتیجه گیری

بهبود پارامترهای جریان در کمپرسور از پایه تا نوک پره با بهکارگیری تزریق جت هوا موضوع این مطالعه میباشد. مشاهدات به این صورت بوده که تنها با

تزریق کمتر از 1% از دبی جرمی کمپرسور در شرایط طراحی از طریق 12 انژکتور، حاشیه استال به میزان 9% افزایش یافته است. همچنین رفتار ناپایای جریان در فرآیند شکل گیری استال و پاسخ آن به تزریق هوا در نوک پره بررسی شده و در مجموع نتایج زیر از این مطالعه بهدست آمده است:

- از یق جت هوا در نوک ردیف پره در شرایط عملکردی در نقطه استال باعث حذف سلولهای استال شکل گرفته شده و موجب عملکرد پایدار کمپرسور با تولید نسبت فشار بالاتر می گردد.
- وقتی در گذرگاه جریان سلول استال تمامی طول پره را در بر می گیرد، نوسانات ناشی از آن در تمامی نقاط بالادست رتور مشاهده می شود. فرکانس سلول های استال در کمپرسور مورد آزمایش برابر 66% فرکانس دوران رتور است.



Fig. 7 Velocity signals during stall recovery process شکل 7 سیگنال های سرعت لحظه ای طی فرایند بازیابی استال



Fig. 8 Frequency spectra of velocity signals at the stall point (before and after air injection)





Fig. 9 Velocity signals and their STFT analyses with different injection mass flow rates

شکل 9 سیگنالهای سرعت و تحلیل فوریه زمان کوتاه آنها با دبیهای جرمی متفاوت تزریق

 تزریق هوا در نوک پره کمپرسور باعث افزایش ممنتم جریان در ناحیه نوک پره شده و منجر به افزایش سرعت محوری میانگین و متعاقب آن کاهش زاویه حمله جریان ورودی به پرهها میگردد.

- [6] A. Deppe, H. Saathoff, U. Stark, Spike-type stall inception in axial-flow compressors, Proceeding of 6th Conference on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics, Lille, France, 2005.
- [7] G. Pullan, A. Young, I. Day, E. Greitzer, Z. Spakovszky, Origins and structure of spike-type rotating stall, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 137, No. 5, pp. 1-11, 2015.
- [8] H. Chen, X. Huang, K. Shi, S. Fu, M. Ross, M. A. Bennington, J. D. Cameron, S. C. Morris, S. McNulty, A. Wadia, A computational fluid dynamics study of circumferential groove casing treatment in a transonic axial compressor, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 136, No. 3, pp. 1-11, 2014.
- [9] J.-H. Kim, K.-J. Choi, K.-Y. Kim, Aerodynamic analysis and optimization of a transonic axial compressor with casing grooves to improve operating stability, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 29, No. 1, pp. 81-91, 2013.
- [10] I. Wilke, H.-P. Kau, A numerical investigation of the flow mechanisms in a HPC front stage with axial slots, *Proceeding of ASME Turbo Expo 2003*, Atlanta, Georgia: American Society of Mechanical Engineers, pp. 465-477, 2003.
- [11] A. Epstein, J. Ffowcs Williams, E. Greitzer, Active suppression of aerodynamic instabilities in turbomachines, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 5, No. 2, pp. 204-211, 1989.
- [12] K. L. Suder, M. D. Hathaway, S. A. Thorp, A. J. Strazisar, M. B. Bright, Compressor stability enhancement using discrete tip injection, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 123, No. 1, pp. 14-23, 2001.
 [13] C. Nie, Z. Tong, S. Geng, J. Zhu, W. Huang, Experimental investigations of
- [13] C. Nie, Z. Tong, S. Geng, J. Zhu, W. Huang, Experimental investigations of micro air injection to control rotating stall, *Journal of Thermal Science*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-6, 2007.
- [14] R. Taghavi-Zenouz, F. Yeke Rusta, M. H. Ababaf Behbahani, M. Eshagh-Sir, Numerical investigation on the flow instabilities control in a low speed axial compressor rotor blade row, *Proceeding of National Gas Turbine Conference*, October 6-7, 2015. (in persian فارش من المالي).
- [15] C. Nie, G. Xu, X. Cheng, J. Chen, Micro air injection and its unsteady response in a low-speed axial compressor, *Proceeding of ASME Turbo Expo* 2002: Power for Land, Sea, and Air, Amsterdam, The Netherlands: American Society of Mechanical Engineers, pp. 343-352, 2002.
- [16] B. H. Beheshti, K. Ghorbanian, B. Farhanieh, J. A. Teixeira, P. C. Ivey, A new design for tip injection in transonic axial compressors, *Proceeding of ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, Barcelona, Spain:* American Society of Mechanical Engineers, pp. 39-47, 2006.
- [17] A. D. Grosvenor, G. S. Rixon, L. M. Sailer, M. A. Matheson, D. P. Gutzwiller, A. Demeulenaere, M. Gontier, A. J. Strazisar, High resolution rans nonlinear harmonic study of stage 67 tip injection physics, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 137, No. 5, pp. 1-13, 2015.
 [18] J. Li, F. Lin, Z. Tong, C. Nie, J. Chen, The dual mechanisms and
- [18] J. Li, F. Lin, Z. Tong, C. Nie, J. Chen, The dual mechanisms and implementations of stability enhancement with discrete tip injection in axial. flow compressors, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 137, No. 3, pp. 1-10, 2015.
- [19] S.-J. Hiller, R. Matzgeller, W. Horn, Stability enhancement of a multistage compressor by air injection, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 133, No. 3, pp. 031009, 2011.
- [20] Q. Li, W. Wang, L. Chen, D. Sun, Rotor-system log-decrement identification using short-time fourier-transform filter, *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 2015, pp. 1-12, 2015.
- [21] S. Geng, H. Zhang, J. Chen, W. Huang, Unsteady tip clearance flow pattern in an isolated axial compressor rotor with micro tip injection, *Journal of Thermal Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 309-320, 2007.

تزریق هوا، تاثیر زیادی در عملکرد بهتر در تمامی طول پره نیز مشاهده شده است، همچنین میانگین ضریب افزایش فشار کل، نسبت به حالات بدون تزریق در محدوده وقوع استال افزایش یافته و ناپایایی هایی القایی در جریان از بین می رود.

- 5. استال نوع اسپایک که در کمپرسور مورد آزمون در این مطالعه دیده شد، با نوسانات شدید در سیگنال سرعت لحظه ای توسط یک پراب در بالادست رتور کمپرسور قابل رصد کردن می باشد. شدت نوسانات سرعت حاصل از استال اسپایک در ناحیه نوک پره نسبت به میانه و ریشه آن بیشتر است.
- 6. در فرآیند بازیابی از استال با استفاده از تزریق هوا، اندازه گیری سرعت لحظهای نشان می دهد که پس از اعمال تزریق، نوسانات شدید میدان سرعت به تدریج کاهش یافته (تضعیف سلول استال) و نهایتا سیگنال سرعت عاری از هر گونه نوسانی به جز آن چه ناشی از حرکت دورانی رتور است، می شود. این اتفاق در تمامی ارتفاع پره از پایه تا نوک قابل مشاهده بوده و حاکی از حذف استال از گذرگاه جریان می باشد.

5- تقدير و تشكر

کار تحقیقاتی حاضر تحت حمایتهای مالی و بشتیبانی آزمایشگاه تحقیقاتی آیرودینامیک و توربوماشینهای تراکمپذیر دانشگاه علم وصنعت ایران انجام شده است. لذا بدین وسیله از تمامی مسئولین ذیربط قدردانی میگردد.

6- مراجع

- K. Yamada, H. Kikuta, K.-i. Iwakiri, M. Furukawa, S. Gunjishima, An explanation for flow features of spike-type stall inception in an axial compressor rotor, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 135, No. 2, pp. 1-11, 2013.
- [2] S. Weichert, I. Day, Detailed measurements of spike formation in an axial compressor, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 136, No. 5, pp. 1-9, 2014.
- [3] M. Akhlaghi, A. Ghasemi, Y. Azizi, Steady and transient numerical simulation of stall inception in a low speed axial compressor, *Proceeding of National Gas Turbine Turbine Conference*, Iran, Tehran, October 6-7, 2015. (in persian (فارسی).
- [4] H. D. Vo, C. S. Tan, E. M. Greitzer, Criteria for spike initiated rotating stall, *Journal of turbomachinery*, Vol. 130, No. 1, pp. 1-9, 2008.
- [5] C. Hah, J. Bergner, H.-P. Schiffer, Short length-scale rotating stall inception in a transonic axial compressor: criteria and mechanisms, *Proceeding of ASME turbo Expo 2006: Power for land, sea, and air, Barcelona, Spain:* American Society of Mechanical Engineers, pp. 61-70, 2006.