ماهنامه علمى يژوهشى



mme.modares.ac.ir

شکل گیری و گسترش استال اسیایک در یک رتور کمپرسور محوری سرعت یایین

على خوشنژاد¹، محمدحسين عباباف بهبهاني²، رضا تقوىز نوز^{3*}

1- دانشجوی کارشناسیارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران 2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران *تهران، صندوق پستى 16846–taghavi@iust.ac.ir،13114

	اطلاعات مقاله چکیده
، استال اسپایک و نحوه گسترش آن در یک کمپرسور محوری سرعت پایین موضوع این مطالعه بوده است. در این راس	مقاله پژوهشي كامل گيري
_ا های آزمایشگاهی بر یک تست ریگ کمیرسور محوری سرعت پایین انجام شده است. پارامترهای اندازهگیری شامل سرعت و فش	دریافت: 22 اسفند 1395 اندازه گیری
و بارد و آرند آغاز استال است. بدن منظور از جندین راب جریان سنج سبہ داغ و یک جسگ فشار یا باسخ ف کانسی بالا، برای	پذيرش: 20 فروردين 1395 1200 م م م م م م م م م م م م م م م م م م
استفاده شده است. نوبيانات احظهای استعت در بالادست بدن بده نشان ما دهند که استال استاک با حدایث احداث الم حما	ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396 در سایت: 139
ر المصلحان الملك، لوسانات تحطيهای مسرعت در بايد دست (ديف پرد مسان می دهند منه الملك الملك المليان برويل از مبته	<i>کلید واژگان:</i>
در ادامه، جریان جدا شده از سطح پره منجر به ایجاد یک دردابه می شود. این ساختار در راستای ارتفاع پره دسترش می یابد. سلو	کمپرسور محوری پره اعاز و
رعتی کمتر از سرعت چرخش رتور، در کمپرسور مورد مطالعه %66 سرعت دورانی، پیرامون محیط کمپرسور منتشر میشود، همچنی	استال دورانی استال با س
ی دقیق تر اغتشاشات اسپایک از تبدیل فرکانسی موجک استفاده شده و توانمندی این روش در شناسایی استال اسپایک و جزئیات آ	جریان سنجی سیم داغ بررس
شده است. به کمک تحلیل موجک میتوان با نمایش تغییرات زمانی فرکانسها، پدیدههای غالب در فرایند گذار سیستم از عملک	تبديل موجک نشان داده
رابط مقوع استال النشان داد	باندار به ش

Investigation of Spike Stall Inception and its Propagation in a Low Speed Axial **Compressor Rotor**

Ali Khoshnejad¹, Mohammad Hosein Ababaf Behbahani¹, Reza Taghavi Zenouz ^{1*}

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 12 March 2017 Accepted 09 April 2017 Available Online 29 April 2017

Keywords: Axial compressor Rotating Stall Wavelet transform Hot wire Anemometry

ABSTRACT

Investigation of spike stall formation and its propagation in a low-speed axial-flow compressor is the main aim of this study. Experimental measurements are performed in a low speed axial compressor test rig. Measurement parameters include instantaneous velocity and static pressure at the stall inception process. For this purpose several hot wire probes and a high response pressure transducer are used in data acquisition procedure. Instantaneous fluctuations of velocity at upstream of the blade row show that spike stall inception is accompanied by flow separation from the leading edge of the rotor blade and subsequently, formation of a vortex. This vortical structure extends over the blade span. Stall cell propagates with a circumferential speed lower than rotor wheel speed which is equal to 66% of rotational speed in this compressor. Furthermore, wavelet frequency analysis is employed for detailed investigation of spike disturbances and the capability of this method in distinguishing the spike stall is presented. Wavelet analysis, by representing the temporal variation of frequency spectrum, shows dominant phenomena in the transient process from stable operation to the stall inception condition.

غیرخطی، کنترل، اندازه گیریهای دقیق و پردازش سیگنال توجه بسیاری از یژوهشگران رشتههای مختلف را به خود جلب کرده است [2].

مطالعات دهههای اخیر نشان میدهند که عموماً دو نوع استال دورانی در کمپرسورهای محوری شکل می گیرد که با نام استال مدال و استال اسپایک شناخته می شوند. استال مودال شامل اغتشاشاتی موجی شکل با شدت کم به صورت دوبعدی و طول موج بلند است که به صورت محوری در طول كمپرسور گسترش مىيابند. اين اغتشاشات مىتوانند با سرعت دورانى %20 تا 50% سرعت چرخش رتور به صورت محیطی منتشر شوند [3].

نوع دیگر استال، اغتشاشاتی سه بعدی، با مقیاسهای طولی کوتاه و

یکی از چالشها در طراحی کمپرسورهای محوری دستیابی به نقاط عملکردی بهینه با بازدهی و نسبت فشار بالا و به دور از ناپایداریهای آیردودینامیکی است. در واقع به دلیل محدودیتهای آیرودینامیکی، کمیرسور باید دور از نقطه بهینه عملکرد کار کند که منجر به کاهش بازدهی می شود. استال دورانی و سرج از جمله ناپایداری های جریان درون کمپرسور است [1]. شناسایی مکانیزم شکل گیری پدیدههای استال دورانی و سرج یک مسأله مهم در حوزه مطالعات کمپرسورهای محوری بوده است. این چالش به این دلیل که نیازمند تخصصهای مختلف از جمله مکانیک سیالات، دینامیک

1- مقدمه

Please cite this article using: A. Khoshnejad, M. H. Ababaf Behbahani, R. Taghavi Zenouz, Investigation of Spike Stall Inception and its Propagation in a Low Speed Axial Compressor Rotor, Modares Mechanical U Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 111-118, 2017 (in Persian)

فركانس بالاست كه به عنوان اسپايک شناخته مى شود. استال اسپايک متداول ترین نوع شکل گیری استال در کمپرسورهای موتورهای هوایی است [4]. مفهوم استال اسپایک و توصیف آن نخستین بار توسط دی [5] مطرح گردید. منشاء اصلی استال دورانی در کمپرسورهای محوری فرایند آغاز استال اسپایک است که از رشد اغتشاشات غیرخطی با طول موج کوتاه شکل می گیرد [5]. در ابتدای شکل گیری استال اسپایک شدت اغتشاشات کم است، ولى در ادامه پيرامون پوسته كمپرسور سريع رشد پيدا كرده و تنها طى زمان معادل با چند دوران رتور اغتشاشات اولیه تبدیل به استال اسپایک کاملاً توسعه يافته مى شود [6]. استال اسپايک با سرعتى بين 20%-80% سرعت دورانی کمپرسور پیرامون محیط آن منتشر می شود [7]. در این شرایط کمپرسور تحت استال دورانی کار کرده و دبی جرمی و نسبت فشار آن کاهش مى يابد. تحقيقات اخير نشان داده است كه استال اسپايك علاوهبر کمپرسورهای دارای درز نوک رتور در کمپرسورهای پوششدار نیز رخ میدهد و این بدان معناست که با حذف جریان نشتی نوک پره کمپرسور امکان شکل گیری استال اسپایک وجود دارد [8]. مطالعه پدیده استال هم در كمپرسورهاى محورى سرعت پايين [9] و هم گذرصوت [10-12] مورد توجه محققین این حوزه بوده است. طی سالیان اخیر چندین مطالعه با استفاده از تجهیزات اندازه گیری دقیق و همچنین تحلیلهای عددی سعی در شناسایی هر چه دقیقتر فیزیک حاکم بر استال اسپایک داشتهاند [14,13].

به منظور شناسایی رخداد استال دورانی سیگنالهای خام سرعت و فشار لحظهای به صورت متداول مورد استفاده قرار می گرفته است [15]، اما امروزه علاوهبر سیگنالهای خام اندازه گیری شده، روشهای مختلف تحلیل سیگنال نیز به کار گرفته می شود [17,16]. استفاده از تحلیل های فرکانسی امکان بررسی دقیقتر فرایند شروع ناپایداریها را فراهم میآورد [2].

تحلیل فرکانسی موجک^۲ ابزاری مناسب برای جمعآوری و استخراج ویژگیهای ناپایا از این سیگنالهاست. این روش به دلیل توانایی تحلیل فرکانسی- زمانی مناسب برای شناسایی اغتشاشات پیش از استال و شناسایی روند شکل گیری استال یک ابزار توانمند در این حوزه به حساب می آید. از جمله قابلیتهای دیگر این تحلیل تعیین سرعت استال دورانی است.

با وجود مطالعات گسترده پیرامون استال دورانی شناخت دقیق از فیزیک حاکم بر این پدیده نیازمند مطالعات بیشتری است. هدف از انجام این مطالعه ارائه توصیفی دقیق از فرایند آغاز و گسترش استال دورانی در یک کمپرسور محوری سرعت پایین است. بدین منظور اندازه گیری سرعت و فشار لحظهای در بالادست رتور و نزدیک به لبه حمله پره انجام شده است. با مقایسه تأثیر اغتشاش اسپایک بر سیگنالهای سرعت و فشار، مکانیزم شکل گیری اسپایک مورد بحث قرار گرفته است، همچنین اندازه گیری ها از پایه تا نوک پره چگونگی گسترش استال را در راستای شعاعی نشان میدهد. نتایج ارائه شده در قالب سیگنالهای خام و تحلیل فرکانسی آنها در افزایش دانش و درک فيزيكي پيرامون استال دوراني مفيد است.

2- تستریگ کمپرسور محوری سرعت پایین

آزمایشها در تستریگ کمپرسور محوری آزمایشگاه تحقیقاتی آیرودینامیک و توربوماشینهای تراکمپذیر دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. شکل 1 به صورت طرحواره اجزای اصلی تستریگ کمپرسور محوری را نشان مىدهد. تستريك توسط يك الكتروموتور با حداكثر توان 45 كيلووات به

Shrouded Wavelet

عملکرد در محدوده جریان مادون صوت استفاده شده است. این رتور پیش از این در چندین مطالعه معتبر عددی و تجربی به کار گرفته شده است [19,18]. پروفيل رتور مورد مطالعه براساس پروفيل NACA65 طراحي شده و مشخصات طراحی آن در جدول 1 ارائه شده است. سرعت گردش محور کمپرسور به وسیله یک تبدیلکننده فرکانسی^۲ کنترل میشود. دبی جرمی کمپرسور نیز توسط یک شیر که در پایین دست رتور قرار گرفته است، تنظیم می شود.

گردش در میآید. هوا با چرخش رتور تک مرحلهای کمپرسور از طریق

مجرای ورودی به صورت یکنواخت و با شدت آشفتگی کم وارد مجرای

3- تجهیزات اندازه گیری و نحوه انجام آزمایش

مىشود.

تستریگ مجهز به سیستمهای اندازه گیری استاندارد برای انجام آزمونهای مورد نظر است. به منظور مطالعه ناپایاییهای جریان از سیستم جریانسنجی سيم داغ و يک حسگر فشار با ياسخ فرکانسي بالا بهره گرفته شده است. 4 پراب سیم داغ در موقعیتهای مختلف محیطی و شعاعی قرار گرفته و به صورت همزمان نوسانات میدان سرعت را اندازه گیری می کنند. دادهبرداری با سيستم جريانسنج سيم داغ با فركانس 10 كيلوهرتز انجام شده است. فشار استاتیک روی پوسته کمپرسور و در بالادست ردیف پره توسط یک حسگر فشار هانیول با فرکانس دادهبرداری 5 کیلوهرتز ثبت شده است.

با هدف بررسی گسترش ناپایداریهای استال در راستای ارتفاع پره، پرابهای جریانسنج سیم داغ در این شرایط، در سه موقعیت نزدیک به نوک، میانه و نزدیک به پایه پره تعبیه شدهاند. بدین ترتیب نوسانات لحظهای سرعت در فرآیند آغاز استال از پایه تا نوک پره اندازه گیری شدهاند.

Table 1 Rotor blade row specifications						
مقدار	مشخصه		مقدار	مشخصه مقدار		
117.5	در نوک (mm)	طول وتر	1300	انی(rpm)	سرعت دور	
1	ت منظری	نسب	600	(mm) -	قطر پوسته	
56.2	سب پره (deg)	زاويه نص	0.6	به نوک	نسبت پايه	
					3 14	
1- Bell N	fouth Air Intake	6- Bearing #	1	11- Increasing Gear	box	
2- Spinner 3- Axial Compressor		 Bearing #. Spiral Col 	lactor	r 13- Oil Cooler		
4- Outlet Duct		9- Bearing #	- Spiral Collector 13- Oli Coller			
5- Throttle Valve		10- Coupling #1 15- Inverter				
Fig. 1 Schematic layout of axial compressor test rig						

شکل 1 نمای شماتیک دستگاه تست کمپرسور محوری

جدول 1 مشخصات رديف پره رتور

³ Frequency inverter

جهت اعمال تبدیل پیوسته موجک بر دادهها و سیگنالهای گسسته، شکل گسسته تبدیل پیوسته موجک مورد نیاز است. بدین منظور یک راه حل دقیق و سريع اعمال تبديل فوريه بر رابطه (2) به صورت روابط (4-6) است. $x(n), n = 0, 1, \dots, N - 1$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-i2\pi k n/N}$$
(5)

$$WX_n(s_r) = \frac{\sqrt{s_r}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \psi(s_r \omega_k) e^{-i2\pi k n/N}$$
(6)

رابطه (6) فرم گسسته تبدیل موجک پیوسته یک بعدی را نشان می دهد.

5- نتايج

در این بخش مکانیزم شکل گیری استال اسپایک و نحوه گسترش آن پیرامون محیط کمپرسور در ابتدا مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه با به کارگیری تحلیل فرکانسی موجک ارائه جزئیات بیشتری از ساختار استال اسپایک موضوع مورد بحث این مطالعه است.

5-1- مکانیزم شکل گیری استال اسیایک

در نقطه عملکردی دور از استال تنها عامل ایجاد نوسان در میدان سرعت و فشار، ناپایایی ناشی از دوران ردیف پره رتور کمپرسور است. شکل 3 تغییرات فرکانسی سیگنال سرعت را در نقطه عملکردی دور از استال و اندازه گیری شده در ناحیه نوک پره نشان میدهد. این نتایج برای سرعتهای دورانی 1300rpm و 1800rpm ارائه شدهاند. نخستین پیک یدیدار شده در هر دو شکل (a-a) و شکل (3-b) که به ترتیب در فرکانس های 260 و 360 هرتز رخ دادهاند، نشان گر فرکانس گذر پره است. پیک دوم که متناظر با فرکانسهای 520 و 720 هرتز است، نخستين هارمونيک فرکانس گذر پره را مشخص می کند. در این شرایط تنها فرکانس غالب میدان جریان ناشی از چرخش رتور بوده و اغتشاشی در گذرگاه جریان مشاهده نمیشود.

طیف فرکانسی سرعت اندازه گیری شده در نوک پره در ضریب جریان استال در شکل 4 نشان داده شده است. محور افقی در این شکل نسبت به فرکانس دورانی رتور (21Hz در 1300rpm و 30Hz در 1800rpm) بیبعد شده و محور عمودی هم شدت طیفی ٌ هر فرکانس را نشان میدهد. در هر دو شکل (4-a,b) اغتشاشی با شدت بالا در حدود فرکانسی 0.7 *f*rotor (یعنی 0.7



شکل 3 طیف فرکانسی سیگنال سرعت در نقطه عملکردی طراحی

4- معرفي ابزار تحليل فركانسي تبديل موجك

استفاده از روشهای تحلیل سیگنال برای دستیابی به محتوای فرکانسی در کمپرسورهای محوری روشی مرسوم است [20]. در این بین تبدیل موجک یک گزینه مناسب برای مطالعه پدیده استال و اغتشاشات پیش از آن است. این روش قابلیت تحلیل زمانی و فرکانسی سیگنالها را داراست. لیائو ([21] نخستین بار یک تبدیل پیوسته موجک را برای بررسی فرآیند آغاز استال به کار برد. در اینجا به اختصار تبدیل موجک یک بعدی معرفی شده و ملاحظات مهم أن مورد بحث قرار مي گيرد.

نبديل يکبعدی پيوسته موجک مطابق رابطه (1) تعريف می شود [2].

$$WX(s,t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \psi^* \left(\frac{\tau-t}{s}\right) d\tau$$
(1)

در این رابطهW تابع موجک، xسیگنال ورودی و ψ تابع مادر، همچنینau و sبه ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس است. پارامتر مقیاس در این تبدیل به طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد (s = 1/f).

پارامتر sight این رابطه سبب میشود تا طیف چگالی انرژی در مقیاس های مختلف مشابه و قابل مقایسه باشند. رابطه بین تبدیل موجک و تبديل فوريه به صورت رابطه (2) قابل بيان است.

 $WX(s,t) = \sqrt{s} \{F^{-1}[X(\omega)\psi(s\omega)]\}_t$ در رابطه (2) F^{-1} بیانگر تبدیل معکوس فوریه، (X(w) و ($\psi(sw)$ به ترتیب t تبدیل فوریه $x(\tau)$ و $\psi_{s,t}(\tau)$ است. طیف چگالی انرژی در مقیاس s و زمان مطابق رابطه (3) محاسبه می شود.

$$E = |WX(s,t)|^2 \tag{3}$$

کانتور E به صورت تابعی از s و t با عنوان طیف نگاره موجک^T شناخته Eمی شود. تابع $\psi(t)$ به عنوان تابع مادر تبدیل موجک در تحلیل ناپایداری های $\psi(t)$ کمپرسور بسیار تأثیر گذار است. دو گزینه متداول و پرکاربرد برای این تابع، مورلت ٔ و دی اُجی ^۵ است. در این مطالعه تابع مادر مورلت به کار گرفته شده



Fig. 2 Configuration of hot wire probes around the compressor circumference

شکل 2 چیدمان حسگرهای جریانسنج سیم داغ پیرامون محیط کمپرسور

⁶ PSD; Power Spectral Density

Liao

One-dimensional continuous wavelet transform Wawelet spectrogram

Morlet DOG







فرکانس چرخش رتور) و با شدتی کمتر در حدود 1.4 *f*_{rotor} پدیدار شده است. نخستین فرکانس مربوط به فرکانس چرخشی سلول استال⁽ (RSF) و مقدار دوم (1.4 *f*_{rotor}) هارمونیک آن است. در این شرایط ناپایداری غالب سیستم ناشی از استال دورانی که بهواسطه تناوبی بودن آن با هارمونیکهایی همراه است.

جهت شناختی دقیق تر از آنچه که در لحظه آغاز استال رخ می دهد، سیگنالهای لحظه ای سرعت و فشار در شکل 5 نشان داده شدهاند. هر دو سیگنال در زمانی که استال کاملاً توسعه یافته ثبت شده است. با توجه به این شکل به توصیف مکانیزم استال اسپایک پرداخته می شود.

با کاهش ضریب جریان در کمپرسور و پیرو آن کاهش مؤلفه محوری سرعت جریان در ورودی به کمپرسور، زاویه برخورد جریان با لبه حمله پره افزایش می یابد. این افزایش زاویه در نزدیکی نقطه استال با جدایش جریان همراه است. جدایش به ویژه در ناحیه درز نوک پره سبب مسدودشدگی در گذرگاه جریان ردیف پره میشود. این مسدودشدگی سبب افزایش فشار استاتیک و کاهش سرعت لحظهای جریان در بالا دست رتور میشود. مطابق با شکل 5 در هر ساختار اغتشاش اسپایک در سیگنال سرعت ابتدا یک کاهش نسبت به مقدار میانگین و در سیگنال فشار یک افزایش مشاهده میشود که ناشی از همین جدایش جریان است.

جریان جدا شده از لبه پره که به صورت یک صفحه درآمده است با چرخش به دور خود یک گردابه را تشکیل می دهد. این گردابه از سطح پره آغاز و تا پوسته کمپرسور ادامه می یابد. چگونگی گسترش گردابه در راستای ارتفاع پره در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. گردابه شکل گرفته با ماهیتی ناپایا منجر به ایجاد نوساناتی شدید در میدان جریان پیرامون خود می شود. در هر دو سیگنال سرعت و فشار (شکل 5) نوسانات پس از افت یا خیز ناشی از جدایش جریان به واسطه شکل گیری این ساختار گردابهای است. به عنوان جمعبندی می توان این گونه بیان کرد که ساختار استال اسپایک شامل جدایش جریان و سپس تشکیل یک گردابه گسترش یافته در طول پره است. اسپایک با سرعتی کمتر از سرعت دوران رتور در راستای محیطی در کمپرسور منتشر می شود.

مکانیزم توصیف شده از شکل گیری استال اسپایک در مطالعه عددی



Fig. 5 Velocity and pressure signals at the stall condition

شکل 5 سیگنالهای سرعت و فشار در شرایط وقوع استال



Fig. 6 The vortical structure and propagation of spike [8] شکل 6 ساختار شعاعی اسپایک و گسترش آن در این راستا [8]

اخیر پولان و همکاران نیز نشان داده شده است. براساس توصیف آنها در آغاز استال، افزایش زاویه برخورد جریان منتج به جدایش جریان از لبه حمله در سمت بیرونی پره می شود. در ادامه این جدایش، گردابه ایی ایجاد شده که گستره آن از پایه تا نوک پره کمپرسور را دربرمی گیرد. طرحواره نحوه شکل گیری استال با استفاده از نتایج تحلیل عددی پولان و همکاران در شکل 6 نشان داده شده است [8].

شکل 7 سیگنالهای سرعت لخطهای را در فرآیند آغاز استال نشان میدهد. بر تمامی سیگنالها یک فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع 200Hz اعمال شده است.

در زمان متناظر با 163اًمین دوران رتور نخستین اغتشاشات اسپایک در سیگنال به چشم میخورد. این اغتشاشات که در ابتدا صرفاً جدایش جریان از لبه حمله پره را نشان میدهند طی زمانی از مرتبه 5 دوران رتور (دوران 168) تبدیل به استال کاملاً توسعه یافته شده است. سلول استال با عبور از مقابل هر یک از پرابها سبب ایجاد اغتشاشی بر سیگنال ثبتشده توسط آن پراب میشود.

خطچین ترسیم شده بر شکل 7 نوسانات شدید ایجاد شده ناشی از چرخش یک سلول استال پیرامون محیط کمپرسور را به یکدیگر متصل می کند. فاصله زمانی بین ثبت استال توسط نخستین پراب تا رصد آن توسط پراب چهارم، سرعت دوران سلول استال را معین می کند. در کمپرسور مورد مطالعه همان گونه که در شکل 7 نشان داده شده سرعت محیطی چرخش سلول استال برابر %66 سرعت دوران رتور است.

نوسانات سرعت در فرآیند وقوع استال در سرعت دورانی 1800 rpm در

¹ RSF; Rotating Stall Frequency

شکل 8 نشان داده شده است. مطابق با توضیحات پیشین فیلتر پایین گذر بر دادهها اعمال شده است. مجدداً خط متصلکننده، سرعت دورانی 67% را برای سلول استال دورانی در این شرایط کاری کمپرسور نشان میدهد.

شکل گیری و گسترش استال اسپایک در یک رتور کمپرسور محوری سرعت پایین

5-2- بررسی جزئیات پدیده استال اسپایک با بهکارگیری تبدیل موجک

علائم آشکارساز آغاز پدیده استال اغلب در سیگنالهای سرعت یا فشار که در بالادست رتور و نزدیک به نوک پره ثبت شده قابل مشاهده است. تشخیص این علائم با توجه به ترکیب شدن آنها با جریان اصلی گذرگاه و نویزهای سیستم اندازه گیری به ویژه در مراحل ابتدایی شکل گیری استال دشوار است. تحلیل موجک یک تحلیل ایده آل برای جمع آوری و استخراج ویژگیهای ناپایا درون این سیگنالهاست. این تحلیل به دلیل توانایی آنالیز فرکانسی- زمانی مناسب، برای شناسایی اغتشاشات پیش از استال و شناسایی روند شکل گیری استال یک ابزار توانمند در این حوزه به حساب می آید. نوسانات سرعت و تبدیل موجک آن در بالا دست ردیف پره کمپرسور و در لحظه آغاز استال در



Fig. 7 Instantaneous velocity signals at different circumferential positions (*N*=1300 rpm) شکل 7 سیگنالهای سرعت لحظهای اندازهگیریشده در موقعیتهای محیطی

مختلف (N=1300 rpm)



Fig. 8 Instantaneous velocity signals at different circumferential positions (*N*=1800 rpm) شکل 8 سیگنالهای سرعت لحظهای اندازه گیری شده در موقعیتهای محیطی مختلف (*N*=1800 rpm)

شکل 9 نشان داده شده است. سیگنال سرعت از حدود 10 دوران رتور پیش از آغاز استال تا شرایط استال کاملاً توسعه یافته ترسیم شده است. پیش از زمان متناظر با دوران 160 رتور در شکل 9 هیچ اغتشاشی در سیگنال سرعت و باند فرکانسی آن مشاهده نمیشود. از دوران شماره 160–166، در مقادیر فرکانسی کم (زیر 20 هرتز) باریکهای تشکیل شده که نشان از شکل گیری یک شده در فرکانس H2 موجی در میدان جریان دارد. از طرفی نوار ممتد ترسیم شده در فرکانس H2 260 دچار به هم ریختگی شده که نشان دهنده تضعیف شکل موجی سیگنال سرعت است. از دوران 167أم رتور به بعد علاوهبر شکل موجی سیگنال سرعت است. از دوران 167أم رتور به بعد علاوهبر نیرمتناوب نیز در میانه باند فرکانسی ایجاد شده است. این لکههای حامل نیرمتناوب نیز در میانه باند فرکانسی ایجاد شده است. این لکههای حامل نیرمتاوب نیز در میانه باند فرکانسی ایجاد شده است. این لکههای حامل نیرمتاوب نیز در میانه باند فرکانسی ایجاد شده است. این لکههای حامل نیرمتاوب نیز در میانه باند فرکانسی ایجاد شده است. این لکههای حامل نیرژی¹ نشان گر اسپایکهاست. نوار ممتد در فرکانس علا14 بیان گر سرعت پرخش این اسپایکهاست. منحنی ⁷WS در سمت راست کانتور موجک نیز نشان میدهد که بیشینه شدت مربوط به فرکانس چرخشی استال اسپایک است.

جهت بررسی فیزیکی بیشتر فرایند شکل گیری استال و گسترش آن در راستای ارتفاع پره، سه پراب جریانسنج سیم داغ، در موقعیتهای نزدیک به نوک، میانه و نزدیک به ریشه پره و با فواصل محیطی 90 درجه نصب شده (شکل 10) و دادهبرداری به صورت همزمان صورت گرفته است. شکل 10 تبدیل موجک سیگنالهای سرعت را در فرآیند آغاز استال نشان میدهد. با توجه این شکل در هر سه کانتور طیفی موجک فرکانس گذر پره به عنوان تنها عامل نوسانی غالب پیش از آغاز استال (دوران 20) است. باند فرکانس گذر پره پس از رخداد نخستین اغتشاشات استال منقطع شده، همچنین در محدوده فرکانسهای پایین لکههای اسپایک پدیدار شدهاند. این لکهها در هر 3 نقطه اندازه گیری مشاهده شده و شدت آن ها در ناحیه نوک پره بیشتر است. استال اسپایک نه تنها در ناحیه نوک پره بلکه در بیشتر ارتفاع آن گسترش یافته است. لکههای اسپایک در نقطه نزدیک به پایه (بازه فرکانسی 25-32 هرتز) نسبت به نوک پره دارای شدت کمی بوده و از طرفی نوار فرکانسی گذر پره نیز دچار اختلال کمتری شده است. با این حال نوار ممتد در محدوده فرکانس 14 هرتز با شدت زیادی وجود دارد. بنابراین این گونه می توان نتیجه گرفت که یک اغتشاش با ماهیت تناوبی در میدان سرعت و در نزدیکی پایه پره وجود داشته و این اغتشاش ناشی از جدایش جریان است. در این موقعیت گردابه اسپایک تضعیف شده و یا از بین رفته است.

یکی از قابلیتهای تحلیل موجک، شناسایی نوسانات شدید ناشی از اسپایکها و تعیین سرعت دورانی سلول استال است. شکلهای 11 و 12 طیف نگاره موجک سیگنالهای استال توسعهیافته را نشان میدهد. در تحلیل موجک هر نوسان شدید ناشی از اسپایک با یک لکه پر انرژی در کانتور زمانی دوران کامل سلول استال سرعت سلول استال قابل محاسبه است. با توجه به تحلیل موجک و کانتورهای ارائه شده در شکلهای 11 و 12 نیز می توان نتیجه گرفت که سرعت سلول استال در کمپرسور مورد مطالعه به ترتیب در سرعتهای دورانی 1300 و 1800 برابر با 66% و 67%

6- جمع بندي و نتيجه گيري

در این مطالعه به بررسی تجربی فرآیند شکل گیری استال اسپایک در یک

¹ Energy spots ² Global Wavelet Spectrum



Fig. 9 Velocity raw signal and its wavelet transform at stall inception process



Fig. 10 Wavelet transform of velocity signal in the stall inception process at different radial positions (شكل 10 كانتورهاى تبديل موجك سيگنال سرعت در فرآيند آغاز استال در موقعيتهاى شعاعى مختلف

کمپرسور محوری سرعت پایین پرداخته شده است. اندازه گیریها با استفاده از چندین پراب جریانسنج سیم داغ و یک حسگر فشار در نقاط مختلف پیرامون رتور کمپرسور انجام شده، همچنین تبدیل فرکانسی موجک، ابزار تحلیلی مورد استفاده برای استخراج جزئیات ساختار استال اسپایک است. در مجموع نتایج زیر از این مطالعه قابل ارائه است.

۱-ساختار استال اسپایک متشکل از جدایش جریان از لبه حمله پره و در ادامه ایجاد یک گردابه از این جریان جدا شده است. جدایش جریان منجر به کاهش سرعت و افزایش فشار محلی در بالادست رتور شده و گردابه شکل گرفته نوسانات شدیدی را در میدان جریان القا می کند.

- 2-اسپایک نه تنها در ناحیه نوک پره گذرگاه جریان را متأثر میسازد، بلکه در راستای ارتفاع پره گسترش یافته و در کمپرسور مورد مطالعه نیز بخش زیادی از ارتفاع پره را در برگرفته است.
- 3-اغتشاشات اسپایک دارای ماهیتی تناوبی بوده و پیرامون محیط کمپرسور با سرعتی کمتر از سرعت چرخش کمپرسور منتشر میشوند. سرعت انتشار محیطی سلول استال در کمپرسور مورد مطالعه حدود 66% سرعت چرخش رتور است.
- 4-تحلیل فرکانسی موجک ابزاری قوی و توانمند برای شناسایی و مطالعه جزئیات فرآیند شکل گیری استال است. سرعت انتشار و طیف انرژی سلولهای استال به کمک این تبدیل قابل بررسی و استخراج است.



Fig. 11 Wavelet transform of velocity signal in fully developed stall condition at different circumferential positions (*N*=1300 rpm) (*N*=1300 rpm) شکل 11 کانتورهای تبدیل موجک سیگنال سرعت در شرایط استال توسعهیافته و در موقعیتهای محیطی مختلف (*N*=1300 rpm)



Fig. 12 Wavelet transform of velocity signal in the fully developed stall condition at the different circumferential positions (N=1800 rpm) (N=1800 rpm) شکل 12 کانتورهای تبدیل موجک سیگنال سرعت در شرایط استال توسعهیافته و در موقعیتهای محیطی مختلف (N=1800 rpm)

- [2] F. Lin, J. Chen, M. Li, Practical issues of wavelet analysis of unsteady rotor tip flows in compressors, *Proceeding of 38th* AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, United States, July 7-10, 2002.
- [3] N. M. McDougall, N. Cumpsty, T. Hynes, Stall inception in axial compressors, *Proceeding of International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Toronto, Canada, June 4–8, 1989.
- [4] T. Camp, I. Day, 1997 Best Paper Award—Turbomachinery Committee: A Study of Spike and Modal Stall Phenomena in a Low-Speed Axial Compressor, *Turbomachinery*, Vol. 120, No. 3,

7- تقدير و تشكر

کار تحقیقاتی حاضر تحت حمایتهای مالی و پشتیبانی آزمایشگاه تحقیقاتی آیرودینامیک و توربوماشینهای تراکمپذیر دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. بدین وسیله از تمامی مسئولین ذیربط قدردانی میشود.

8- مراجع

 I. Day, Stall, Surge, and 75 Years of Research, *Turbomachinery*, Vol. 138, No. 1, pp. 011001, 2016. An explanation for flow features of spike-type stall inception in an axial compressor rotor, *turbomachinery*, Vol. 135, No. 2, pp. 021023, 2013.

- [15] A. Deppe, H. Saathoff, U. Stark, Spike-type stall inception in axialflow compressors, *Proceeding of 6th Conference on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics*, Lille, France, March 7-11, 2005.
- [16] J. D. Cameron, S. C. Morris, Analysis of axial compressor stall inception using unsteady casing pressure measurements, *Turbomachinery*, Vol. 135, No. 2, pp. 021036, 2013.
- [17]F. Lin, J. Chen, M. Li, Experimental investigation of unsteady rotor tip flows in a high speed compressor throttled to stall, *Proceeding of ASME Turbo Expo 2002: Power for Land*, Sea, and Air, Amsterdam, Netherlands, June 3–6, 2002.
- [18] M. Furukawa, M. Inoue, K. Saiki, K. Yamada, The Role of Tip Leakage Vortex Breakdown in Compressor Rotor Aerodynamics, *Turbomachinery*, Vol. 121, No. 3, pp. 469-480, 1999.
- [19]M. Inoue, M. Kuroumaru, T. Iwamoto, Y. Ando, Detection of a rotating stall precursor in isolated axial flow compressor rotors, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, No. 2, pp. 281-287, 1991.
- [20] R. T. Zenouz, M. H. A. 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 فارسی)
- [21]S. Liao, J. Chen, Time-frequency analysis of compressor rotating stall by means of wavelet transform, *Proceeding of ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, Birmingham, United Kingdom, June 10–13, 1996

pp. 393-401, 1998.

- [5] I. J. Day, Stall Inception in Axial Flow Compressors, *Turbomachinery*, Vol. 115, No. 1, pp. 1-9, 1993.
- [6] I. J. Day, Axial compressor stall, PhD Thesis, University of Cambridge, 1976.
- [7] C. Tan, I. Day, S. Morris, A. Wadia, Spike-Type compressor stall inception, detection, and control, *Annual review of fluid mechanics*, Vol. 42, pp. 275-300, 2010.
- [8] G. Pullan, A. M. Young, I. J. Day, E. M. Greitzer, Z. S. Spakovszky, Origins and structure of spike-type rotating stall, *Turbomachinery*, Vol. 137, No. 5, pp. 051007-11, 2015.
- [9] R. Taghavi-Zenouz, S. Abbasi, Multiple spike stall cells in low speed axial compressor rotor blade row, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 53, No. 1, pp. 47-57, 2015.
- [10] N. Amanifard, B. Farhanieh, K. Ghorbanian, Numerical investigation of rotating-stall in a stage of an axial compressor with two different approaches, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 39-47, 2007.
- [11]H. Khaleghi, Stall inception and control in a transonic fan, part A: Rotating stall inception, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 41, pp. 250-258, 2015.
- [12] H. Khaleghi, M. Boroomand, A. Tousi, J. Teixeira, Stall inception in a transonic axial fan, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A, *Power and Energy*, Vol. 222, No. 2, pp. 199-208, 2008.
- [13]S. Weichert, I. Day, Detailed measurements of spike formation in an axial compressor, *Turbomachinery*, Vol. 136, No. 5, pp. 051006, 2014.
- [14] K. Yamada, H. Kikuta, K. I. Iwakiri, M. Furukawa, S. Gunjishima,