مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 111-118

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شکل‌گیری و گسترش استال اسپایک در یک رتور کمپرسور محوری سرعت پایین

علی خوش‌نژاد[1]، محمدحسین عباباف‌بهبهانی[2]، رضا تقوی‌زنوز[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 پستی 16846-13114، taghavi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 اسفند 1395
پذیرش: 20 فروردین 1395
ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
کمپرسور محوری
استال دورانی
جریان‌سنجی سیم داغ
تبدیل موجک

چکیده

شکل‌گیری استال اسپایک و نحوه گسترش آن در یک کمپرسور محوری سرعت پایین موضوع این مطالعه بوده است. در این راستا اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر یک تست ریگ کمپرسور محوری سرعت پایین انجام شده است. پارامترهای اندازه‌گیری شامل سرعت و فشار لحظه‌ای جریان در فرآیند آغاز استال است. بدین منظور از چندین پراب جریان‌سنج سیم داغ و یک حسگر فشار با پاسخ فرکانسی بالا، برای داده‌برداری استفاده شده است. نوسانات لحظه‌ای سرعت در بالادست ردیف پره نشان می‌دهند که استال اسپایک با جدایش جریان از لبه حمله پره آغاز و در ادامه، جریان جدا شده از سطح پره منجر به ایجاد یک گردابه می‌شود. این ساختار در راستای ارتفاع پره گسترش می‌یابد. سلول استال با سرعتی کمتر از سرعت چرخش رتور، در کمپرسور مورد مطالعه 66% سرعت دورانی، پیرامون محیط کمپرسور منتشر می‌شود، همچنین برای بررسی دقیق‌تر اغتشاشات اسپایک از تبدیل فرکانسی موجک استفاده شده و توانمندی این روش در شناسایی استال اسپایک و جزئیات آن نشان داده شده است. به کمک تحلیل موجک می‌توان با نمایش تغییرات زمانی فرکانس‌ها، پدیده‌های غالب در فرایند گذار سیستم از عملکرد پایدار به شرایط وقوع استال را نشان داد.

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

Ali Khoshnejad[1], Mohammad Hosein Ababaf Behbahani[1], 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.

1- مقدمه

یکی از چالش‌ها در طراحی کمپرسورهای محوری دستیابی به نقاط عملکردی بهینه با بازدهی و نسبت فشار بالا و به دور از ناپایداری‌های آیرودینامیکی است. در واقع به دلیل محدودیت‌های آیرودینامیکی، کمپرسور باید دور از نقطه بهینه عملکرد کار کند که منجر به کاهش بازدهی می‌شود. استال دورانی و سرج از جمله ناپایداری‌های جریان درون کمپرسور است [1]. شناسایی مکانیزم شکل‌گیری 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 غیرخطی، کنترل، اندازه‌گیری‌های دقیق و پردازش سیگنال توجه بسیاری از پژوهشگران رشته‌های مختلف را به خود جلب کرده است [2].

مطالعات دهه‌های اخیر نشان می‌دهند که عموماً دو نوع استال دورانی در کمپرسورهای محوری شکل می‌گیرد که با نام استال مدال و استال اسپایک شناخته می‌شوند. استال مودال شامل اغتشاشاتی موجی شکل با شدت کم به صورت دوبعدی و طول موج بلند است که به صورت محوری در طول کمپرسور گسترش می‌یابند. این اغتشاشات می‌توانند با سرعت دورانی 20% تا 50% سرعت چرخش رتور به صورت محیطی منتشر شوند [3].

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

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 111-118, 2017 (in Persian)

فرکانس بالاست که به عنوان اسپایک شناخته می‌شود. استال اسپایک متداول‌ترین نوع شکل‌گیری استال در کمپرسورهای موتورهای هوایی است [4]. مفهوم استال اسپایک و توصیف آن نخستین بار توسط دِی [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 می‌گیرد [5]. در ابتدای شکل‌گیری استال اسپایک شدت اغتشاشات کم است، ولی در ادامه پیرامون پوسته کمپرسور سریع رشد پیدا کرده و تنها طی زمان معادل با چند دوران رتور اغتشاشات اولیه تبدیل به استال اسپایک کاملاً توسعه یافته می‌شود [6]. استال اسپایک با سرعتی بین 20%-80% سرعت دورانی کمپرسور پیرامون محیط آن منتشر می‌شود [7]. در این شرایط کمپرسور تحت استال دورانی کار کرده و دبی جرمی و نسبت فشار آن کاهش می‌یابد. تحقیقات اخیر نشان داده است که استال اسپایک علاوه‌بر کمپرسورهای دارای درز نوک رتور در کمپرسورهای پوشش‌دار[1] نیز رخ می‌دهد و این بدان معناست که با حذف جریان نشتی نوک پره کمپرسور امکان شکل‌گیری استال اسپایک وجود دارد [8]. مطالعه پدیده استال هم در کمپرسورهای محوری سرعت پایین [9] و هم گذرصوت [10-12] مورد توجه محققین این حوزه بوده است. طی سالیان اخیر چندین مطالعه با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری 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 می‌گرفته است [15]، اما امروزه علاوه‌بر سیگنال‌های خام اندازه‌گیری شده، روش‌های مختلف تحلیل سیگنال نیز به کار گرفته می‌شود [17,16]. استفاده از تحلیل‌های فرکانسی امکان بررسی دقیق‌تر فرایند شروع ناپایداری‌ها را فراهم می‌آورد [2].

تحلیل فرکانسی موجک[2] 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 شکل‌گیری استال یک ابزار توانمند در این حوزه به حساب می‌آید. 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 سرعت‌پایین است. بدین‌منظور اندازه‌گیری 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 شکل‌گیری اسپایک مورد بحث قرار گرفته است، همچنین اندازه‌گیری‌ها 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 فیزیکی پیرامون استال دورانی مفید 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 می‌دهد. تست‌ریگ توسط یک الکتروموتور با حداکثر توان 45 کیلووات به گردش در می‌آید. هوا با چرخش رتور تک مرحله‌ای کمپرسور از طریق مجرای ورودی به صورت یکنواخت و با شدت آشفتگی کم وارد مجرای کمپرسور شده و پس از عبور از رتور و جمع‌کننده حلزونی شکل خارج می‌شود.

در کمپرسور مورد مطالعه از یک رتور منفرد 12 پره و طراحی شده برای 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]. پروفیل رتور مورد مطالعه براساس پروفیل NACA65 طراحی شده و مشخصات طراحی آن در جدول 1 ارائه شده است. سرعت گردش محور کمپرسور به وسیله یک تبدیل‌کننده فرکانسی[3] کنترل می‌شود. دبی جرمی کمپرسور نیز توسط یک شیر که در پایین دست رتور قرار گرفته است، تنظیم می‌شود.

3- تجهیزات اندازه‌گیری و نحوه انجام آزمایش

تست‌ریگ مجهز به سیستم‌های اندازه‌گیری استاندارد برای انجام آزمون‌های مورد نظر است. به منظور مطالعه ناپایایی‌های جریان از سیستم جریان‌سنجی سیم داغ و یک حسگر فشار با پاسخ فرکانسی 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 اندازه‌گیری می‌کنند. داده‌برداری با سیستم جریان‌سنج سیم داغ با فرکانس 10 کیلوهرتز 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. بدین‌ترتیب نوسانات لحظه‌ای سرعت در فرآیند آغاز استال از پایه تا نوک پره اندازه‌گیری شده‌اند.

جدول 1 مشخصات ردیف پره رتور

Table 1 Rotor blade row specifications

مشخصه	مقدار	مشخصه	مقدار
سرعت دورانی(rpm)	1300	طول وتر در نوک (mm)	117.5
قطر پوسته (mm)	600	نسبت منظری	1
نسبت پایه به نوک	0.6	زاویه نصب پره (deg)	56.2

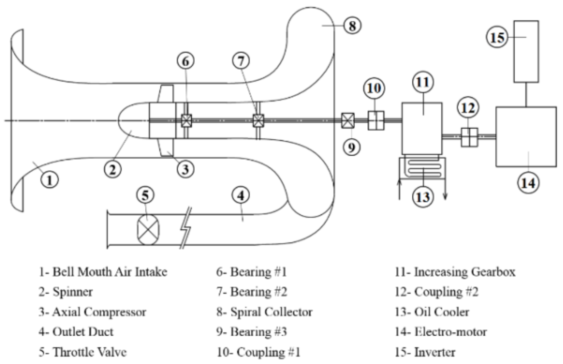

Fig. 1 Schematic layout of axial compressor test rig

شکل 1 نمای شماتیک دستگاه تست کمپرسور محوری

[1] Shrouded
[2] Wavelet
[3] Frequency inverter

در آزمون دوم 4 پراب جریان‌سنج سیم داغ در فواصل زاویه‌ای مساوی 90 درجه، پیرامون محیط کمپرسور قرار گرفته و به طور هم‌زمان سرعت لحظه‌ای جریان را طی فرآیند آغاز استال اندازه‌گیری می‌کنند. این اندازه‌گیری‌ها منجر به کسب نتایجی در ارتباط با چگونگی گسترش استال دورانی پیرامون محیط کمپرسور و سرعت انتشار آن شده است. این چیدمان‌های قرارگیری در شکل 2 نشان داده شده است.

4- معرفی ابزار تحلیل فرکانسی تبدیل موجک

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[1] [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 آن مورد بحث قرار می‌گیرد.

تبدیل یک‌بعدی پیوسته موجک[2] مطابق رابطه (1) تعریف می‌شود [2].

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

در این رابطه W تابع موجک، x سیگنال ورودی و ψ تابع مادر، همچنین τ و s به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس است. پارامتر مقیاس در این تبدیل به طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد ($s=1/f$).

پارامتر $1/\sqrt{|s|}$ در این رابطه سبب می‌شود تا طیف چگالی انرژی در مقیاس‌های مختلف مشابه و قابل مقایسه باشند. رابطه بین تبدیل موجک و تبدیل فوریه به صورت رابطه (2) قابل بیان است.

$$WX(s,t)=\sqrt{s}\{F^{-1}[X(\omega)\psi(s\omega)]\}_{t} \tag{2}$$

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

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

کانتور E به صورت تابعی از s و t با عنوان طیف نگاره موجک[3] شناخته می‌شود. تابع $\psi(t)$ به عنوان تابع مادر تبدیل موجک در تحلیل ناپایداری‌های کمپرسور بسیار تأثیرگذار است. دو گزینه متداول و پرکاربرد برای این تابع، مورلت[4] و دی‌اُجی[5] است. در این مطالعه تابع مادر مورلت به کار گرفته شده است.

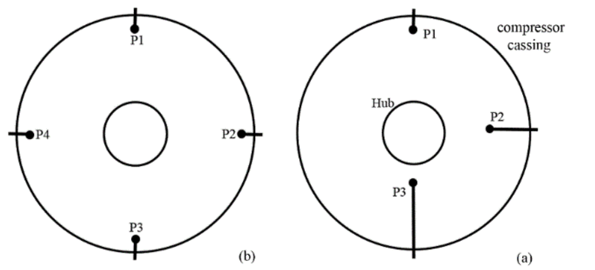

Fig. 2 Configuration of hot wire probes around the compressor circumference

شکل 2 چیدمان حسگرهای جریان‌سنج سیم داغ پیرامون محیط کمپرسور

[1] Liao
[2] One-dimensional continuous wavelet transform
[3] Wavelet spectrogram
[4] Morlet
[5] DOG

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 سریع اعمال تبدیل فوریه بر رابطه (2) به صورت روابط (6-4) است.

$$x(n), n=0,1,\dots,N-1 \tag{4}$$

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

$$WX_{n}(s_{r})=\frac{\sqrt{s_{r}}}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)\psi(s_{r}\omega_{k})e^{-i2\pi kn/N} \tag{6}$$

رابطه (6) فرم گسسته تبدیل موجک پیوسته یک‌بعدی را نشان می‌دهد.

5- نتایج

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

5-1- مکانیزم شکل‌گیری استال اسپایک

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 اندازه‌گیری شده در ناحیه نوک پره نشان می‌دهد. این نتایج برای سرعت‌های دورانی 1300rpm و 1800rpm ارائه شده‌اند. نخستین پیک پدیدار شده در هر دو شکل (3-a) و شکل (3-b) که به ترتیب در فرکانس‌های 260 و 360 هرتز رخ داده‌اند، نشان‌گر فرکانس گذر پره است. پیک دوم که متناظر با فرکانس‌های 520 و 720 هرتز است، نخستین هارمونیک فرکانس گذر پره را مشخص می‌کند. در این شرایط تنها فرکانس غالب میدان جریان ناشی از چرخش رتور بوده و اغتشاشی در گذرگاه جریان مشاهده نمی‌شود.

طیف فرکانسی سرعت اندازه‌گیری 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[6] هر فرکانس را نشان می‌دهد. در هر دو شکل (4-a,b) اغتشاشی با شدت بالا در حدود فرکانسی $0.7\ f_{\mathrm{rotor}}$ (یعنی 0.7

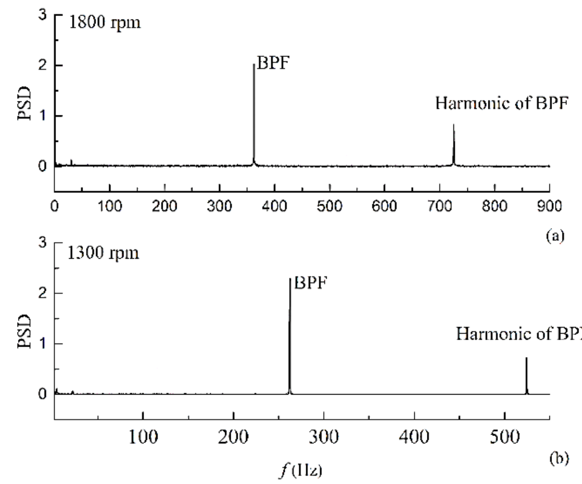

Fig. 3 Frequency spectrum of velocity signal at design point

شکل 3 طیف فرکانسی سیگنال سرعت در نقطه عملکردی طراحی

[6] PSD; Power Spectral Density

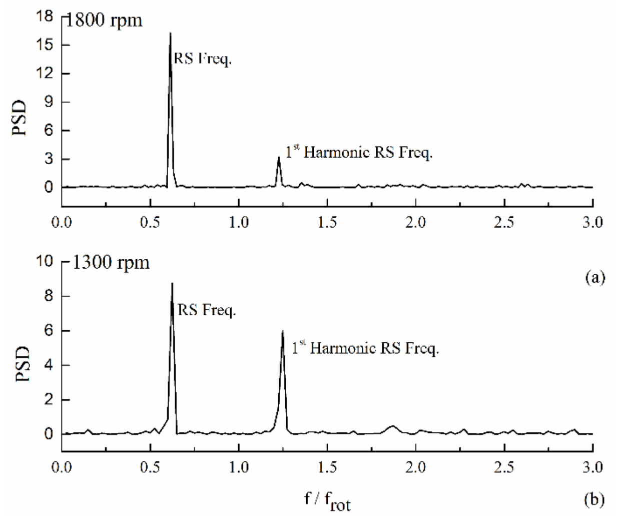

Fig. 4 Frequency spectrum of velocity signal at the stall condition

شکل 4 طیف فرکانسی سیگنال سرعت در نقطه عملکردی طراحی

فرکانس چرخش رتور) و با شدتی کمتر در حدود $1.4\ f_{rotor}$ پدیدار شده است. نخستین فرکانس مربوط به فرکانس چرخشی سلول استال[1] (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 دقیق‌تر از آن‌چه که در لحظه آغاز استال رخ می‌دهد، سیگنال‌های لحظه‌ای 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 می‌شود.

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 می‌یابد. 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 می‌دهد. این گردابه از سطح پره آغاز و تا پوسته کمپرسور ادامه می‌یابد. 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 می‌شود. در هر دو سیگنال سرعت و فشار (شکل 5) نوسانات پس از افت یا خیز ناشی از جدایش جریان به واسطه شکل‌گیری این ساختار گردابه‌ای است. به عنوان جمع‌بندی می‌توان این‌گونه 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 می‌شود.

مکانیزم توصیف شده از شکل‌گیری استال اسپایک در مطالعه عددی

[1] RSF; Rotating Stall Frequency

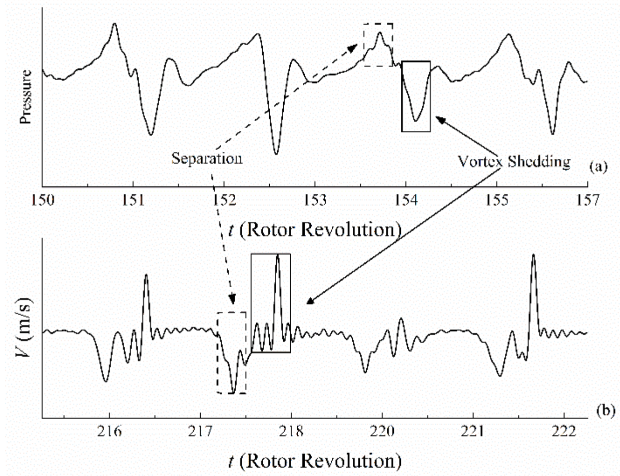

Fig. 5 Velocity and pressure signals at the stall condition

شکل 5 سیگنال‌های سرعت و فشار در شرایط وقوع استال

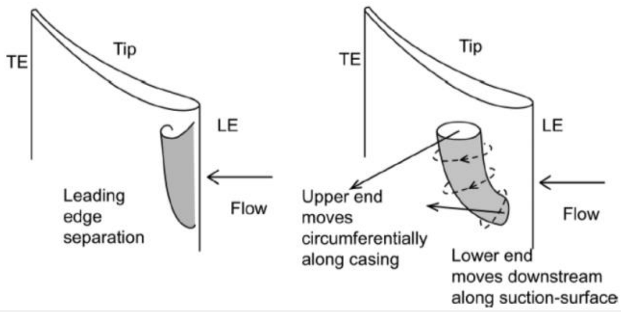

Fig. 6 The vortical structure and propagation of spike [8]

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 می‌شود. در ادامه این جدایش، گردابه‌ایی ایجاد شده که گستره آن از پایه تا نوک پره کمپرسور را دربرمی‌گیرد. طرحواره نحوه شکل‌گیری استال با استفاده از نتایج تحلیل عددی پولان و همکاران در شکل 6 نشان داده شده است [8].

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

در زمان متناظر با 163اُمین 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 می‌کند. فاصله زمانی بین ثبت استال توسط نخستین پراب تا رصد آن توسط پراب چهارم، سرعت دوران سلول استال را معین می‌کند. در کمپرسور مورد مطالعه همان‌گونه 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

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.

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 اندازه‌گیری به ویژه در مراحل ابتدایی شکل‌گیری استال دشوار است. تحلیل موجک یک تحلیل ایده‌آل برای جمع‌آوری 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 شکل‌گیری استال یک ابزار توانمند در این حوزه به حساب می‌آید. نوسانات سرعت و تبدیل موجک آن در بالا دست ردیف پره کمپرسور و در لحظه آغاز استال در

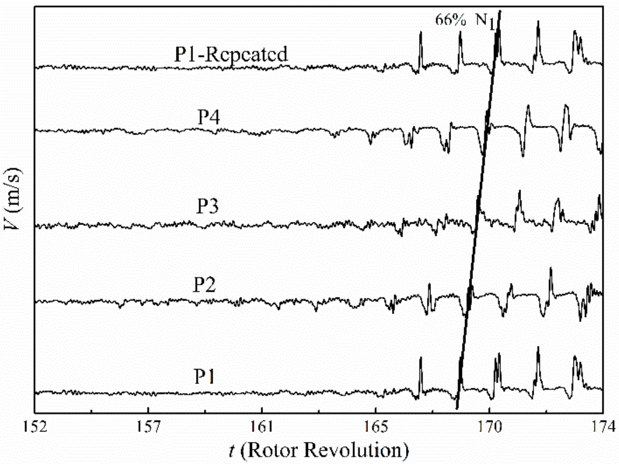

Fig. 7 Instantaneous velocity signals at different circumferential positions (N=1300 rpm)

شکل 7 سیگنال‌های سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری‌شده در موقعیت‌های محیطی مختلف (N=1300 rpm)

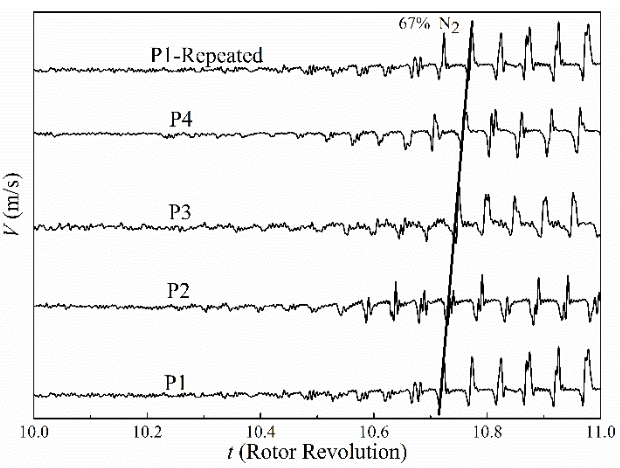

Fig. 8 Instantaneous velocity signals at different circumferential positions (N=1800 rpm)

شکل 8 سیگنال‌های سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری 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 شکل‌گیری یک ناپایداری با ماهیت تناوبی در میدان جریان دارد. از طرفی نوار ممتد ترسیم شده در فرکانس 260 Hz دچار به هم ریختگی شده که نشان‌دهنده تضعیف شکل موجی سیگنال سرعت است. از دوران 167اُم رتور به بعد علاوه‌بر شکل‌گیری یک نوار ممتد با شدت بالا در فرکانس 14Hz، لکه‌هایی غیرمتناوب نیز در میانه باند فرکانسی ایجاد شده است. این لکه‌های حامل انرژی[1] نشان‌گر اسپایک‌هاست. نوار ممتد در فرکانس 14Hz بیان‌گر سرعت چرخش این اسپایک‌هاست. منحنی GWS[2] در سمت راست کانتور موجک نیز نشان می‌دهد که بیشینه شدت مربوط به فرکانس چرخشی استال اسپایک است.

جهت بررسی فیزیکی بیشتر فرایند شکل‌گیری 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 اندازه‌گیری مشاهده شده و شدت آن‌ها 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 32-256 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 این‌گونه می‌توان 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 موجک متناظر است. با وصل کردن این لکه‌های پر انرژی و محاسبه فاصله 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 می‌توان نتیجه گرفت که سرعت سلول استال در کمپرسور مورد مطالعه به ترتیب در سرعت‌های دورانی 1300rpm و 1800rpm برابر با 66% و 67% سرعت دوران رتور است.

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تجربی فرآیند شکل‌گیری استال اسپایک در یک

[1] Energy spots
[2] Global Wavelet Spectrum

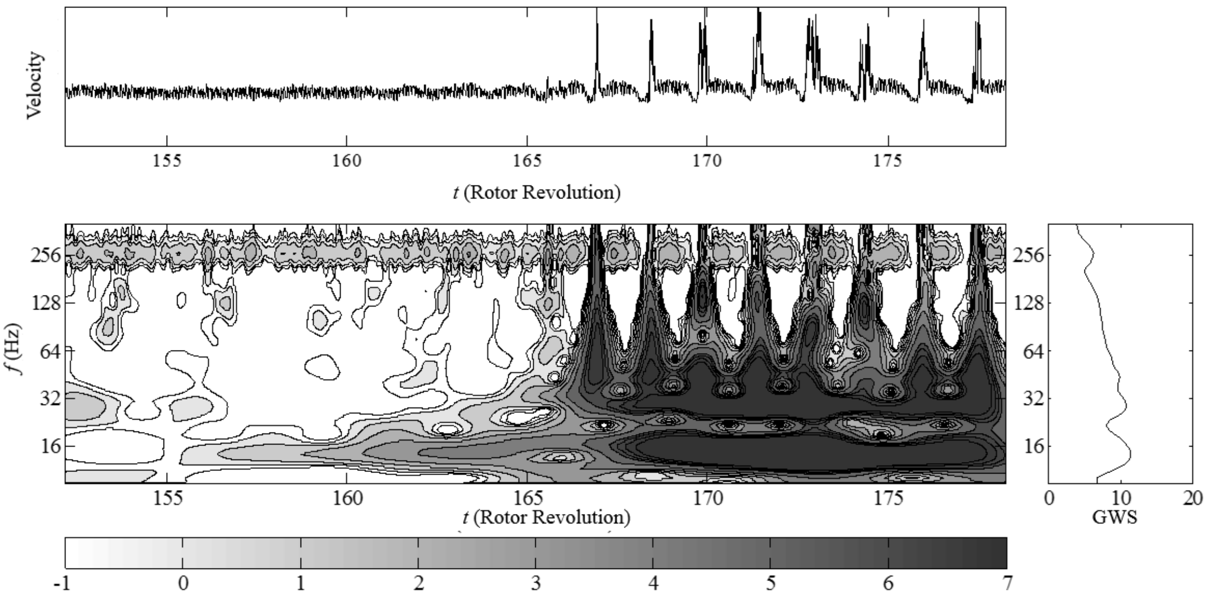

Fig. 9 Velocity raw signal and its wavelet transform at stall inception process

شکل 9 سیگنال سرعت لحظه‌ای به همراه تبدیل موجک آن در فرآیند آغاز استال

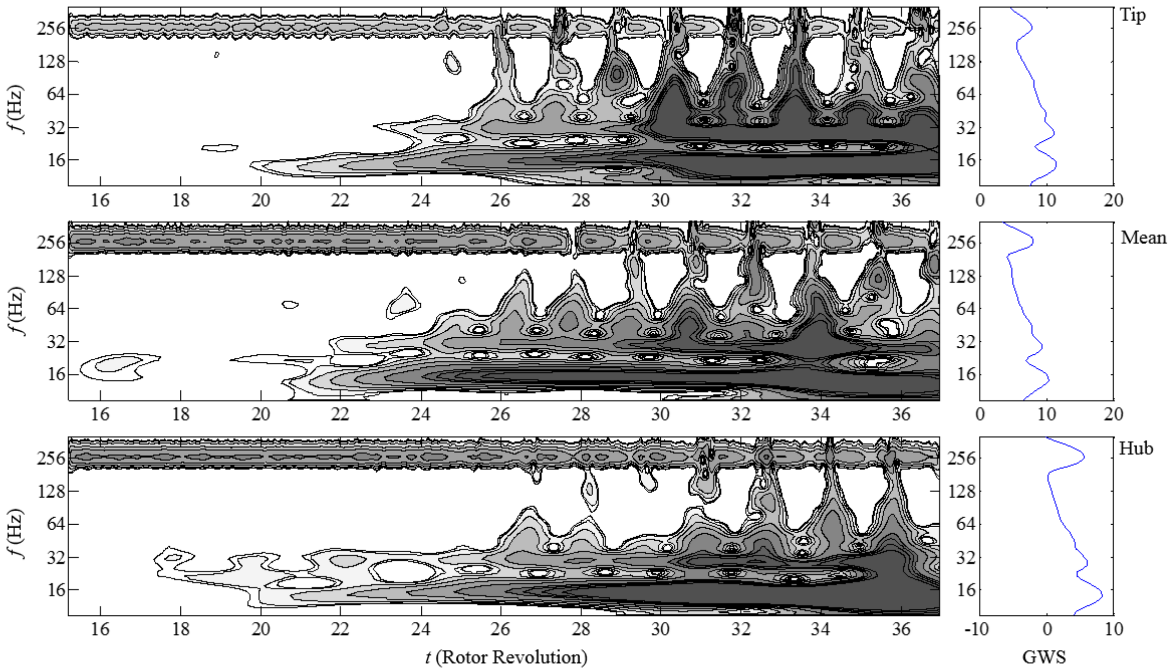

Fig. 10 Wavelet transform of velocity signal in the stall inception process at different radial positions

شکل 10 کانتورهای تبدیل موجک سیگنال سرعت در فرآیند آغاز استال در موقعیت‌های شعاعی مختلف

کمپرسور محوری سرعت پایین پرداخته شده است. اندازه‌گیری‌ها 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.

1-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 می‌کند.

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 شکل‌گیری استال است. سرعت انتشار و طیف انرژی سلول‌های استال به کمک این تبدیل قابل بررسی و استخراج است.

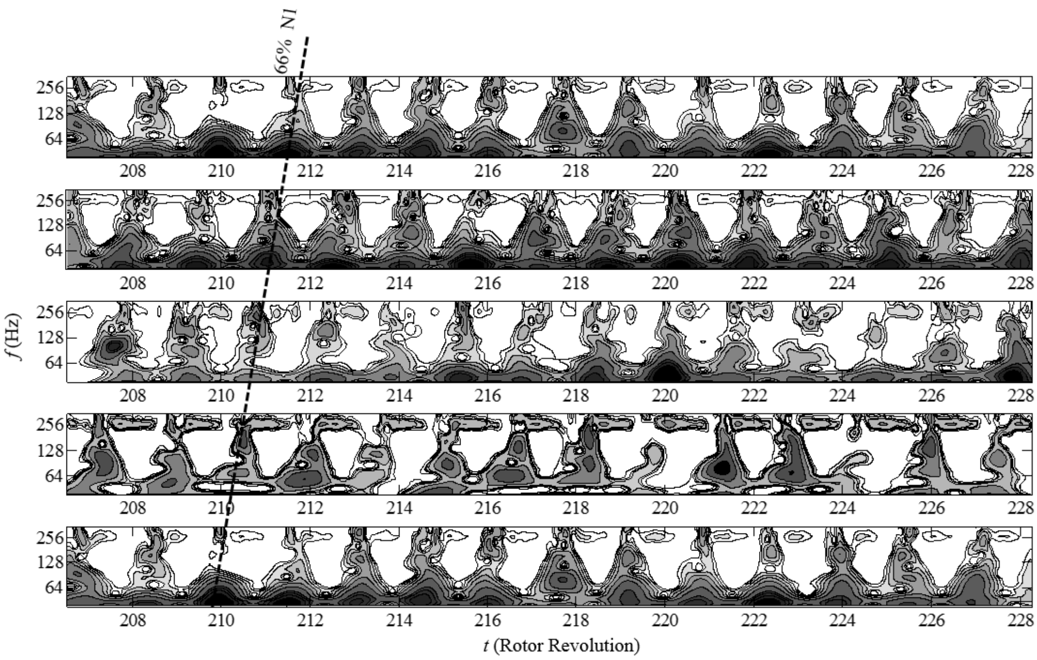

Fig. 11 Wavelet transform of velocity signal in fully developed stall condition at different circumferential positions (N=1300 rpm)

شکل 11 کانتورهای تبدیل موجک سیگنال سرعت در شرایط استال توسعه‌یافته و در موقعیت‌های محیطی مختلف (N=1300 rpm)

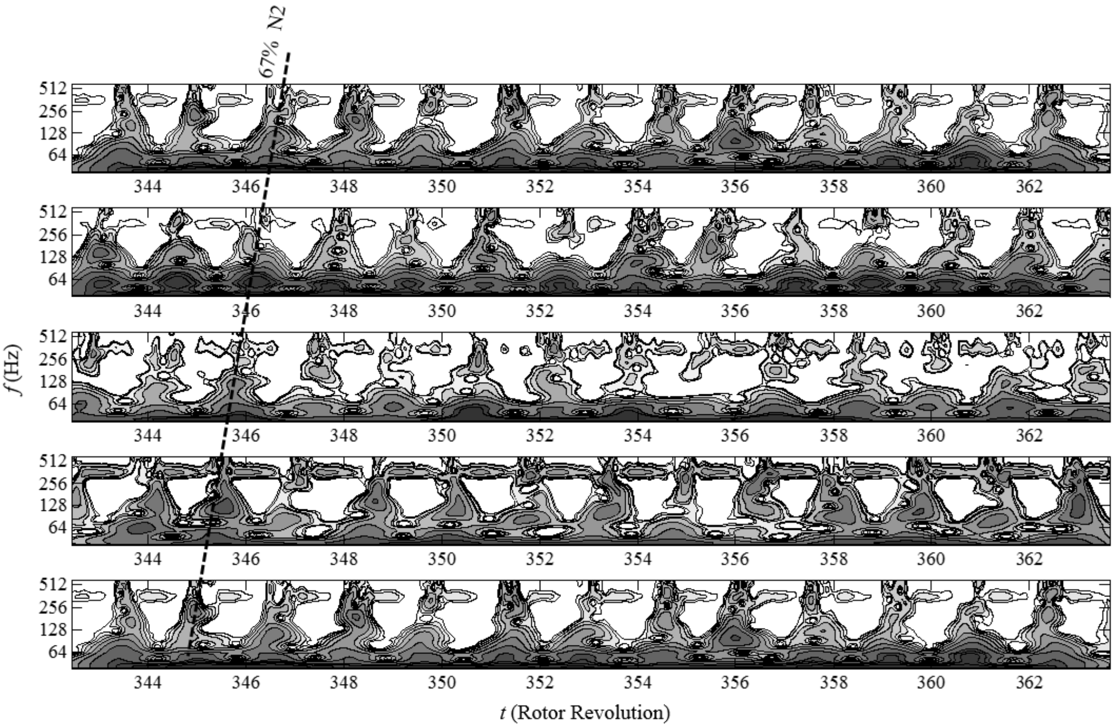

Fig. 12 Wavelet transform of velocity signal in the fully developed stall condition at the different circumferential positions (N=1800 rpm)

شکل 12 کانتورهای تبدیل موجک سیگنال سرعت در شرایط استال توسعه‌یافته و در موقعیت‌های محیطی مختلف (N=1800 rpm)

7- تقدیر و تشکر

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

[1] I. Day, Stall, Surge, and 75 Years of Research, *Turbomachinery*, Vol. 138, No. 1, pp. 011001, 2016 .

[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,

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 axial-flow 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,