مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 421-428

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی ارتعاش ناشی از گردابه در سازه‌های استوانه‌ای قائم: بررسی تاثیر شرایط انتهایی بر رفتار ارتعاشی سازه

آرش بختیاری[1]، مصطفی زین الدینی[2*]، مجید احتشامی[3]، وحید تمیمی[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
3- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
4- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 1996715433، zeinoddini@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 تیر 1395
پذیرش: 26 شهریور 1395
ارائه در سایت: 01 آبان 1395

کلید واژگان:
ارتعاش ناشی از گردابه
ورق انتهایی
دامنه بدون بعد
نیروی برآیی
اختلاف فاز بین نیروی برآیی سیال و جابجایی استوانه

چکیده

در سال‌های اخیر، مطالعه آزمایشگاهی پدیده ارتعاش ناشی از گردابه، یکی از موضوعات مورد علاقه در بین محققین بوده‌است. با این حال فرضیات و روش‌های مورد استفاده در هر آزمایش، منجر به نتایج به نسبت متفاوتی در تحقیق‌های صورت گرفته، شده است. در مقاله حاضر، با استفاده از یک استوانه، به بررسی و تحلیل اثر شرایط انتهایی در پاسخ‌های ارتعاشی استوانه‌های در معرض جریان آب پرداخته شده است. برای این منظور یک استوانه صلب که به صورت ارتجاعی در یک حوضچه کشش نصب شده، در دو حالت با و بدون ورق انتهایی مورد آزمایش قرار گرفته است. محدوده اعداد رینولدز آزمایش شده از 5.8×10^3 تا 6.6×10^4 است. به منظور کنترل روش آزمایشگاهی مورد استفاده، داده‌های به‌دست آمده در این تحقیق، برای حالتی که ورق انتهایی به استوانه الصاق شده، با داده‌های مشابه آزمایشگاهی دیگر محققین مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج این تحقیق با کارهای گذشته، گویای درستی روش مورد آزمایش بوده است. براساس نتایج این تحقیق ورق انتهایی تاثیر قابل توجهی بر دامنه بدون بعد ارتعاشی استوانه خواهد داشت. همچنین، با حذف ورق انتهایی نمودار دامنه بدون بعد استوانه به سرعت‌های کاهش یافته بالاتری انتقال می‌یابد. در پاسخ بسامدی استوانه، حذف ورق انتهایی منجر به مقادیر کمتری برای بسامد استوانه شده است. بررسی ضریب نیروی برآیی نیز گویای روند مشابهی با آنچه که در دامنه بدون بعد دیده شد، می‌باشد. به‌طور کلی، براساس نتایج این تحقیق، حذف ورق انتهایی منجر به تحریک بیشتر استوانه در معرض جریان خواهد شد.

Experimentally Investigation on the Vortex-Induced Vibration of Circular Cylinders: Effect of end conditions on the response of the Structure

Arash Bakhtiari[1], Mostafa Zeinoddini[*1], Majid Ehteshami[1], Vahid Tamimi[2]

1- Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Faculty of Civil Engineering, Tehran University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1996715433, Tehran, Iran, zeinoddini@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 July 2016
Accepted 16 September 2016
Available Online 22 October 2016

Keywords:
Vortex-Induced Vibration
Endplate
Non-dimensional Amplitude
Lift Coefficient
Phase Shift between the Lift Force and the Cylinder's Displacement

ABSTRACT

In recent decades, experimental studies of the vortex-induced vibration (VIV) became one of the interesting fields of science. However, a variety of assumptions and methods of experiments have led to different results in various researches. Several parameters such as mass ratio, aspect ratio, degrees of freedom, and boundary conditions affect the VIV response of a simple circular cylinder. The current paper reports and discusses the results of in-water VIV experiments on an elastically mounted rigid cylinder with various types of end conditions. This paper focusses on the effects of the end condition by attaching an endplate to a circular cylinder and the results are compared with those from a cylinder with no endplate. The Reynolds number ranges from 5.8×10^3 to 6.6×10^4. Experimental setup has also been compared and verified with some classical results of VIV. Results of current study were favorably compatible with previous researchers' results. The experimental results show that, the end condition noticeably changes the VIV amplitude, especially in the lock-in area. Moreover, non-dimensional amplitudes shift to the higher reduced velocities when the endplate is removed. In the frequency responses, the cylinder with no endplate has lower quantities rather than the cylinder with an attached endplate. Evaluation of lift force coefficients also shows a similar pattern of effects on the non-dimensional amplitude. Consequently, the excitation of the structure in the lock-in region increases when the endplate from the cylinder's end is removed.

1-مقدمه

در سال‌های اخیر، بررسی ارتعاش‌های ناشی از جریان در سازه‌های دریایی به‌عنوان یکی از موضوعات مورد علاقه در رشته‌های مهندسی عمران و مکانیک مورد توجه محققین بسیاری بوده است. در این میان انجام مطالعات

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Bakhtiari, M. Zeinoddini, M. Ehteshami, V. Tamimi, Experimentally Investigation on the Vortex-Induced Vibration of Circular Cylinders: Effect of end conditions on the response of the Structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 421-428, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]

آزمایشگاهی، به سبب ارائه یک دیدگاه فیزیکی از مسئله، به‌عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد در مطالعه این پدیده، مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا محققین، با فرض‌های متفاوت و با روش‌های مختلف آزمایشگاهی، اقدام به شبیه‌سازی اثر ارتعاش‌های ناشی از جریان نموده‌اند. عواملی همچون، روش مورد آزمایش، ابعاد و هندسه سازه، خصوصیات دینامیکی سازه و بازه مورد بررسی برای اعداد رینولدز از جمله این فرض‌ها می‌باشند. به‌عنوان نمونه، خلک و ویلیامسون [1] به مطالعه پدیده ارتعاش‌های ناشی از جریان بر یک استوانه و با نسبت‌های مختلف جرمی پرداخته‌اند. در تحقیق‌های دیگری برانکویک و بیرمن [2] و گوردهان و ویلیامسون [3] نوسان عمود بر جریان را برای نسبت‌های جرم-میرایی کوچک‌تر اندازه گرفته‌اند. براساس یافته‌های آن‌ها، دامنه نوسان بی‌بعد شده به 1.2 رسیده است که از مقدار مشاهده شده توسط خلک و ویلیامسون [4] بیشتر است.

بلوینز [5] هم در کتاب خود به بررسی هندسه‌های مختلف پرداخته و با مطالعه الگوی تاثیرپذیری آن‌ها از جریان، به دسته‌بندی این پدیده پرداخته است. همچنین، در سال 1984 بیرمن [6] به بررسی نقش شکل جسم در ناحیه سایه بر ارتعاش‌های ناشی از گردابه پرداخت. در کاری دیگر، شکل الگوی گردابه‌ها در ناحیه پشت یک استوانه یکنواخت با نوسان‌های منظم اجباری عمود بر جریان، توسط ویلیامسون و روشکو [7] مورد بررسی قرار گرفته است. براساس یافته‌های آن‌ها این الگوها تابعی از دامنه و بسامد ارتعاش بوده و کاملا از یکدیگر متفاوت می‌باشند.

به‌عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار در موضوع ارتعاش‌های ناشی از جریان، شرایط انتهایی استوانه در اغلب این آزمایش‌ها مورد توجه بوده است. در استوانه‌های ثابت و بدون ارتعاش، اثر شرایط انتهایی بر الگوی تغییرات گردابه‌ها، در ناحیه پشت سازه، هم برای استوانه‌های با نسبت طولی کم و هم در استوانه‌های با نسبت طولی زیاد، مورد بررسی و تایید قرار گرفته است [8]. همچنین، تاثیر شرایط انتهایی برای جریان‌های لایه‌ای در اعداد رینولدز کمتر از 190 و جریان‌های آشفته با اعداد رینولدز در حدود 5000 مطالعه شده است [9]. سپاسی و بیرمن [10] نیز نشان داده‌اند که در استوانه‌های ثابت، شرایط انتهایی و نسبت طولی بر الگوی توزیع فشار در طول استوانه موثر است.

در استوانه‌های در حال نوسان، هور و همکاران [11] نشان دادند که شرایط انتهایی استوانه در حالتی که بسامد گردابه‌ها از بسامد طبیعی سازه کمتر می‌شود، تاثیرگذارتر خواهد بود. در سال 1998 هور و همکاران [12] به مطالعه پدیده ارتعاش‌های ناشی از گردابه در یک استوانه پرداخته‌اند. در تحقیق انجام شده توسط آن‌ها، در انتهای استوانه از یک ورق دایره‌ای الصاق شده به آن استفاده شده است. اون و همکاران [13] هم از روش مشابهی برای انجام آزمایش‌های خود، استفاده نموده‌اند.

در تحقیق دیگری، سارپکایا [14]، از یک ورق انتهایی بدون الصاق به استوانه استفاد نموده است. در این تحقیق یک صفحه به فاصله چند میلی‌متر از سطح پایینی استوانه در کف کانال تعبیه شده است. این روش مورد استفاده محققین دیگر از قبیل خلک و ویلیامسون [4] و ژاویتس و ویلیامسون [15] نیز قرار گرفته است. برخی محققین از قبیل برنکوویچ و بیرمن [2]، کالمو و همکاران [16] و آی و همکاران [17] نیز از استوانه‌های بدون ورق انتهایی در آزمایش‌های خود استفاده کرده‌اند.

در اغلب مطالعات ذکر شده، الصاق ورق انتهایی اغلب به‌دلیل فرض جریان در حالت دوبعدی و نسبت‌های طولی زیاد صورت گرفته است. این موضوع با بیشتر شدن طول استوانه و در سازه‌های با نسبت طولی کمتر که در سطح آب معلق هستند فرض مناسبی نیست. به همین جهت، در برخی دیگر از تحقیق‌های ذکر شده، از این گونه شرایط انتهایی اجتناب شده است. در این مقاله سعی شده تا با محوریت پدیده ارتعاش‌های ناشی از گردابه، به مطالعه آزمایشگاهی اثر ورق انتهایی، بر پاسخ‌های نوسانی یک استوانه در معرض جریان، پرداخته شود. به همین منظور، دو استوانه، یکی با الصاق ورق انتهایی و دیگری بدون ورق انتهایی در یک حوضچه کشش قرار گرفته و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است.

2-روش آزمایش

تحقیق حاضر در حوضچه کشش[1] آزمایشگاه مهندسی دریا در دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف به انجام رسیده است. این حوضچه دارای طول کشش 25 متر، عرض 2.5 متر و عمق 1.7 متر می‌باشد. بخش متحرک (ارابه) شامل یک داده بردار، یک حسگر اندازه‌گیری بار[2]، دوربین فیلم‌برداری و دیگر تجهیزات مربوطه است که بر روی یک سازه فلزی بر روی حوضچه نصب شده است. این بخش بوسیله یک موتور الکتریکی که توسط یک رایانه کنترل می‌شود، کشیده می‌شود. بیشینه سرعت برای این موتور 4 متر بر ثانیه و با تفکیک 0.001 متر بر ثانیه است. "شکل 1" نمونه‌ای از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های حاضر را نشان داده است.

یک سیستم یک درجه آزادی با استفاده از فنرهای تیغه‌ای به بخش متحرک متصل شده است (شکل 2). استوانه مورد آزمایش به انتهای ارابه متصل شده و تنها در جهت عمود بر حرکت آن امکان نوسان دارد. هر فنر ابعادی با 350 میلی‌متر طول، 100 میلی‌متر عرض و 0.5 میلی‌متر ضخامت دارا است. سیستم مورد استفاده با استفاده از روش ذکر شده، در تحقیق آسی و همکاران [18] برای ارتعاش‌های عمود بر جریان معرفی شده است. این روش در کارهای دیگر از قبیل تحقیق انجام شده توسط زین‌الدینی و همکاران [19] مورد استفاده قرار گرفته است.

استوانه مورد آزمایش از جنس آلومینیوم است که با استفاده از دستگاه ماشین‌کاری، آماده شده است. قطر خارجی استوانه برابر با 65 میلی‌متر است

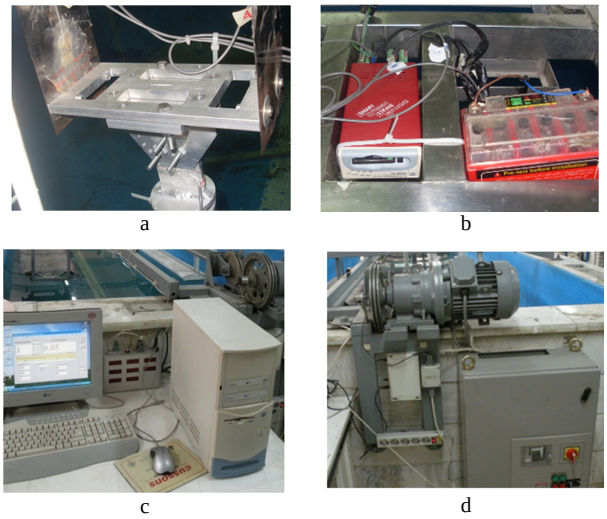

Fig.1 Experimental facilities, (a) springs and the cylinder cap, (b) the data logger, (c) the system control server, (d) the towing motor

شکل 1 تجهیزات مورد استفاده در آزمایش (a) فنر ها و بخش بالایی استوانه، (b) داده بردار، (c) رایانه کنترل سیستم، (d) موتور کشنده.

[1]Towing Tank
[2] Load Cell

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]

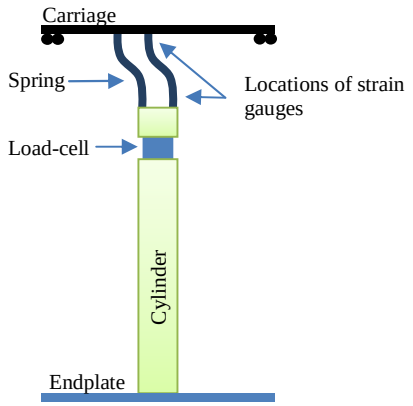

Fig. 2 A schematic view of the experimental set-up

شکل 2 نمای شماتیک از روش مورد آزمایش

و قطر داخلی آن 45 میلی‌متر می‌باشد. طول استوانه 500 میلی‌متر است که 400 میلی‌متر آن در آب قرار می‌گیرد. مشخصات استوانه مورد آزمایش به صورت کامل در جدول 1 ذکر شده است. به علاوه، در راستای بررسی اثر شرایط انتهایی بر روند تشکیل گردابه‌ها، از یک ورق آلومینیومی در انتهای نمونه استفاده شده است. ورق انتهایی مورد استفاده مشابه ورق انتهایی در کار مورس و همکاران [20] به شکل دایره‌ای با قطر در حدود 7 برابر قطر استوانه است و در انتهای آن الصاق شده است (شکل 2). ضخامت آن با در نظر گرفتن توصیه‌های استندبای [21] و با پخ کردن لبه‌های آن به منظور کاهش اثر ابعاد ورق در میدان جریان ورودی، مدنظر قرار گرفته است.

ارتعاش استوانه با استفاده از کرنش‌سنج‌هایی که در نزدیکی تکیه‌گاه هر فنر نصب شده، اندازه‌گیری شده است. در مجموع چهار کرنش‌سنج به ثبت ارتعاش‌های ناشی از جریان می‌پردازد. براساس تنظیمات انجام شده هر کرنش سنج با تواتر 200 هرتز به ثبت داده می‌پردازد.

نیرو برآیی با استفاده از یک حسگر اندازه‌گیری بار ماشین کاری شده که درست بالای استوانه و قبل از اتصال آن به سیستم فنری نصب شده، ثبت می‌شود. این حسگر اندازه‌گیری بار از جنس آلومینیوم ساخته شده و استوانه را به فنرهای نوسان کننده متصل می‌کند. ابعاد حسگر اندازه‌گیری بار ذکر شده با استفاده از تحلیل استاتیکی یک مدل المان محدود به‌دست آمده است. یک کرنش‌سنج با تنظیمات گفته شده در خصوص کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی سیستم فنر، بر روی حسگر اندازه‌گیری بار الصاق شده تا نیروهای برآیی وارده از طرف گردابه‌ها را به ثبت برساند. لازم به ذکر است که برای

جدول 1 مشخصات استوانه‌های توخالی تست شده

Table 1 Physical properties of the hollow circular test cylinders

پارامتر	استوانه با ورق انتهایی	استوانه بدون ورق انتهایی	واحد
قطر خارجی	65	65	mm
قطر داخلی	45	45	mm
طول خیس	400	400	mm
سختی فنر	210	210	N/m
میرایی سیستم در هوا	0.5	0.5	%
بسامد طبیعی در آب	1.24	1.14	Hz
نسبت جرمی[1]	2.57	2.41	-
پارامتر جرم-میرایی[2]	0.013	0.012	-

[1] Mass Ratio
[2] Mass-Damping Parameter

اندازه‌گیری نیروی برآیی می‌بایست حسگر اندازه‌گیری بار در راستای جریان قرار گیرد. در این حالت با محاسبه نیروهای عمودی وارد شده بر سیلندر و کسر اثر ناشی از نیرو اینرسی به محاسبه نیروی برآیی مبادرت می‌شود.

نوسان‌های به‌دست آمده از هر آزمایش، با استفاده از روش تبدیل هیلبرت مورد تحلیل قرار گرفته اند. همچنین اختلاف فاز بین نیروی برآیی سیال و جابجایی استوانه با استفاده از این روش محاسبه شده است. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص روش مورد استفاده، روند شرح داده شده در کارهای خلک و ویلیامسون [1] و زین الدینی و همکاران [19] نیز استفاده شده و توضیحات مربوط به این روش در این مراجع ذکر شده است.

حسگرهای نصب شده بر روی سیستم، قبل از انجام هر تست کنترل و واسنجی شده‌اند. واسنجی حسگرهای جابجایی و نیرو نشان داده که در محدوده تغییرات موجود در این آزمایش، فنرها در حالت ارتجاعی خود به‌صورت خطی به نیرو واکنش نشان داده‌اند. همچنین، در هر آزمایش، با توجه به طول محدود حوضچه کشش سعی شده تا حداقل 20 نوسان در هر سرعت برداشت شود. این موضوع در سرعت‌های بالا منجر به تکرار آزمایش برای کسب اطلاعات کامل‌تر شده است. به‌منظور کاهش اثرات ناخواسته بر نتایج آزمایش، بین هر دو تست، زمان آرامش در نظر گرفته شده تا آب موجود در حوضچه به سکون کامل برسد. یکی دیگر از نتایج خطا در آزمایش-ها، اثر سطح آزاد بر نوسان استوانه است که در تحلیل نتایج مورد توجه قرار گرفته است. با این اصلاح می‌توان استوانه را با استوانه‌های مستغرق در آب همسان فرض نمود. مشابه این کار در تحقیق آسی و همکاران [18] نیز انجام شده است. عدم قطعیت در داده‌های به‌دست آمده برای جابجایی محاسبه شده در حدود ±4% و برای نیروی برآیی در حدود ±4% می‌باشد.

3- نتایج و تحلیل

3-1- راستی‌آزمایی روش آزمایش

در گام نخست، باید اطمینان یافت که روش مورد استفاده در تحقیق حاضر، می‌تواند پاسخ‌های مناسبی از پدیده ارتعاش ناشی از گردابه‌ها را به‌دست دهد. برای همین منظور، در این بخش، به راستی‌آزمایی روش مورد آزمایش در این تحقیق پرداخته می‌شود. برای این کار، استوانه در حالتی که ورق انتهایی به آن الصاق شده است، با کار محققین دیگر مانند خلک و ویلیامسون [1] و فرانزینی و همکاران [22] مقایسه شده است. مشخصات فیزیکی استوانه مورد آزمایش در کار جاری، در جدول 1 ذکر شده است. مطابق آنچه که در کار خلک و ویلیامسون [1] ذکر شده، پارامترهایی از قبیل نسبت جرمی و پارامتر جرم-میرایی می‌توانند منجربه نتایج متفاوتی در نوسان‌های عمود بر جریان استوانه گردد. به‌عنوان مثال، پارمتر نسبت جرمی کنترل کننده عرض ناحیه تحریک یا قفل‌شدگی است. حداکثر دامنه نوسان بدون بعد نیز به‌شدت تحت تاثیر پارامتر جرم-میرایی قرار دارد. به همین منظور، در کار حاضر سعی شده تا آزمایش‌هایی با بیشترین مشابهت برای کنترل نتایج به‌دست آمده مورد استفاده قرار گیرد.

"شکل 3" دامنه بدون بعد، برای نوسان‌های عمود بر جهت جریان، در تحقیق حاضر را با کارهای مشابه قبلی مقایسه نموده است. مقایسه انجام گرفته در این شکل، نشان‌دهنده همخوانی مناسب داده‌های به‌دست آمده از این تحقیق با محققین قبلی است. همچنان که از "شکل 3" بر می‌آید، نتایج به‌دست آمده، سه شاخه استاندارد شامل شاخه اولیه، شاخه بالایی و شاخه پایینی را دارا است که به تفصیل در کار خلک و ویلیامسون [1] به لزوم آن پرداخته شده است. همچنین سه شاخه ذکر شده و موقعیت آن‌ها در تطابق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]

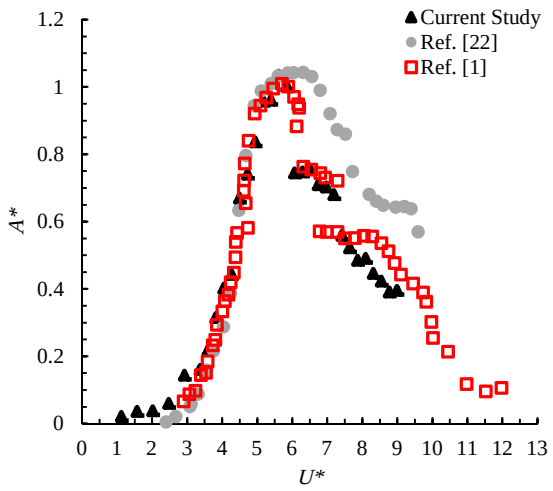

Fig. 3 Non-dimensional cross-flow oscillation amplitude vs. reduced velocity for the smooth (attached end-plated) cylinder in comparison with results from other researchers

شکل 3 مقدار دامنه بدون بعد در سرعت‌های کاهش یافته مختلف در استوانه مورد آزمایش (با ورق انتهایی) در مقایسه با نتایج دیگر محققین

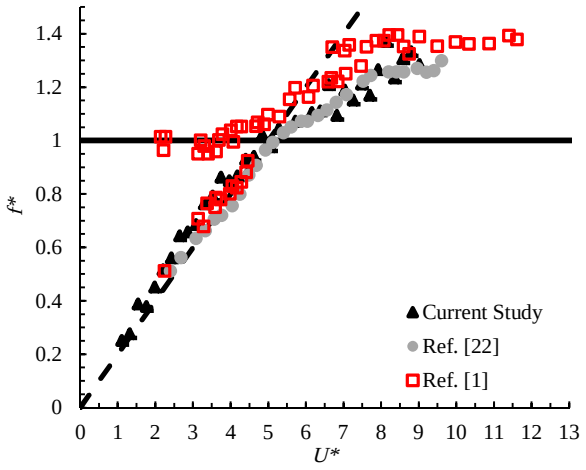

Fig. 4 Non-dimensional oscillation frequency vs. reduced velocity for the smooth (attached end-plated) cylinder in comparison with results from other researchers

شکل 4 مقدار بسامد بدون بعد در سرعت‌های کاهش یافته مختلف در استوانه مورد آزمایش (با ورق انتهایی) در مقایسه با نتایج دیگر محققین

مناسبی با دیگر تحقیق‌های ارائه شده است. بیشینه دامنه بدون بعد و عرض ناحیه قفل‌شدگی نیز با دقت بالایی با نتایج مشابه آن در کار خلک و ویلیامسون [1] همخوانی دارد. همچنان که پیشتر نیز ذکر شد، اختلاف‌های کوچک مشاهده شده در این شکل ناشی از تفاوت در برخی پارامترهای فیزیکی و روش آزمایش انجام شده است.

برای نمونه در آزمایش‌های مورد مقایسه در "شکل 3"، مقدار پارامتر جرم-میرایی و نسبت جرمی اندکی تفاوت دارند که منجر به این تفاوت‌های کوچک شده است. لازم به ذکر است که عوامل دیگری همچون روش مورد استفاده در آزمایش و نحوه تحلیل داده‌ها هم می‌تواند منجر به اختلاف‌هایی در نتایج آزمایش‌های مختلف شود.

براساس رابطه تجربی ارائه شده در سال 2008 توسط ویلیامسون و گوردهان [23]، با داشتن مشخصات فیزیکی یک آزمایش از قبیل نسبت جرمی نمونه و میرایی سیستم، می‌توان بیشینه دامنه بدون بعد برای نوسان‌های در جهت عمود بر جریان یک استوانه را به‌دست آورد. بر پایه روش ارائه شده در تحقیق ویلیامسون و گوردهان [23] و مشخصات آزمایش حاضر، دامنه بدون بعد مقداری برابر با 0.97 حاصل می‌شود که به‌صورت قابل قبولی یافته‌های به‌دست آمده در این آزمایش را تایید می‌کند.

"شکل 4" بسامد بدون بعد به‌دست آمده در استوانه با ورق انتهایی این آزمایش را برای سرعت‌های کاهش یافته مختلف با کارهای خلک و ویلیامسون [1] و فرانزینی و همکاران [22]، مقایسه کرده است. بسامد بدون بعد در حقیقت نسبت بسامد گردابه‌های پشت استوانه، با بسامد طبیعی سیستم است. در "شکل 4"، خط چین رسم شده، نشان‌دهنده خط استروهال 0.2 است که مقدار بسامد گردابه‌های رخ داده پشت یک استوانه ثابت و بدون ارتعاش را نشان می‌دهد. خط افقی پیوسته در این شکل نیز نشان‌دهنده مقدار بسامد طبیعی سیستم می‌باشد ($f^*=1$). مطابق نتایج "شکل 4"، در شاخه ابتدایی بسامد بدون بعد به‌دست آمده از کار خلک و ویلیامسون [1] هم در نزدیکی خط استروهال 0.2 و هم در نزدیکی خط $f^*=1$ رخ داده که در نتیجه غالب بودن بسامد طبیعی استوانه نوسانی بر نوسان‌های ناشی از گردابه است. در مقابل در کار فرانزینی و همکاران [22] و نتایج تحقیق حاضر، بسامد بدون بعد در شاخه ابتدایی در نزدیکی خط استروهال 0.2 به‌دست آمده است. این موضوع به روش متفاوت مورد استفاده در انجام آزمایش، برای هریک از این تحقیق‌ها بر می‌گردد.

در شاخه بالایی (ناحیه قفل‌شدگی) نتایج تحقیق حاضر و کار فرانزینی و همکاران [22] اندکی بالاتر از خط $f^*=1$ قرار گرفته است. نتایج بسامد بدون بعد به‌دست آمده از خلک و ویلیامسون [1] مقادیر بالاتری را در این ناحیه ارائه کرده است. برای سرعت‌های کاهش یافته بیشتر از 7 (شاخه پایینی)، بسامد بدون بعد در تحقیق حاضر از حدود 1 تا 1.3 افزایش یافته که در توافق با نتایج ارائه شده در مقاله فرانزینی و همکاران [22] می‌باشد. این افزایش در نتیجه افزایش جرم افزوده استوانه‌ها در این ناحیه می‌باشد.

مقایسه نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با داده‌های دیگر محققین، نشان می‌دهد که روش مورد استفاده در کار حاضر، روش مناسبی برای مشاهده مشخصات پدیده ارتعاش‌های ناشی از گردابه در یک استوانه قائم است. در ادامه به بررسی تاثیر ورق انتهایی بر الگوی ارتعاشی و پاسخ استوانه، پرداخته شده است.

3-2- بررسی اثر شرایط انتهای بر پاسخ استوانه

در این بخش، به بررسی شرایط انتهایی مختلف در استوانه مورد آزمایش پرداخته شده است. اثر شرایط انتهایی استوانه بر رفتار ارتعاشی آن، در این بخش، مطابق آنچه که در بخش روش آزمایش ذکر شد، با فرض استوانه‌ها در دو حالت با و بدون ورق انتهایی مورد آزمایش قرار گرفته است.

"شکل 5" مقایسه دامنه بدون بعد را برای استوانه‌های با و بدون ورق انتهایی نشان داده است. همچنان که در این شکل دیده می‌شود، حذف ورق انتهایی منجر به تغییرات قابل توجهی در الگوی پاسخ دامنه ارتعاشی استوانه شده است. در شاخه ابتدایی، استوانه در دوحالت با و بدون ورق انتهایی روند مشابهی با هم را طی نموده است. با این حال در استوانه بدون ورق انتهایی، شاخه ابتدایی در سرعت‌های کاهش یافته بالاتری رخ داده است. روند سعودی در این شاخه برای استوانه دارای ورق انتهایی از سرعت کاهش یافته 2 آغاز شده و تا حدود سرعت کاهش یافته 5 ادامه داشته است. در استوانه بدون ورق انتهایی، روند افزایشی پاسخ از سرعت کاهش یافته 3 شروع می‌شود و تا

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]

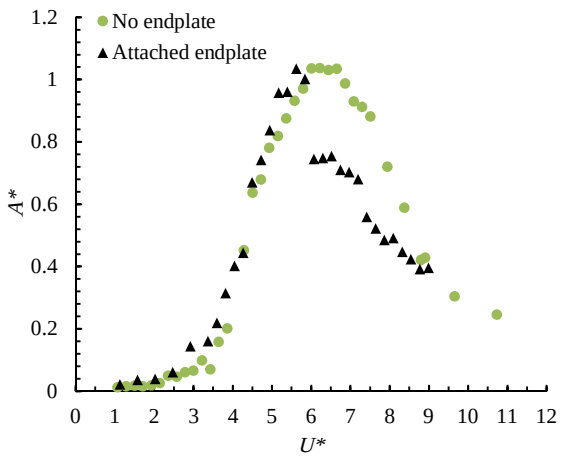

Fig. 5 Non-dimensional cross-flow oscillation amplitude vs. reduced velocity for the test with attached endplate in comparison with the test with no endplate

شکل 5 مقدار دامنه بدون بعد در سرعت‌های کاهش یافته مختلف در استوانه با ورق انتهایی در مقایسه با استوانه بدون ورق انتهایی

حدود سرعت کاهش یافته 5.5 ادامه یافته است. در ناحیه قفل‌شدگی، حداکثر پاسخ برای دامنه بدون بعد، در هر دو استوانه تقریبا برابر است. با این حال، در استوانه بدون ورق انتهایی محدوده تحریک شدگی سرعت‌های کاهش یافته بیشتری را شامل شده است. شاخه بالایی (ناحیه قفل‌شدگی) در استوانه بدون ورق انتهایی از سرعت کاهش یافته 5 تا 6 را پوشش می‌دهد در حالی که در استوانه بدون ورق انتهایی، ناحیه قفل‌شدگی محدوده سرعت‌های کاهش یافته 5.2 تا 7.5 را شامل می‌شود. همچنین، در استوانه دارای ورق انتهایی بیشینه دامنه در سرعت کاهش یافته 5.5 به‌دست آمده در حالی که با حذف ورق انتهایی این مقدار در سرعت کاهش یافته 6.5 به‌دست آمده است.

نکته دیگر این‌که با حذف ورق انتهایی، دامنه بدون بعد به‌صورت پیوسته کاهش یافته و هیچ مرز مشخصی بین شاخه بالایی و پایینی دیده نمی‌شود. همچنان که در "شکل 5" نیز دیده می‌شود، در استوانه با ورق انتهایی، با افزایش سرعت کاهش یافته، از سرعت کاهش یافته 6 به بعد، به وضوح مرز بین شاخه بالایی و شاخه پایینی پاسخ دامنه ارتعاشی استوانه قابل تشخیص می‌باشد. در استوانه بدون ورق انتهایی این تغییر از شاخه بالایی به شاخه پایینی به تدریج و به‌صورت پیوسته انجام شده، به گونه‌ای که مرز بین دوشاخه بالایی و پایینی قابل تشخیص نیست.

"شکل 6" بسامد بدون بعد را برای استوانه‌های با و بدون ورق انتهایی در مقابل سرعت کاهش یافته به نمایش گذاشته است. براساس نتایج "شکل 6" بسامد استوانه با ورق انتهایی بسیار نزدیک به خط استروهال 0.2 حرکت نموده است. در این حالت بسامد استوانه اندکی بالاتر از این خط به ثبت رسیده است. با نزدیک شدن به ناحیه قفل‌شدگی، برای استوانه با ورق انتهایی، بسامد ارتعاش‌های استوانه، با یک پله کوچک در سرعت‌های کاهش یافته 5 تا 6 روند افزایشی مجددی را تجربه نموده است. پس از آن، بسامد بدون بعد استوانه در شاخه پایینی دوباره به حدود 1.3 محدود می‌شود. در استوانه بدون ورق انتهایی روند تغییرات بسامد بدون بعد در مقابل سرعت‌های کاهش یافته، اندکی متفاوت به نظر می‌رسد. در این استوانه، برای شاخه پایینی، بسامد نوسان‌ها همچنان در محدوده خط استورهال 0.2 رشد یافته با این تفاوت که مقادیر به‌دست آمده اندکی پایین‌تر از این خط به ثبت رسیده‌اند. همچنین، در ناحیه قفل‌شدگی (سرعت‌های کاهش یافته 5.2 تا 7.5) بسامد

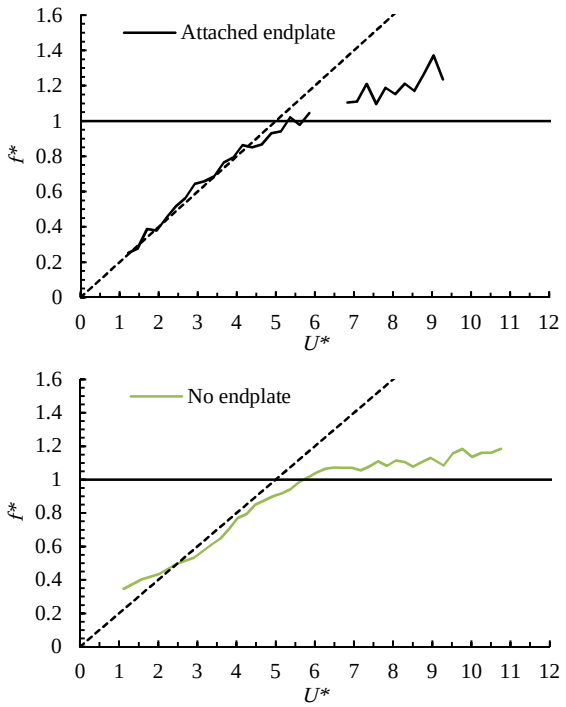

Fig. 6 Non-dimensional oscillation frequency vs. reduced velocity for the test with attached endplate in comparison with the test with no endplate

شکل 6 مقدار بسامد بدون بعد در سرعت‌های کاهش یافته مختلف در استوانه با ورق انتهایی در مقایسه با استوانه بدون ورق انتهایی

نوسان‌ها از خط استروهال 0.2 فاصله گرفته و در نزدیکی خط $f^*=1$ حرکت می‌کند. بسامد استوانه در سرعت‌های کاهش یافته متناسب با شاخه پایینی نیز با نوسان‌های کمتری و در حدود عدد 1.2 به‌دست آمده است.

درخصوص نتایج به‌دست آمده ممکن است تحلیل شود که درحالت استوانه با ورق انتهایی انتظار می‌رود که در انتهای استوانه، همبستگی گردابه-های بوجود آمده کمتر شود و در نتیجه آن نیروی‌های تولید شده به‌وسیله گردابه که استوانه را تحریک می‌کنند کاهش یابد. این امر می‌تواند کمتر شدن دامنه را نتیجه دهد. این نتیجه‌گیری به نظر، برخلاف یافته‌های این آزمایش در "شکل 5" است. بررسی سری زمانی نوسان‌های عمود بر جهت جریان استوانه به و بدون ورق انتهایی در "شکل 7" نشان داده شده است.

این تغییرات برای سه سرعت کاهش یافته 5.5، 7 و 9 ارائه شده‌اند. این سرعت‌ها به ترتیب متناسب با ابتدای محدوده قفل‌شدگی، ناحیه انتقالی از شاخه بالایی به شاخه پایینی و شاخه پایینی در استوانه بدون ورق انتهایی است. نتایج "شکل 7" نشان دهنده تغییرات قابل توجهی در دامنه استوانه با ورق انتهای در ناحیه انتقالی از شاخه بالایی به شاخه پایینی است (سرعت کاهش یافته 7). این موضوع در تحقیق سال 2008 مورس و همکاران [20] و کار خلک و ویلیامسون [4] در سال 1997 نیز دیده شده است. در این حالت، برای استوانه دارای ورق انتهایی، نوسان استوانه در ناحیه انتقال از شاخه بالایی به شاخه پایینی، پاسخ نوسانی در یک حالت انتقالی از شاخه بالایی به پایینی است که در بیشتر طول سری زمانی دامنه پاسخ در محدوده شاخه پایینی پاسخ می‌باشد. در سرعت کاهش یافته 9، با بیشتر شدن مقدار سرعت کاهش یافته، نوسان‌های عمود بر جریان در استوانه با ورق انتهایی، شکل پایدارتری از شاخه پایینی را در خود خواهد داشت [20]. با حذف ورق انتهایی، دامنه نوسان‌های استوانه ناحیه انتقالی از شاخه بالایی به شاخه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]

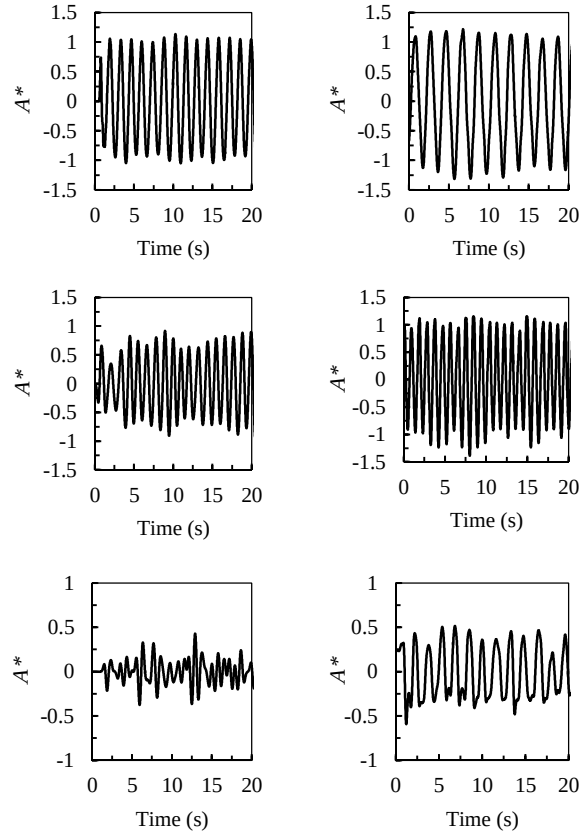

Fig. 7 Time series of the non-dimensional cross-flow displacement for the test with attached endplate (left) and the test with no end plate (right) in comparison with the test with no endplate at reduced speeds of 5.5, 7, and 9, respectively from top.

شکل 7 سری زمانی تغییرات دامنه بدون بعد در استوانه با ورق انتهایی (چپ) در مقایسه با استوانه بدون ورق انتهایی (راست) برای سرعت‌های کاهش یافته برابر با 5.5، 7 و 9، (به ترتیب از بالا).

پایینی (سرعت کاهش یافته 7)، بیشتر به سمت شاخه بالایی متمایل است. این نوسان‌ها به صورت پیوسته و با افزایش سرعت کاهش یافته، خود با شاخه پایینی منطبق می‌کند. همچنین در این حالت سری زمانی نوسان استوانه شکل پایدارتری را نشان داده است. در ناحیه قفل‌شدگی متناسب با سرعت کاهش یافته 5.5، هر دو استوانه روند مشابهی را در الگوی نوسانی عمود بر جریان نشان داده‌اند و مقدار بیشینه دامنه نوسان مشابهی را تجربه کرده‌اند.

"شکل 8" ضریب نیروی برآیی را در دوحالت با و بدون ورق انتهایی مقایسه نموده است. مقادیر ضریب نیروی برآیی، همانند آن‌چه که در دامنه بدون بعد استوانه‌ها ذکر شد، در دو استوانه روند متفاوتی را تجربه نموده است. براساس نتایج "شکل 8"، حذف ورق انتهایی منجر به کاهش بیشنه ضریب نیروی برآیی شده است. این موضوع می‌تواند به‌دلیل از بین رفتن همبستگی گردابه‌ها در طول استوانه بدون ورق انتهایی به‌دست آمده باشد. نکته قابل توجه دیگر افزایش ضریب نیروی برآیی در سرعت‌های کاهش یافته 5.5 تا 9 است که مطابق نتایج "شکل 5"، منجر به مقادیر بیشتر در دامنه بدون پاسخ نوسانی برای استوانه بدون ورق انتهایی شده است.

اختلاف فاز بین ضریب نیروی برآیی و نوسان‌های عمود بر جریان در استوانه با ورق انتهایی در "شکل 9" ارائه شده است. همچنین، نمودار تغییرات همزمان ضریب نیروی برآیی و نوسان‌های استوانه در فضای فازی در همین شکل نمایش داده شده است. مشابه آنچه که در کار خلک و ویلیامسون

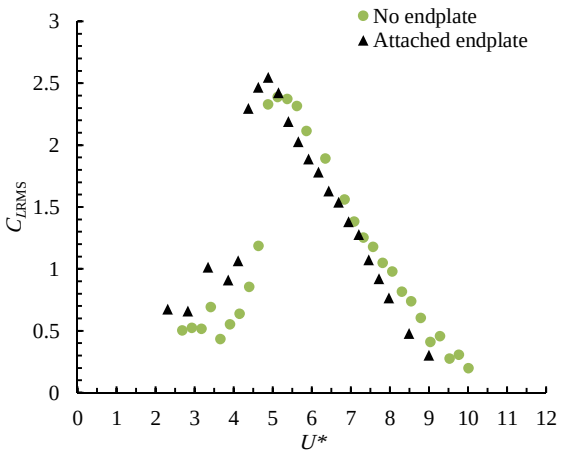

Fig. 8 Variation of the lift coefficient vs. reduced velocity for the cylinder with attached endplate and the cylinder with no endplate

شکل 8 تغییرات نیروی برآیی در مقابل سرعت کاهش یافته برای استوانه با ورق انتهایی در مقایسه با استوانه بدون ورق انتهایی

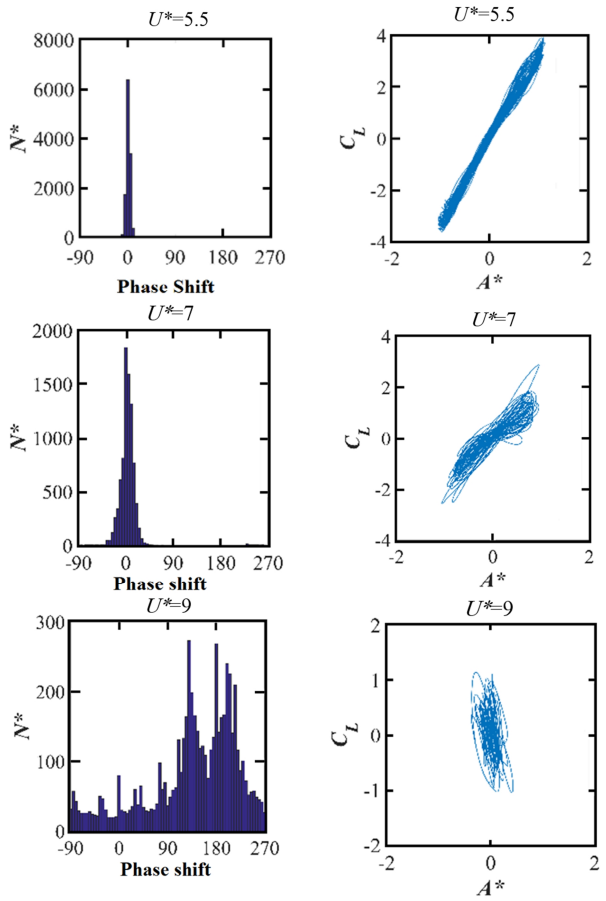

Fig. 9 Phase-plane of the lift coefficient and the cylinder displacement (right) and the phase shift histograms (left) for the cylinder with attached endplate at reduced speeds of 5.5, 7, and 9

شکل 9 نمودار ضریب نیروی برآیی و جابجایی در صفحه فازی (راست) نمودار هیستوگرام اختلاف فاز بین نیروی برآیی و جابجایی(چپ) برای استوانه با ورق انتهایی در سرعت‌های کاهش یافته 5.5، 7 و 9

[1] ارائه شده است، در ابتدای شاخه بالایی نوسان‌های عمود بر جریان در استوانه با ورق انتهایی با ضریب نیروی برآیی اعمال شده از گردابه‌های تشکیل شده بر استوانه، به‌صورت هم‌فاز بوده‌اند. اختلاف فاز به‌دست آمده در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]

محدوده عدد صفر و با بازه تغییرات 8 درجه حاصل شده است.

در ناحیه انتقالی از شاخه بالایی به شاخه پایینی (سرعت کاهش یافته 5.5)، اختلاف فاز بین نیرو و نوسان‌های استوانه بیشتر شده و نمودار جابجایی-نیرو به صورت مغشوش‌تری در آمده است. با این حال هنوز نواحی اول و سوم از نواحی محورهای مختصات را پوشش داده است.

در شاخه پایینی و در سرعت کاهش یافته 9، شیب نمودار نیرو جابجایی تغییر کرده و بیشتر نواحی دوم و چهارم از صفحه مختصات را پوشش داده است. همچنین اختلاف فاز بین نیروی برآیی و نوسان‌های عمود بر جریان در استوانه با ورق انتهایی از صفر به 180 درجه افزایش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده عدم هم‌فازی در این دو پاسخ می‌باشد و به شدت دامنه نوسان‌های استوانه را کاهش می‌دهد.

نتایج نمودار نیرو-جابجایی در صفحه فازی و نمودار اختلاف فاز بین نیروی سیال و جابجایی عمود بر جریان در استوانه بدون ورق انتهایی در "شکل 10" ارائه شده است. همچنان که در "شکل 10" ارائه شده است، اختلاف فاز بین ضریب نیروی برآیی و جابجایی استوانه بدون ورق انتهایی، در ناحیه قفل‌شدگی و متناسب با سرعت کاهش یافته 5.5، مشابه آنچه در استوانه با ورق انتهایی به‌دست آمد، می‌باشد. با این‌حال، در استوانه بدون ورق انتهایی در سرعت‌های کاهش یافته بالاتر (سرعت‌های کاهش یافته 7 و 9) با وجود بیشتر شدن اختلاف فاز بین ضریب نیروی برآیی و نوسان‌های عمود بر جریان، محدوده اختلاف فاز همچنان در حدود عدد صفر تغییر کرده است.

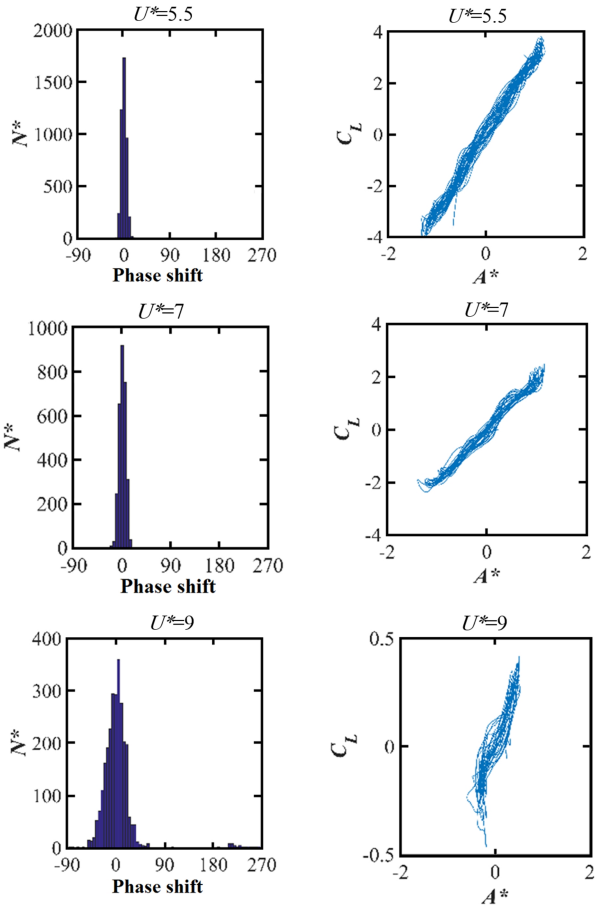

Fig. 10 Phase-plane of the lift coefficient and the cylinder displacement (right) and the phase shift histograms (left) for the cylinder with no endplate at reduced speeds of 5.5, 7, and 9

شکل 10 نمودار ضریب نیروی برآیی و جابجایی در صفحه فازی (راست) نمودار هیستوگرام اختلاف فاز بین نیروی برآیی و جابجایی (چپ) برای استوانه بدون ورق انتهایی در سرعت‌های کاهش‌یافته 5.5، 7 و 9

در استوانه بدون ورق انتهایی، شیب نمودار نیرو-جابجایی همچنان مثبت بوده و نمودار در نواحی شماره 1 و 3 از صفحه مختصات باقی مانده است. این موضوع می‌تواند دلیلی بر کاهش کمتر دامنه بدون بعد نوسان در استوانه بدون ورق انتهایی باشد.

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این نوشتار به بررسی آزمایشگاهی اثر شرایط انتهایی بر پاسخ‌های یک استوانه قائم نوسان‌کننده در معرض جریان پرداخته شده است. برای این منظور استوانه مورد بررسی در یک حوضچه کشش برای دو حالت با و بدون ورق انتهایی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن با هم مقایسه شده است.

براساس یافته‌های این تحقیق، الصاق ورق انتهایی به استوانه قائم، منجر به تغییرات قابل توجهی در مقدار دامنه نوسان بدون بعد عمود بر جریان در استوانه مورد آزمایش شده است.

در حالتی که ورق انتهایی حذف شده، استوانه در بازه بزرگتری از سرعت‌های کاهش یافته تحت تحریک ارتعاش‌های ناشی از گردابه قرار گرفته و عملا شاخه پایین در پاسخ دامنه بدون بعد، حذف شده است. در این حالت استوانه بدون ورق انتهایی در شاخه بالایی و شاخه پایینی، مقادیر بیشتری را برای پاسخ دامنه بدون بعد، نتیجه داده است. تنها تشابه موجود در حداکثر دامنه ارتعاش‌های عمود بر جریان برای هر دو حالت بوده است. همچنین در حالتی که از ورق انتهایی استفاده نشده، نمودار نوسان بدون بعد، به سمت سرعت‌های کاهش یافته با مقادیر بیشتر جابجا شده است. این موضوع با توجه به فرض افزایش آشفتگی در انتهای استوانه، پس از حذف ورق انتهایی قابل توجه است. با حذف ورق انتهایی، دامنه بدون بعد ارتعاش، با افزایش سرعت کاهش یافته، به‌صورت پیوسته کاهش می‌یابد و هیچ‌گونه پرشی از شاخه بالایی به شاخه پایینی مشاهده نمی‌شود. همچنین، بسامدهای استوانه نیز در حالتی که ورق از انتهای استوانه حذف شده، مقادیر کمتری را تجربه نموده‌اند.

بررسی ضریب نیروی برآیی در هر دو حالت، تایید کننده روند ذکر شده در خصوص دامنه بدون بعد استوانه است. در این حالت در ناحیه قفل‌شدگی و پس از آن در ناحیه انتقالی از شاخه بالایی به شاخه پایینی، مقادیر ثبت شده ضریب نیروی برآیی در استوانه بدون ورق انتهایی متفاوت با استوانه با ورق انتهایی بوده است.

مقدار اختلاف فاز بین ضریب نیروی برآیی و نوسان های عمود بر جریان در استوانه با ورق انتهایی در شاخه پایینی از صفر به مقدار 180 درجه افزایش یافته، در حالی که در استوانه بدون ورق انتهایی بازه تغییرات اختلاف فاز بین ضریب نیروی برآیی و جابجایی عمود بر جریان همچنان در محدوده عدد صفر و تنها با پراکندگی بیشتر باقی مانده است.

به‌طور کلی از نتایج این بررسی چنین برمی‌آید که تغییر شرایط انتهایی در استوانه‌های با نسبت طولی محدود، منجر به الگوی متفاوتی در پاسخ ارتعاشی و نیروهای وارد شونده از سمت سیال بر استوانه خواهد شد. این امر با افزایش تحریک سازه و بازه بزرگتری از محدوده قفل‌شدگی در استوانه ارتجاعی به‌وسیله نیروهای حاصل از جریان همراه خواهد بود. این موضوع می‌بایست در بررسی‌های آزمایشگاهی، توسط محققینی که به این موضوع می‌پردازند، مورد توجه قرار گیرد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]

5- فهرست علایم

A^* دامنه بدون بعد

$C_{L\,\mathrm{RMS}}$ میانگین مربعات ضریب نیروی برآیی

f^* بسامد بدون بعد

U^* سرعت کاهش یافته

N^* تواتر رخداد

6- تقدیر و تشکر

نگارندگان این نوشتار بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری و راهنمایی‌های ارزشمند آقای دکتر سیف مسئول آزمایشگاه دریا، در دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف و همکاران ایشان در آن آزمایشگاه تقدیر و تشکر نمایند.

7- مراجع

[1] A. Khalak, C. H. K. Williamson, Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping, *Journal of fluids and Structures*, Vol. 13, No. 7, pp. 813-851, 1999.

[2] M. Branković, P. W. Bearman, Measurements of transverse forces on circular cylinders undergoing vortex-induced vibration, *Journal of fluids and structures*, Vol. 22, No. 6, pp. 829-836, 2006.

[3] R. Govardhan, C. H. K. Williamson, Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 420, No. 1, pp. 85-130, 2000.

[4] A. Khalak, C. H. K. Williamson, Investigation of relative effects of mass and damping in vortex-induced vibration of a circular cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69, No. 5, pp.341-350, 1997.

[5] R. D. Blevins, *Flow-induced vibration*, Second Edittion, pp. 1-5, New York: Krieger Publishing Company , 1991.

[6] P.W. Bearman, Vortex shedding from oscillating bluff bodies, *Annual Review Fluid Mechanics*, Vol. 16, No. 1, pp. 195, 1984.

[7] C. H. K. Williamson, A. Roshko, Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder, *Journal of fluids and structures*, Vol. 2, No. 4, pp. 355-381, 1988.

[8] A. Slaouti, J. H. Gerrard, An experimental investigation of the end effects on the wake of a circular cylinder towed through water at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 112, No.1, pp. 297-314, 1981.

[9] A. Prasad, C. H. K. Williamson, Three-dimensional effects in turbulent bluff-body wakes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 343, No. 1, pp. 235-265, 1997.

[10] S. Szepessy, P. W. Bearman, Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 234, No. 1, pp. 191-217, 1992.

[11] F. S. Hover, J. T. Davis, M. S. Triantafyllou, Three-dimensionality of mode transition in vortex-induced vibrations of a circular cylinder, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 23, No. 1, pp. 29-40, 2004.

[12] F. S. Hover, A. H. Techet, M. S. Triantafyllou, Forces on oscillating uniform and tapered cylinders in cross flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 363, No. 1, pp. 97-114, 1998.

[13] J. C. Owen, P. W. Bearman, A. A. Szewczyk, Passive control of VIV with drag reduction, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15, No. 3, pp. 597-605, 2001.

[14] T. Sarpkaya, Hydrodynamic damping, flow-induced oscillations, and biharmonic response, *Journal of offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 117, No. 4, pp. 232-238, 1995.

[15] N. Jauvtis, C. H. K. Williamson, The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration at low mass and damping. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 509, No. 1, pp. 23-62, 2004.

[16] J. T. Klamo, A. Leonard, A. Roshko, On the maximum amplitude for a freely vibrating cylinder in cross-flow, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 21, No. 4, pp. 429-434, 2005.

[17] S. M. Ai, P. L. Sun, J. Chen, Vortex Induced Vibration Numerical Simulation of a Spring-Mounted Cylinder in Current, *Advanced Materials Research*, Vol. 368, No. 3, pp. 1355-1358, 2012.

[18] G. R. S. Assi, J. R. Meneghini, J. A. P. Aranha, P. W. Bearman, E. Casaprima, Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 22, No. 6, pp. 819-827, 2006.

[19] M. Zeinoddini, V. Tamimi, A. Bakhtiari, WIV response of tapered circular cylinders in a tandem arrangement: An experimental study, *Applied Ocean Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 162-173, 2014.

[20] T. L. Morse, R. N. Govardhan, C. H. K. Williamson, The effect of end conditions on the vortex-induced vibration of cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 24, No. 8, pp. 1227-1239, 2008.

[21] P. K. Stansby, The effects of end plates on the base pressure coefficient of a circular cylinder, *Aeronautical Journal*, Vol. 78, No. 1, pp. 36, 1974.

[22] G. R. Franzini, R. T. Gonçalves, J. R. Meneghini, A. L. C. Fujarra, One and two degrees-of-freedom Vortex-Induced Vibration experiments with yawed cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 42, No. 2, pp. 401–42, 2013.

[23] C. H. K. Williamson, R. Govardhan, A brief review of recent results in vortex-induced vibrations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 6, pp. 713-735, 2008.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.22.3]