Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 46, No. 1, Spring 2023, p. 95-110

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

The effect of distance in flow induced vibration on power conversion caused by the oscillations of two tandem cylinders

V. Atashi[1], M. Ghomeshi[2*], S. M. Sajadi[3] and M. Bernitsas[4]

1- Ph.D. in water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz,Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz,Iran.(m.ghomeshi@yahoo.com).*
3- Assistant Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz,
4- Professor, Naval Architecture and Marine Engineering Faculty, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 31 December 2020
Revised: 12 June 2021
Accepted: 14 June 2021

Keywords:
Vortex Induced Vibrations, galloping instability, harnessed power.

TO CITE THIS ARTICLE:

Atashi, V., Ghomeshi, M., Sajjadi, S. M., Bernitsas, M. (2023). 'The effect of distance in flow induced vibration on power conversion caused by the oscillations of two tandem cylinders', Irrigation Sciences and Engineering, 46(1), pp. 95-110. doi: 10.22055/jise.2017.20430.1476.

Introduction

Flow-induced vibrations (FIVs) are a type of vibration that is caused by the interaction of a structure with a fluid flow. FIVs can occur in a variety of structures, including bridges, buildings, and offshore structures. In the case of tandem cylinders, FIVs can be caused by the interaction of the two cylinders with the fluid flow.

FIVs are suppressed because of their destructive nature. MRElab managed to convert the kinetic energy of water flows into electricity by enhancing FIV (Bernitsas, 2016; Bernitsas et al., 2008). In MRElab, Flow Induced Vibrations (FIV) are studied to convert marine hydrokinetic energy, from oceans, tidal and rivers to electricity using the VIVACE energy harvester. Vortex Induced Vibrations for Aquatic Clean Energy Converter is probably the closest to commercialization because it has suffered extensive laboratory testing and many field deployments since its introduction in 2006. The objective of the Marine Renewable Energy Lab (MRELab) is to investigate FIV of single and multiple cylinders and find different ways to enhance FIV to design VIVACE Converters and optimize the power output for various flow velocities. Vortex-induced vibration (VIV) to a cylinder has been studied experimentally (Alam et al., 2003; Park, 2012) and numerically (Ding et al., 2013; Kim et al., 2021) by researchers in order to eliminate or at least regulate this unsteady fluid-structure interaction phenomenon since it has been identified as the cause for many structural failures. But it is challenging, and it is still being debated due to the complexity of the interaction between body dynamics and fluid dynamics. The two cylinders arrangement has been studied in many types of research as the simplest arrangement. In this research, both cylinders can oscillate which has not been done very often in previous papers up to now. Moreover, most of the previous experiments on VIV were conducted in TrSL2 regime which fluctuating lift coefficient rises as the Re increases. But in this research, experiments placed in TrSL3 that shear layer becomes fully turbulent, and the fluctuating lift coefficient of a smooth cylinder reaches its maximum value.

Methodology

An experiment was conducted to study the flow-induced vibrations (FIVs) of two tandem cylinders in a fluid flow. The experiment was conducted in the LTFSW Channel of the Marine Renewable Energy Laboratory (MRElab) at the University of Michigan. The channel has the potential to re-circulate about 37,854 liters of water at a speed up to 1.4 m/s by an impeller powered by a 20hp induction motor. The test section is 2.44 m long, 1 m wide and 1.52 m deep and made of transparent flex-glass, thus allowing for visualization of the VIV and galloping characteristics. The stoppers were installed to keep safe the bottom flex-glass of the test section from breaking by the cylinder impact.

Two PTC circular cylinders of diameter D = 0.0889m and length L = 0.914m were utilized for these experiments. The test cylinders were mounted on two linear end springs and the cylinder motion was allowed in the cross-flow direction only. In this study, center to center distance between two cylinders is between 1.57D and 2.57D. Specific design of the two single-cylinder Converter modules is listed in Table 1. The added mass inclusion through a constant added mass coefficient (from potential theory) is still debated. In this study, it is accepted that added mass coefficient is equal to 1. It also has a power take-off (PTO) system consisting of a heat bank for dissipation of the generated energy. The excitation comes from the fluid-structure interaction (FSI) and is applied to the cylinders throughout the forces imparted by the motion of the fluid.

Findings

The hydrodynamic interaction between the cylinders can have a significant impact on the FIVs. Hydrodynamic interaction can lead to the formation of vortices that can excite the vibrations of the cylinders. The nonlinear nature of VIV and galloping can also contribute to the drops and jumps in harnessed power.

The effects of damping and stiffness can also affect the FIVs. In general, increasing the damping or stiffness of the cylinders will tend to suppress the vibrations. However, there is an optimal level of damping and stiffness that will maximize the power output of the FIVs.

The findings of this study provide new insights into the hydrodynamic interaction between multiple cylinders in tandem and can be used to improve the design and performance of VIVACE Converters and other FIM-based energy harvesters. In addition to the factors mentioned above, it is also important to consider the following factors that may affect the FIVs of tandem cylinders:

- The shape of the cylinders: The shape of the cylinders can have a significant impact on the FIVs. In general, cylinders with a larger cross-section will be more susceptible to FIVs.
- The surface roughness of the cylinders: The surface roughness of the cylinders can also affect the FIVs. In general, cylinders with a rougher surface will be more susceptible to FIVs.
- The presence of other objects in the flow field: The presence of other objects in the flow field can also affect the FIVs. In general, cylinders that are in close proximity to other objects will be more susceptible to FIVs.

The study of FIVs of tandem cylinders is a complex and challenging problem, but it is an important one for the design of efficient and reliable FIM-based energy harvesters. The study found that the cylinders go up and down out of phase before a drop occurs, and they don't affect each other negatively. However, at the drop point, the cylinders move approximately in phase, and the upstream cylinder affects the downstream cylinder negatively. This interaction causes the galloping instability to disappear, and the harnessed power decreases sharply. The study concludes that there is a firm interaction between cylinders, and this interaction can cause the galloping instability to disappear and the harnessed power to decrease sharply.

Acknowledgements

This article has been prepared from the results of the MSc. thesis of the first author and with the support of the university's research unit through the second author's Grant (95/3/02/31400) and using

experimental facilities of Marine Renewable Energy Laboratory (MRELab) at the University of Michigan by which the authors thank and appreciate the university's vice chancellor for research. We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support In addition, the spiritual support of the scientific center "Improvement and maintenance of irrigation and drainage networks" is thanked and appreciated.

References

1- Alam, M.M., Moriya, M., Takai, K. and Sakamoto, H., 2003. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *91*(1-2), pp.139-154.

2- Bernitsas, M.M., 2016. Harvesting energy by flow included motions. *Springer handbook of ocean engineering*, pp.1163-1244.

3- Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. (2008). VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130(4).

4- Ding, L., Bernitsas, M.M. and Kim, E.S., 2013. 2-D URANS vs. experiments of flow induced motions of two circular cylinders in tandem with passive turbulence control for 30,000< Re< 105,000. *Ocean Engineering*, *72*, pp.429-440.

5- Kim, G.Y., Lim, C., Kim, E.S. and Shin, S.C., 2021. Prediction of Dynamic Responses of Flow-Induced Vibration Using Deep Learning. *Applied Sciences*, *11*(15), p.7163.

6- Park H. *Mapping of passive turbulence control to flow induced motions of circular cylinders* (Doctoral dissertation, University of Michigan).

© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٦، شماره‌ی۱، بهار ۱٤۰۲، مقاله پژوهشی، ص. ۱۱۰-۹۵

تأثیر فاصله بر توان مهار شده حاصل از نوسانات دو سیلندر با آرایش پشت سرهم

ویدا آتشی[۱]، مهدی قمشی[۲*]، سید محسن سجادی[۳] و مایکل برنیتساس[۴]

۱- دانش آموخته دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.m.ghomeshi@yahoo.com

۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استاد گروه معماری دریایی و مهندسی دریا، دانشکده مهندسی دانشگاه میشیگان.

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

چکیده

در این مقاله اثر فاصله‌ی دو سیلندر زبر دایره‌ای پشت سر هم بر حرکت ناشی از جریان بررسی شده است. حرکت ناشی از جریان، پدیده‌ی است که در سازه‌های مختلف در جریان‌های پایدار مانند مبدل‌های حرارتی، پل‌ها، ساختمان‌ها و سازه‌های دریایی رخ می‌دهد. ارتعاش ناشی از گردابه‌ها و گالوپینگ رایج‌ترین پدیده‌ها در حرکت ناشی از جریان هستند که در دستگاه مبدل گردابه به‌دلیل اثر متقابل لایه‌ی برشی و کفاب سیلندر بالادست رخ می‌دهد. برای نیل به این هدف، توان مهار شده برای سیلندر بالادست، پایین‌دست و مجموع انرژی استخراج گردیده است. معمولاً با افزایش سرعت مقدار توان مهار شده در منطقه‌ی گالوپینگ افزایش می‌یابد، اما برخلاف انتظار در محدوده‌ی سرعت‌های بین ۱.۳>U>۰.۹ متر در ثانیه، یک افت یا یک پرش ناگهانی درمقدار توان مهار شده دیده می‌شود. هدف این مقاله، یافتن دلیل حضور این تغییرات و ارتباط آن با فاصله‌ی بین دو سیلندر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، افزایش فاصله‌ی دو سیلندر بر الگوی جریان بین دو سیلندر و درنتیجه افت‌ها و پرش‌ها موثر است.

کلید واژه‌ها: سیلندر پشت سرهم، توان مهار شده، ارتعاش ناشی از گردابه‌ها، گالوپینگ.

مقدمه

از دیرباز بشر دریافت با وزش باد روی سیم‌های سازهای موسیقی می‌توان باعث لرزش سیم‌ها و تولید صدا شد. لئوناردو داوینچی نقاش قرن ۱۵ میلادی طرحی از یک ردیف منظم از گردابه حول جسم یک انسان در یک رودخانه کشیده است. مطالعه‌های عددی و آزمایشگاهی انجام شده در مورد این پدیده بسیار گسترده‌تر از آن است که بتوان در این فرصت محدود به تمامی آن‌ها اشاره نمود. به‌منظور اطلاعات بیشتر در این زمینه به مقالات مروری توسط محققینی مانند Bearman (1984)؛ Parkinson (1989)؛ Williamson (1996)؛ Govardhan و Williamson (2006) و Govardhan و Williamson (2004) ارجاع داده می‌شود. حرکت ناشی از جریان (FIM) یک پدیده است که اغلب در سازه‌های بلند و باریک که در معرض جریان عرضی هستند، رخ می‌دهد. پدیده‌ی ارتعاش ناشی از گردابه‌ها ((vortex induced vibration (VIV)، رایج‌ترین پدیده در حرکت ناشی از جریان است که البته اولین بار در سال ۱۵۰۴ توسط لئوناردو داوینچی ارائه داده شد و فرمول ریاضی آن توسط استروهال در سال ۱۸۷۸ ارائه گردید. وقتی یک سیلندر الاستیک دایره‌ای نصب شده در معرض جریان یکنواخت عرضی قرار بگیرد، گردابه‌ها، نیروهای نوسانی بر سیلندر اعمال کرده که نتیجه‌ی آن ارتعاش ناشی از گردابه‌ها می‌باشد. مشخصه‌ی ارتعاش ناشی از گردابه‌ها تشدید می‌باشد به این معنی که در محدوده‌ی همگام سازی (synchronization)، فرکانس جریان گردابه‌ها با فرکانس نوسانات سیلندر تقریبا برابر شده و حرکات بزرگ سیلندر مشاهده می‌شود (Govardhan and Williamson, 2000).

مطالعه‌های کاملی در خصوص ارتعاش ناشی از گردابه‌ها در مقالات Bearman (1984 & 2011)، Sarpkaya (2004) و Williamson و Govardhan (2004) انجام شده است. گالوپینگ (Galloping) شکل دیگری از حرکت ناشی از جریان می‌باشد که از لحاظ هیدرودینامیکی- آیرودینامیکی ناپایدار بوده و در فرکانس کم‌تر و دامنه‌ی بیشتری نسبت به ارتعاش ناشی از گردابه‌ها رخ می‌دهد. این پدیده عمود بر جریان بوده و نسبت به ارتعاش ناشی از گردابه‌ها مخرب‌تر می‌باشد ولی پیچیدگی‌های ارتعاش ناشی از گردابه‌ها را ندارد. گالوپینگ حاصل از کوپل نیروی بین نیروهای وارد بر سیال و نوسان ناشی از بدنه‌ی غوطه‌ور است. به طور معمول، با افزایش سرعت جریان ابتدا ارتعاش ناشی از گردابه‌ها ظاهر شده و به دنبال آن گالوپینگ مشاهده می‌شود. همان طور که مشهود است، دامنه‌ی نوسانات قبل از شروع گالوپینگ

نزدیک به صفر می‌باشد. در سرعت‌های بالاتر، بسته به انحراف هندسی سیلندر از سطح مقطع دایره‌ای ممکن است گالوپینگ حاصل شود (Blevins and Vibration, 1990 & Chang et al., 2011) هدف از این تحقیق، بررسی تغییرات در مقدار توان مهار شده در منطقه‌ی گالوپینگ برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم می‌باشد.

ارتعاش ناشی از گردابه‌ها برای یک سیلندر، به دلیل پیچیدگی دینامیک آن، برای دهه‌ها مورد مطالعه بوده و هنوز هم موضوع بحث بسیاری از مقالات Sarpkaya (2004) و Williamson و Govardhan (2004) می‌باشد. تداخل جریان در یک گروه سیلندر، موضوع بسیاری از مطالعه‌های در گذشته با توجه به کاربرد عملی در زمینه‌های مهندسی شده است. سیستم دو سیلندری بیشترین مورد مطالعه را در بین چند سیلندری‌ها به‌دلیل آرایش ساده‌ی آن داشته است. دو سیلندر می‌توانند به‌صورت کنار هم (Side by side)، پشت سرهم (Tandem) و یا زیگزاگی (staggered) در کنار هم قرار بگیرند (شکل ۱). اثر متقابل بین سیلندرها به آرایش بین سیلندرها، خصوصیات جریان و عدد رینالدز بستگی دارد. بر طبق تحقیقات Zdravkovich (1977, 1985 & 1987)، سه نوع اثر متقابل بین دو سیلندر می‌تواند وجود داشته باشد (شکل ۲):

۱- اثر متقابل نزدیک: زمانی رخ می‌دهد که سیلندرها به یکدیگر نزدیک باشند.

۲- اثر متقابل کفاب: زمانی رخ می‌دهد که یک سیلندر در کفاب سیلندر دیگر قرار گیرد.

۳- بدون اثر متقابل: زمانی رخ می‌دهد که سیلندرها به اندازه‌ی کافی از هم دور باشند که دینامیک جریان آن‌ها از یکدیگر مستقل باشد.

تحقیقات پیشین روی یک گروه سیلندر عمدتاً در جهت محافظت از تخریب اجسام در مقابل ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها انجام شده بود. در این راستا، محققین یکی از موثرترین روش‌های کنترل ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها، استفاده از سیلندر کنترلی (ثانویه) می‌دانستند. Strykowski و Sreenivasan (1990) با

بهره‌گیری از قرار دادن یک سیلندر کنترلی با قطر کوچک‌تر از سیلندر اصلی در ناحیه ایجاد گردابه‌ها، توانستند تا حدود زیادی تشکیل گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی را به تعویق انداخته و از میزان نیروی درگ و لیفت وارد شده بر آن بکاهند.

Abeele و Voorde (2010) به بررسی تأثیر قرار گرفتن دو سیلندر پشت سر هم که به‌صورت ثابت قرار داشتند، بر تشکیل گردابه‌ها و ضریب درگ در پشت سیلندرها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که قطر سیلندر قرار گرفته در پشت سیلندر جلویی بر خطوط جریان و گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی تأثیرگذار است. همچنین ضریب درگ روی سیلندر قرار گرفته در عقب کمتر از سیلندر قرار گرفته در جلوی آن است.

از حدود هفت سال پیش تحقیقاتی انجام شد که برخلاف تحقیقات گذشته، منجر به استحصال انرژی حاصل از ارتعاشات ناشی گردابه‌ها می‌شد. نخستین بار Bernitsas استاد دانشگاه میشیگان، در سال ۲۰۰۵ میلادی، چنین ایده ای را مطرح کرد. (Bernitsas & Raghavan, 2005) از آن زمان تاکنون نیز این دانشگاه مرکز اصلی تحقیقات روی این موضوع بوده است. تمرکز محققان آزمایشگاه دریایی انرژی‌های نو در دانشگاه میشیگان روی حرکت نوسانی استوانه‌ی افقی در جهت قائم، در اثر گردابه‌های ناشی از حرکت جریان سیال می باشد. در این آزمایشگاه، مدل آزمایشگاهی مذکور در سال ۲۰۰۵ ساخته شده است و مورد آزمایش‌های متعددی تا به‌حال قرار گرفته است و در ادامه، تأثیر سختی فنر و میرایی دستگاه و تأثیر زبری سطح استوانه به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده اند.

نمونه‌ی اولیه‌ی این دستگاه در آزمایشگاه تنها استوانه‌ای براق است که به تعدادی فنر متصل می‌باشد. این استوانه به‌صورت افقی مقابل جریان آب و در داخل مخزنی به اندازه‌ی یک تراکتور در آزمایشگاه انرژی تجدید پذیر دریایی برنیتساس قرار گرفته است. آب در داخل مخزن با سرعت ۱/۵ گره جریان می‌یابد. نحوه‌ی عملکرد "دستگاه مبدل انرژی ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها به انرژی پاک" از عبارت "مبدل گردابه" بدین صورت است: حضور استوانه در مقابل جریان آب موجب ایجاد گرداب‌های متناوب می‌شود که در بالا و پایین استوانه شکل می‌گیرند. این گرداب‌ها استوانه را روی فنرها به بالا و پایین حرکت می‌دهند و انرژی مکانیکی ایجاد می‌کنند. سپس، دستگاه، انرژی مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می‌کند (شکل ۳).Igarashi (1981) و Ljungkrona et al (1991) تأثیر عدد رینالدز را بر الگوی جریان بین دو سیلندر ثابت با آرایش پشت سرهم و در فاصله‌ی بحرانی که در آن یک پرش ناپیوسته در اندازه‌گیری نیرو یا فشار بر سیلندر پایین دست رخ می‌دهد، به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. این ناپیوستگی به‌وسیله‌ی بسیاری از محققان مشاهده شده است (Zdravkovich, 1977؛ Igarashi, 1981؛ Alam et al & 2003b Alam et al., 2003a). همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، الگوی جریان بین دو سیلندر ثابت پشت سر هم بستگی به عدد رینالدز و فاصله‌ی طولی آنها دارد اما این رژیم در ناحیه‌ی عدد رینالدز Re>۳۵۰۰۰ فقط مقدار اندکی تحت تأثیر عدد رینالدز می‌باشد. فاصله‌ی بحرانی نیز به تغییرات عدد رینالدز حساس بوده و روند آن با توجه به وابستگی عدد رینالدز به طول شکل‌گیری گردابه‌ی حاصل از یک سیلندر تنها پیروی می-کند.

با افزایش فاصله‌ی طولی دامنه‌ی نوسانات کاهش پیدا می‌کند چرا که با افزایش فاصله گردابه‌ها از سیلندر بالادست بیشتر پراکنده می‌شوند (Assi et al., 2010). به‌علاوه، Laneville و Brika (1999) نتوانستند تغییر متناوب در واکنش دامنه برای سیلندر پایین‌دست را مشاهده کنند، این در حالی است که واکنش دامنه‌ی

DOI: 10.22055/JISE.2017.20430.1476

ارتعاش ناشی از گردابه‌ها برای تک سیلندر مشاهده شد. نتایج آنها نشان داد که همگام‌سازی برای دو سیلندر در سرعت کاهشی بالاتری نسبت به تک سیلندر شروع می شود و منطقه‌ی همگام-سازی بسیار طولانی‌تر و با دامنه‌ی بزرگتر است. یافته‌ی جالب توجه Laneville و Brika (1999) این بود که کفاب سیلندر بالادست واکنش سیلندر پایین‌دست را برای فاصله‌ی طولی ۲۵ هم تحت تأثیر قرار می‌دهد، حتی با اینکه این آزمایش در تونل باد انجام گرفت. یافته‌های آن‌ها معمولاً در مطالعه‌های دیگران نیز مشاهده شد. مکانیزم نوسانات سیلندر پایین‌دست به دلیل پیچیدگی‌های ساختار جریان بین دو سیلندر همواره مورد بحث بوده است. ساختار جریان به عدد رینالدز و فاصله‌ی بین دو سیلندر و همچنین تغییرات مداومی که در اثر جابجایی سیلندر پایین‌دست در حال نوسان رخ می‌دهد، وابسته است.

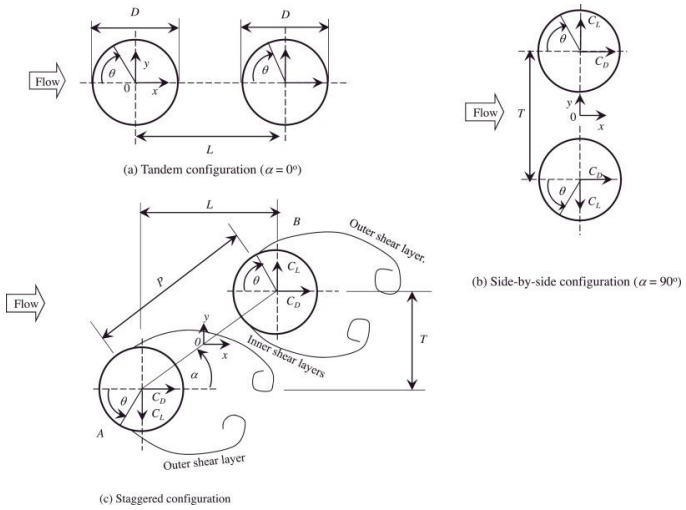
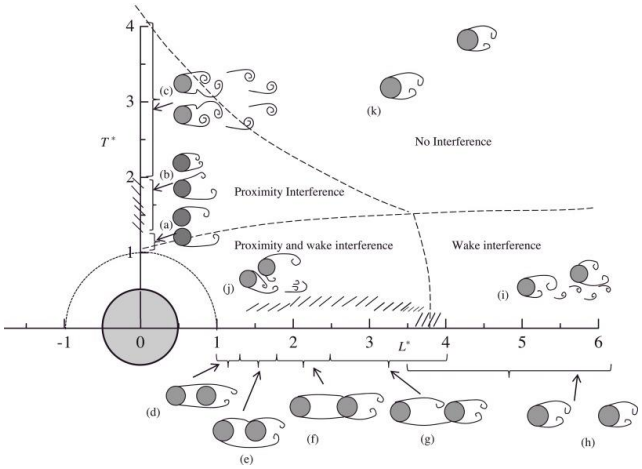


Fig. 1- Arrangement of circular cylinders in cross-flow: (a) tandem, (b) side-by-side, and (c) staggered (Zdravkovich (1987)

شکل ۱- دسته بندی اثر متقابل رژیم‌های جریان (منتشر شده توسط Zdravkovich, 1987)



شکل ۲- دسته بندی اثر متقابل رژیم‌های جریان (منتشر شده توسط Zdravkovich, 1987)

Fig. 2- Flow-induced vibration experimental setup. Shaded areas indicate bistable flow regions. Modified from Zdravkovich (1987).

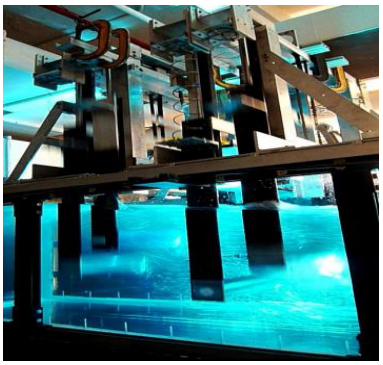


Fig. 3- Vortex Hydro Energy completed the first 4-cylinder VIVACE converter- University of Michigan

شکل ۳- دستگاه مبدل گردابه دانشگاه میشیگان

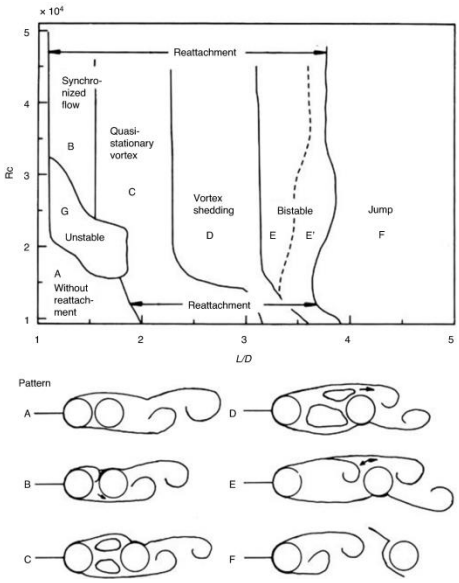


Fig. 4- Classification of flow patterns for two tandem circular cylinders in cross-flow, as a function of the longitudinal center-to-center pitch ratio and Reynolds number

شکل ٤- طبقه‌بندی الگوی جریان برای دو سیلندر استوانه‌ای پشت سرهم در مقطع عرضی به صورت تابعی از L/D نسبت فاصله‌ی طولی مرکز به مرکز دو سیلندر و عدد رینالدز

Assi et al., (2010) آزمایش‌هایی برای بررسی ساز و کار ارتعاش ناشی از کفاب (WIV) سیلندر پایین‌دست در کفاب یک سیلندر ثابت انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که دامنه‌ی نوسانات همچنان به افزایش ادامه خواهد داد حتی اگر فرکانس نوسانات بیش از فرکانس طبیعی سیستم شود. علاوه بر این، با از بین بردن جریان گردابه‌های بالادست با استفاده از صفحات و آرام کننده‌های جریان، آن‌ها اثر گردابه‌ها را بر ارتعاش ناشی از کفاب بررسی کرده و متوجه شدند که سیلندر پایین دست یک ارتعاش ناشی از گردابه‌ها معمولی را تجربه می‌کند. بر اساس مشاهدات، ارتعاش ناشی از کفاب یک پدیده‌ی تشدید شونده و یک نوع کفاب مستقل از حرکت ناشی از جریان نیست. آن‌ها پیشنهاد دادند که مکانیزم کفاب جایگزین که اولین بار توسط Zdravkovich (1977) پیشنهاد داده شد، می‌تواند متقاعد کننده‌ترین تشریح برای ارتعاش ناشی از کفاب باشد، و در عین حال، ساختار ورتکس ناپایدار نقش مهمی در حفظ ساز و کار ارتعاش ناشی از کفاب بازی می‌کند (Assi et al., 2010). شکل (۵) نمایش شماتیکی از ساختار گردابه‌ها را نمایش می‌دهد. اگرچه تلاش‌های بسیاری شده است تا به لحاظ نظری ساز و کار ارتعاش ناشی از کفاب توضیح دهد، ولی تاکنون هیچ توضیح کاملا رضایت بخشی ارائه نشده است. (Assi et al & 2006 2010) در مورد ترم گالوپینگ ناشی از کفاب تردید داشتند چرا که بر این باور بودند یک نیروی بازگرداننده هیدرودینامیکی نقش مهمی در واکنش سیلندر پایین‌دست در کفاب سیلندر بالادست ایفا می‌کند. نیروی بازگرداننده باعث بازگشت سیلندر به جایگاه اصلی خود می‌شود و این می‌تواند به‌عنوان عاملی برای پایداری سیلندر در نظر گرفته شود نه ناپایداری آن. آن‌ها استفاده از این ترم را تنها محدود به رژیمی کردند که در آن اثر متقابل ساختار گردابه‌ها بین

DOI: 10.22055/JISE.2017.20430.1476

کفاب بالادست و سیلندر پایین‌دست باعث نوسان سیلندر پایین‌دست شده باشد. همان‌گونه که اشاره شد، ساختار جریان دو سیلندر که هر دو در حال نوسان باشند بیشترین پیچیدگی را در بین سه وضعیت اشاره شده دارد و تا به امروز مطالعه‌های بسیار معدودی در این راستا صورت گرفته است. Sun et al (2015) با بررسی دو سیلندر همسان پشت سرهم، که هر دو سیلندر مجاز به نوسان در جهت جریان بودند، با فواصل L/D=۱.۲، ۱.۵، ۲.۰، ۲.۵، ۳.۰، ۴.۰ و ۶.۰ (که در آن L فاصله‌ی مرکز به مرکز دو سیلندر و D قطر سیلندر می‌باشد) چهار رژیم را مشاهده کردند. در رژیم۱ (L/D≤۱.۵)هر دو سیلندر گالوپینگ را تجربه می‌کنند و سیلندر پایین‌دست دامنه‌ی ارتعاشات کوچکتری نسبت به سیلندر بالادست دارد. در رژیم ۲ (۱.۵<L/D <۲.۵) گالوپینگ بزرگتری برای سیلندر بالادست نسبت به پایین‌دست در سرعت‌های کاهشی (U_r) کمتر رخ می‌دهد و برعکس آن در U_r بزرگتر حاکم است. در رژیم ۳ (۲.۵<L/D <۳.۰)، دامنه‌ی ارتعاش سیلندر پایین‌دست بزرگتر از سیلندر بالادست است. در این وضعیت اتصال مجدد لایه‌ی برشی سیلندر بالادست در جلوی سطح سیلندر پایین‌دست رخ می‌دهد. رژیم (L/D>۴) لرزش‌های کوچک برای سیلندر پایین‌دست ناشی از گردابه‌های همرفتی از سیلندر بالادست می‌باشد و لرزشی برای سیلندر بالادست مشاهده نشده است. با توجه به اهمیت آرایش چند سیلندری، هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی تغییرات در مقدار توان مهار شده در منطقه‌ی گالوپینگ برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این بخش تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده شده معرفی شده است و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و داده‌برداری به تفسیر آمده است.

۱- کانال

تمامی آزمایش‌های انجام شده در این مقاله در کانالی (LTFSW) در آزمایشگاه دانشگاه میشیگان (MARELab(Marine Renewable Energy Laboratory) انجام شد.

مقطع مورد آزمایش دارای ۲/۴۴ متر طول، یک متر عرض و از جنس پلکسی گلس بوده که قابلیت مشاهده توسط دو لیزر پنج وارگون به کمک ذرات آلومینیوم اکسید ۱۰۰ میکرومتر را فراهم می‌نماید. برای انجام این آزمایش‌ها عمق مقطع مورد آزمایش ۱/۱۷ متر بوده و ماکزیمم سرعت ۱/۳۵ متر در ثانیه که برای ایمنی در مقابل ناپایداری گالوپینگ محدود می‌باشد، انتخاب گردید. این کانال حدود ۱۰۰۰۰ گالن آب را تا سرعت ۱/۴ متر در ثانیه توسط پروانه‌ی طراحی شده با یک موتور القایی ۲۰ اسب بخاری در سیستم به چرخش در می‌آورد (شکل ۶- ب). آزمایش‌ها توسط دو سیلندر زبر از جنس آلومینیوم با قطر ۸/۸۹ سانتی‌متر (۳/۵ اینچ) و طول ۹۱/۴ سانتی‌متر (۳۶ اینچ) انجام شد. جابه‌جایی سیلندر در حال نوسان با استفاده از دو روش محاسبه می‌شود: ۱) یک مبدل کابلی (پتانسیومتر) و ۲) از طریق رمزگذاری موتور/ژنراتور در سیستم پی تی او (Power take-off (PTO) که عبارت است از توان‌کشی از موتور به‌منظور راه‌اندازی دستگاه‌هایی مانند وینچ، جک‌های هیدرولیکی، کمپرسی‌های کوچک و غیره، که این امر به‌وسیله‌ی محور تواندهی انتهایی تراکتور مقدور است که توان مورد نیاز خود را از موتور دریافت کرده که به‌صورت کاملاً مکانیکی کار می‌کند و شامل تعدادی چرخ دنده است) اندازه‌گیری شد. ولتاژ مستقیماً با اتصال ژنراتور به سیستم داده‌برداری انجام می‌شود. در هر آزمایش، پس از اینکه حالت پایدار حاصل شد، به مدت ۶۰ ثانیه داده‌برداری انجام می‌شود. برای نقشه‌های دامنه، ۶۰ عدد از بزرگترین مجموع مربعات، چه مثبت چه منفی، داده‌برداری شده‌اند. فرکانس نوسانات حقیقی f_{osc} نیز توسط تبدیل سریع فوریه (Fast Fourier Transform) برای یک سیکل خاص محاسبه شده است.

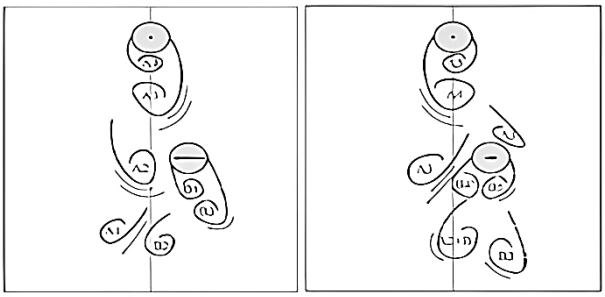
۲- نوسان کننده‌ها

شکل ساده‌ی شماتیکی از مبدل گردابه یک تک سیلندر در شکل (۷- الف) نشان داده شده است. بخش‌های مختلف این مدل عبارتند از: یک سیلندر صلب با قطر D و طول L، دو فنر خطی نگهدارنده به سختی $\frac{Kspring}{2}$ و میرایی حاصل از مکانیزم انتقال و $PTO_{csystem}$. سیلندر با محور خود در جهت z قرار می‌گیرد، که عمود بر سرعت جریان U است که در جهت x می‌باشد. مبدل ساده متشکل از یک درجه آزادی، نوسان‌گر با جرم میرایی فنر و دو سیلندر دایره‌ای ساده می‌باشد که از دو طرف توسط فنر معلق می‌باشند. جرم نوسان کننده m_{osc} شامل جرم سیلندر، یک سوم جرم فنر و جرم معادل تسمه‌ها و قرقره‌ها و همه قطعات در حال نوسان از جمله سیستم V_{CK} می‌باشد. میرایی شامل دو جزء می‌باشد: انتقال مکانیکی میرایی سیستم است که از دست رفتن انرژی است و میرایی اضافه شده برای بهره‌برداری از انرژی است. در این تحقیق، تمام میرایی‌ها، متشکل از میرایی سازه، توسط سیستم V_{CK} فراهم می‌شود که در شکل (۷- ب) نشان داده شده است. میرایی سیستم برای هر ترکیب جرم و سختی برای رسیدن به $\zeta_{structure}$=۰.۰۲ متنوع است. این دستگاه همچنین دارای یک سیستم قدرت پی تی او متشکل از یک منبع حرارتی برای اتلاف انرژی تولید شده می‌باشد. سیستم از تعامل آب و سازه تحریک شده و از طریق نیروهای سهیم توسط حرکت مایع به سیلندر اعمال می‌شود. سیلندر در جهت y نوسان می‌کند که عمود بر محور خود (جهت z) و سرعت جریان (جهت x) می‌باشد. نمونه‌ی واقعی مبدل‌های گردابه دو سیلندر نیز در شکل (۶- الف) نشان داده شده است. هر کدام از دستگاه‌ها می‌توانند روی ریل حرکت کرده و در فاصله‌ی مناسب طولی بین دو سیلندر تنظیم شوند. فاصله‌ی عمودی بین سیلندرها را نیز می‌توان با نصب سیستم فنر، که قابل افزایش برای فواصل ۰/۲۵ اینچی (۰/۶۴ سانتی‌متری) می‌باشد، تنظیم کرد. مشخصات یک مبدل گردابه برای دو سیلندر در جدول (۱) آورده شده است. سختی فنر و میرایی سیستم با آزمون‌های تست میرایی آزاد در هوا

اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، از سیستم فنرهای مجازی به جای فنرها و دمپرهای واقعی در آزمایش‌ها برای تولید توان استفاده شده است.

۳- کنترل آشفتگی غیر فعال PTC(Passive Turbulence Control)

برای افزایش حرکت ناشی از جریان سیلندرها و تولید انرژی جنبشی بیشتر از روش زبر کردن سیلندر استفاده شد. این کار به صورت معرفی دو نوار زبر و مطالعه‌ها و آزمایش‌های گسترده در آزمایشگاه دانشگاه میشیگان صورت گرفت (Bernitsas and Raghavan., 2005 & Park, 2012). در این روش دو نوار زبر موازی با محور سیلندر در تمام طول سیلندر به سیلندرها چسبانده شد. ضخامت نوار تقریباً مساوی با ضخامت لایه‌ی مرزی بوده و به شدت بر حرکت ناشی از جریان تأثیر می‌گذارد. عرض نوار ۰/۵ اینچ (۱/۲۷ سانتی‌متر) بوده که ۱۶ درجه از سطح سیلندر به قطر ۳/۵ اینچی (۸/۸۹ سانتی‌متری) را تحت پوشش قرار می‌دهد.

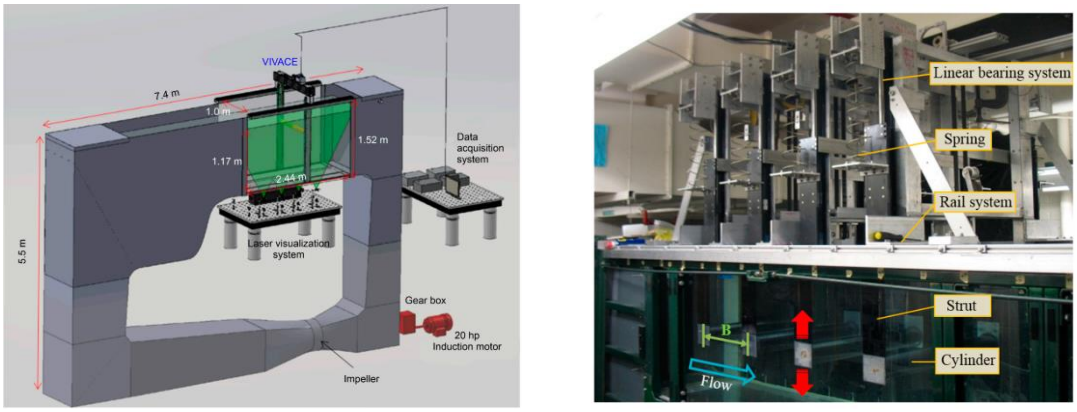


(ب) (الف)

Fig. 5- Schematic figure of interaction effect of vortices structure (a) Suppressor (b) Enhancer of vibration

شکل ۵- شکل شماتیک اثر متقابل ساختار گردابه‌ها:

(الف) سرکوب کننده (ب) افزایش دهنده‌ی ارتعاش ناشی از کفاب سیلندر پایین‌دست

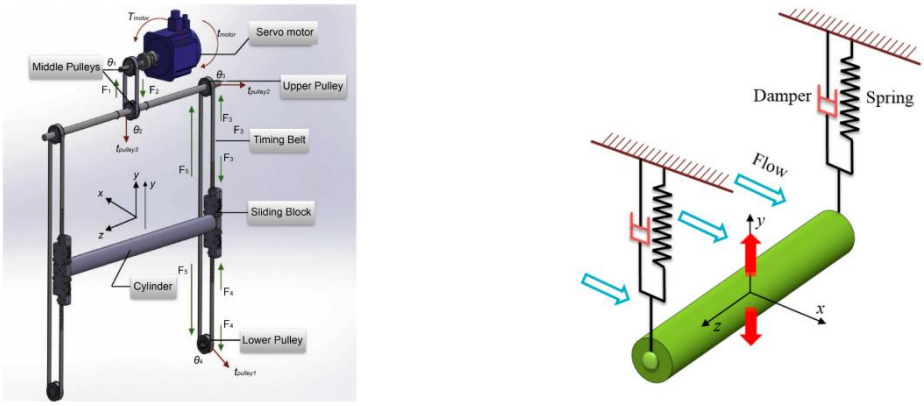


(ب) (الف)

Fig. 6- (a) Two-oscillator Converter with Vck mounted in the LTFSW Channel (side view) (b) Schematic of the LTFSW Channel and two-cylinder Oscillator.

شکل ٦- (الف) شکل واقعی و (ب) شکل شماتیک کانال LTFSW

DOI: 10.22055/JISE.2017.20430.1476



(ب) (الف)

Fig. 7- (a) Schematic of virtual VIVACE convertor (b) Schematic of a single-cylinder VIVACE (Atashi et al., 2019; Kim et al., 2021)

شکل ۷- (الف) شکل شماتیک یک تک سیلندر متصل به فنر و (ب) شکل شماتیک مبدل گردابه تک سیلندر (Atashi et al., 2019; Kim et al., 2021)

جدول ۱- اجزای مبدل گردابه برای دو سیلندر

Table 1- Cahracteristics of two cylinders in tandem

Parameters	Symbol	1st device	2nd device
Diameter (m)	D	0.0889	0.0889
Length (m)	L	0.914	0.914
Oscillating mass (kg)	m	7.286	7.286
Spring Const. (N/m)	k	1200-400	1200-400
Damping ratio	ζ	0.24	0.24
Total Damping (Ns/m)	C	8.55	8.55
Natural Freq. in water	Fn,w	1.67 ~ 0.97	1.67 ~ 0.97
Added Mass (kg)	m_d	5.425	5.425
Mass ratio	m*	1.342	1.342

شکل (۸) و جدول (۲) جزییات نوار زبر۶۰P (قابل دسترس تجاری) را که در این تحقیق از آن‌ها استفاده شده است به جزییات نشان می‌دهد.

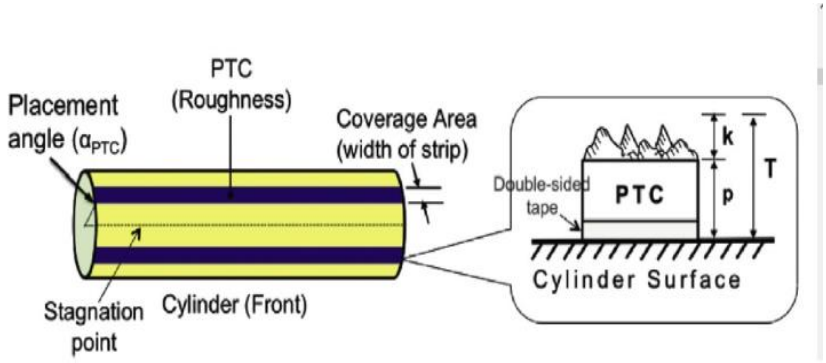
هدف اصلی از انجام آزمایش‌ها، تولید حداکثر توان با راندمان بالا می‌باشد. بدین منظور آزمایش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری حرکات جریان ناشی از دو سیلندر پشت سر هم با پارامترهای مختلف مانند سختی فنر، میرایی، نسبت فاصله مرکز به مرکز (L/D) و نسبت جرم (m*=۱.۳۴۲) انجام شد.

بخشی از این آزمایش‌ها که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته شده است، در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد. این آزمایش-ها در محدوده‌ی سرعت جریان (U) بین ۰.۳۵ و ۱.۳۵ متر در ثانیه و عدد رینولدز $۱۰^{۴}\leq Re\leq ۱.۱۰^{۵}$ که در رژیم TrSL3 می‌افتد، قرار می‌گیرد. با ارزیابی نتایج حاصل از توان مهار شده این نتیجه حاصل شد که در محدوده‌ی سرعت ۰.۹<U<۱.۳ متر در ثانیه معمولا یک افت و یک جهش در توان مهار شده مشاهده می‌گردد. این افت‌ها و پرش‌ها در مقادیر توان مهار شده برای مقادیر مختلف سختی فنر K و میرایی نسبی $\zeta_{harness}$ در جدول (۳) قابل مشاهده است. از اهداف دیگر این تحقیق بررسی علت حضور افت و پرش، یافتن توضیحی برای حضور این افت و پرش در نمودار توان می‌باشد. برای بررسی این موضوع مشاهدات تکمیلی‌ای در آزمایشگاه دانشگاه میشیگان انجام گرفت. در سری جدید آزمایش‌ها با استفاده از دوربین سونی مدل آر ایکس ۱۰–II و اضافه کردن ذرات آلومینیوم اکسید فیلمبرداری دقیق‌تر و با وضوح بیشتر از هر ران صورت گرفت. روش انجام آزمایش‌ها به این صورت می‌باشد که با روشن کردن پمپ آب وارد کانال شده و در حین انجام آزمایش‌ها آب در کانال سیرکولیت می‌شود. تمامی تنظیمات پارامترهای آزمایش‌ها اعم از: سرعت، سختی، میرایی نسبی و دامنه‌ی نوسانات توسط سیستم V_{ck} تنظیم می‌گردد. جرم نسبی سیلندر نیز با قرار دادن سیلندر در غلاف‌های متعدد قابل تغییر می‌باشد. با برخورد جریان به سیلندر در جلوی سیلندر گردابه‌هایی ایجاد شده که این گردابه‌ها ابتدا سبب

نوسان سیلندر بالادست شده و به‌دلیل اتصال سیلندر به فنر این نوسانات به فنر منتقل می‌گردد. سیلندر پایین‌دست نیز به‌دلیل قرار گرفتن در کفاب سیلندر بالادست شروع به نوسان می‌کند. برای مشاهده‌ی بهتر این نوسانات ذرات آلومینیوم اکسید به جریان اضافه شده که با تابانیدن نور لیزر الگوی جریان قابل مشاهده و فیلمبرداری می‌باشد. سیستم V_{ck} در ران‌های یک دقیقه‌ای سرعت و دامنه‌ی نوسانات هر سیلندر را ضبط کرده و محاسبات تکمیلی برای برآورد توان مهار شده انجام گردید. در بخش بعدی نتایج حاصل از انجام مجدد آزمایش‌ها آورده شده است.

نتایج و بحث

همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، سه مجموعه از آزمایش‌ها با سه نسبت فاصله L/D مختلف و سه مقدار سختی فنر K مختلف (که مقادیر بهینه مربوط به هر فاصله می‌باشد) انتخاب شده‌اند. اشکال (۹-الف، ب و ج) توان مهار شده را به‌عنوان تابعی از سرعت جریان نشان می‌دهند. خط مربعی توان مهار شده برای یک تک سیلندر، خط دایره‌ای، خط مثلثی و خط مثلثی وارونه نیز به‌ترتیب توان مهار شده برای سیلندر بالادست، سیلندر پایین دست و مجموع انرژی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۹-الف) نشان می‌دهد برای نسبت فاصله L/D=۱.۵۷، سختی فنر K=۱۲۰۰، که K سختی فنر در حالت بهینه می‌باشد، و میرایی نسبی $\zeta_{harness}$=۰.۲۴ هیچ افتی در نمودار توان برای محدوده‌ی مذکور وجود ندارد. با افزایش در مقدار L/D افت و جهش در نمودار، نمایان خواهد شد شکل (۹-ب و ج). بنابراین فرضیه‌ی این تحقیق این خواهد بود که با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر با آرایش پشت سرهم، افت و پرش در نمودار توان ظاهر گشته و رو به افزایش خواهد بود. برای نسبت فواصل کوچک (تقریبا ۱/۸-۱.۲<L/D<۱ Zdravkovich (1987) یا ۲>L/D>۱ Zhou و Yui (2006) بسته به محدوده‌ی عدد رینالدز) دو سیلندر مانند یک بدنه‌ی تک و یا در اصطلاح "بدنه‌ی کشیده شده" (extended-body) رفتار می‌کنند، یعنی سیلندر پایین‌دست در داخل منطقه‌ی تشکیل گرداب سیلندر بالادست قرار می‌گیرد Ishigai et al (1972) و لایه‌های برشی مجزا از سیلندر بالادست در اطراف سیلندر پایین دست، پیش از اینکه گردابه‌های فون کارمن متناوبا پشت سیلندر پایین دست چرخش کنند، جریان (Von Kármán vortices) یافته و آن‌را محصور می‌کنند. اما، برای نسبت فواصل متوسط (تقریبا ۳/۸-۳/۴<L/D<۱/۲-۱/۸ Zdravkovich (1987) یا ۵>L/D>۲ (ژو و یو، ۲۰۰۶)، بسته به محدوده عدد رینالدز)، دو سیلندر به میزان کافی از یکدیگر فاصله دارند تا لایه‌های برشی جریان یافته از سیلندر بالادست نتواند سیلندر پایین‌دست را محصور کند. شکل (۱۰) دسته‌بندی الگوی جریان برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم را نشان می‌دهد. تحقیق حاضر در دو گروه اول دسته بندی می‌شود.



8- Configuration of the passive turbulence control (PTC) on the cylinder.Fig
شکل ۸- چیدمان نوار زبر بر روی سیلندر

جدول ۲- جزییات نوار زبر
Table 2- PTC parameters (P60)

Item	Index	Value
Strip placement angle	α_{PTC}(degree)	20
Angular coverage of strip	θ (degree)	16
Sandpaper thickness	P(mm)	0.586
Average grit height	K(mm)	0.26
Total thickness of strip	T= P+k(mm)	0.847

DOI: 10.22055/JISE.2017.20430.1476

جدول ۳- پارامترهای مورد آزمایش

Table 3- Experiment parameters

Phase	Velocity (m/s)	$\zeta_{harness}$	Spring Const. (N/m)	Length ratio (L/D)
-	-	0.24	1200	1.57
Jump	1.06	0.24	800	2.01
Drop	1.15	0.24	400	2.57

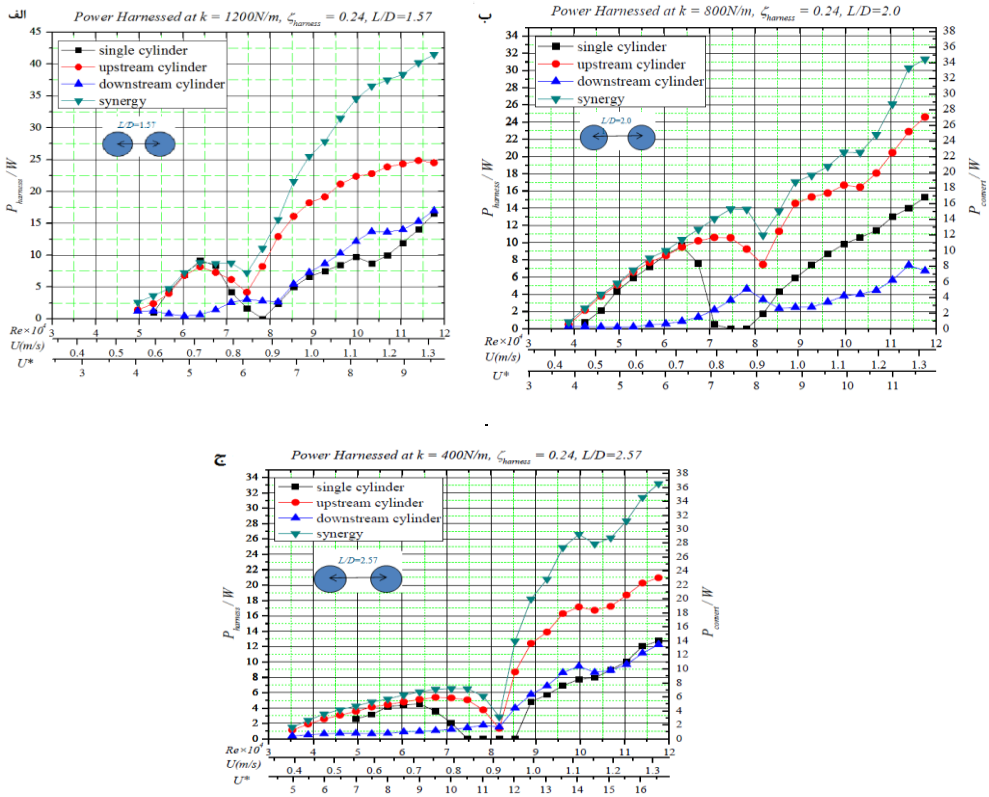


Fig. 9- Harnessed Power curves for m* = 1.343 and $\zeta_{harness}$ = 0.24 (a) with K = 1,200 N/m spacing L/D = 1.57 (b) with K = 800 N/m spacing L/D = 2.01 (c) with K = 400 N/m spacing L/D = 2.57

شکل ۹- نمودار توان مهار شده در مقابل سرعت الف) K=۱۲۰۰ نیوتن در متر L/D= ۱.۵۷ ب) K=۸۰۰ نیوتن در متر L/D= ۲.۰۱ و ج) K=٤۰۰ نیوتن در متر L/D= ۲.۵۷

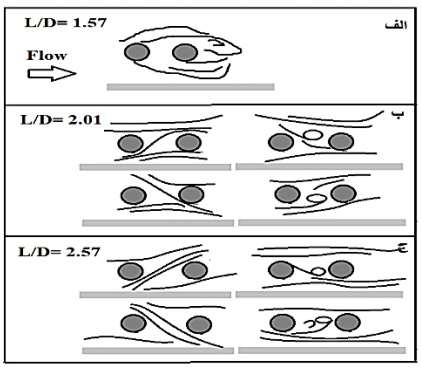


Fig. 10- Simplified classification scheme of the flow patterns for two tandem circular cylinders in cross-flow, from (Xu and Zhou, 2004) and (Zhou and Yiu, 2006).

شکل ۱۰- شکل شماتیک دسته‌بندی ساده شده‌ی الگوی جریان برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم

برای انجام مشاهدات دقیق‌تر، دوربین سونی مدل آر ایکس ۱۰-II برای ضبط ویدوئوهای یک دقیقه‌ای از هر آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، دو لیزر پنج وارگون به کمک ذرات آلومینیوم اکسید ۱۰۰ میکرومتر امکان مشاهده‌ی جزییات آزمایش را فراهم نمود. با استفاده از این روش، می‌توان مسیر و جهت هر ذره را به وضوح مشاهده نمود. پس از فیلم‌برداری به منظور تحلیل نتایج و پردازش پدیده، هر فیلم به تعدادی فریم (بسته به نیاز به وضوح تصویر و سرعت جریان) تقسیم گردید. لازم به ذکر است؛ در این سری آزمایش‌ها، هر دو استوانه به صورت هم فاز در نوسان می‌باشند. شکل (۱۱) الگوی جریان حاصل از داده-برداری با دوربین پیشرفته اطراف دو سیلندر پشت سرهم را نشان می‌دهد. مشاهده‌ی الگوی جریان نشان می‌دهد در بیشتر موارد برای نسبت فاصله‌ی L/D=۱/۵۷ الگوی جریان مشابه شکل (۱۱-الف) خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ خطوط جریانی از بین دو سیلندر عبور نمی‌کند و رفتار دو سیلندر، صرف‌نظر از جهت حرکت هر دو سیلندر رو به بالا یا پایین، به مثابه‌ی یک تک سیلندر است.

در اشکال (۱۱ ب و ج) لایه‌ی برشی سیلندر بالایی مستقیماً اثر متقابل بر سیلندر پایینی دارد. بدین معنا که بسته به فاصله‌ی بین دو سیلندر، بخشی یا تمامی سیلندر پایین دست در کفاب سیلندر بالادست مستغرق خواهد شد. در بیشتر مواقع، گردابه‌های حاصل از سیلندر بالادست با سیلندر پایین دست برخورد نخواهند کرد، بلکه، از فضای بین دو سیلندر عبور خواهند کرد. این نوع اثر متقابل بین دو سیلندر غالباً بسیار قوی بوده و باعث تقویت نوسانات ناشی از جریان گردابه از طریق افزایش ضریب درگ و ضریب بالابرنده می-نماید.

وقتی که هر دو سیلندر شروع به پایین رفتن می‌کنند، الگوی جریان مطابق شکل (۱۱ ب و ج) خواهد بود. جریان از پایین سیلندر بالادست به سمت سیلندر پایین‌دست حرکت می‌کند و سیلندر پایین‌دست را به سمت پایین می‌کشد تا دو سیلندر آرایش پشت سرهم بودن خود را حفظ کرده و حرکت زیگزاگی نسبت بهم نداشته باشند. این الگو تا زمانی که هر دو سیلندر به پایین‌ترین مکان خود در کانال برسند ادامه می‌یابد. سپس، سیلندر بالادست تغییر جهت داده و شروع به حرکت به سمت بالا می‌نماید. در این زمان یک گرداب از پایین سیلندر بالادست و بین دو سیلندر جریان می‌یابد. بنابراین الگوی جریان کاملا تغییر شکل می‌یابد (شکل ۱۱-ب و ج). باز هم، بخش بزرگی از نیروی عرضی دینامیک سیال سبب بازگشت سیلندر پایین‌دست به آرایش پشت سرهم می‌شود. این چرخه برای چندین بار تکرار خواهد شد. در این وضعیت می-توان این نتیجه را گرفت که برای نسبت فاصله‌ی L/D=۱.۵۷ به دلیل اینکه فاصله کم بوده و همانطور که اشاره شد، دو سیلندر مانند یک سیلندر تک عمل می‌کنند، پس افت و به دنبال آن پرشی در مقدار توان مهار شده مشاهده نمی‌شود. اما، با افزایش نسبت فاصله-ی L/D الگوی جریان تغییر نموده و به سبب این الگوی جریان در محدوده‌ی سرعت مذکور تغییرات ناگهانی در میزان توان مهار شده به وجود می‌آید. با مراجعه به نمودارهای شکل (۹) می‌توان این تغییرات ناگهانی در میزان توان را مشاهده نمود.

شکل (۱۲) نسبت دامنه‌ی حرکت دو سیلندر را در مقابل زمان برای مدت ۳۰ ثانیه نشان می‌دهد. خط قرمز دامنه‌ی مربوط به سیلندر بالادست و خط آبی دامنه‌ی مربوط به سیلندر پایین‌دست می‌باشد. این نمودار مربوط به سرعت معادل ۱/۱ متر در ثانیه، یعنی اندکی قبل از وقوع افت، می‌باشد. شکل ۱۳ نیز نسبت دامنه‌ی حرکت دو سیلندر را در مقابل زمان (۳۰ ثانیه) برای سرعت معادل ۱/۱۵ متر در ثانیه نشان می‌دهد. در این نمودار نیز، خط قرمز دامنه‌ی مربوط به سیلندر بالادست و خط آبی دامنه‌ی مربوط به سیلندر پایین‌دست می‌باشد. این نمودار مربوط به سرعتی می‌باشد که در آن افت رخ داده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، حرکت دو سیلندر در سرعت ۱.۱ متر در ثانیه، سرعت قبل از وقوع افت، برای K=۱۲۰۰ نیوتن بر متر، $\zeta_{harness}$=۰/۲۴ و L/D=۲/۵۷، غیر هم فاز می‌باشد. اما همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در سرعت ۱/۱۵ متر در ثانیه و ثابت بودن بقیه‌ی پارامترهای مورد آزمایش حرکت دو سیلندر هم فاز خواهد بود. این حرکت هم فاز سبب خواهد شد که سیلندر پایین دست کاملاً تحت تأثیر اثر متقابل سیلندر بالادست باشد. می‌توان با مشاهده‌ی این دو شکل این نتیجه را گرفت که حرکت غیر هم فاز سیلندر بالادست اثر متقابل شدیدی بر سیلندر پایین دست نخواهد گذاشت. بنابراین، ناپایداری در گالوپینگ مشاهده نمی‌شود. پس، نمودار توان مهار شده در مقابل سرعت به روند افزاینده‌ی خود ادامه خواهد داد و اما، در سرعت ۱/۱۵ متر در ثانیه، به دلیل اثر متقابل شدید دو سیلندر در اثر حرکت هم فاز، منطقه‌ی گالوپینگ ناپایدار گشته و متعاقب آن افت در میزان توان مهار شده مشاهده می‌گردد.

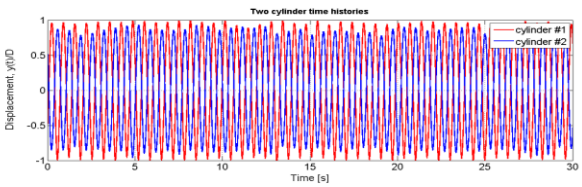


Fig. 11- Schematic flow pattern around two tandem cylinders for spacing (a) L/D = 1.57 (b) L/D = 2.01 (c) L/D = 2.57

شکل ۱۱- شکل شماتیک الگوی جریان اطراف دو سیلندر با آرایش پشت سرهم الف) K=۱۲۰۰ نیوتن در متر L/D= ۱.۵۷ ب) K=۸۰۰ نیوتن در متر L/D= ۲.۰۱ و ج) K=٤۰۰ نیوتن در متر L/D= ۲.۵۷

DOI: 10.22055/JISE.2017.20430.1476

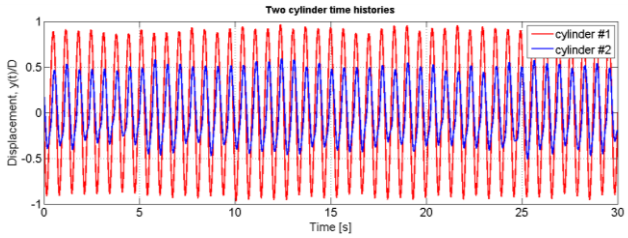


Fig. 12- Time history for two tandem cylinders before drop U = 1.10 m/s, K = 1,200 N/m, $\zeta_{harness}$ = 0.24 and L/D = 2.57 (for 30 seconds)

شکل ۱۲- نمودار دامنه-زمان برای دو سیلندر پشت سرهم در سرعت ۱.۱ متر در ثانیه (k=۱۲۰۰ نیوتن بر متر، $\zeta_{harness}$=۰.۲٤ و L/D=۲.۵۷)

نتیجه‌گیری

۱- استفاده از دو سیلندر به جای یک تک سیلندر میزان توان مهار شده را افزایش داده و الگوی جریان اطراف سیلندر را پیچیده‌تر می‌نماید.

۲- برای L/D=۱.۵۷، k=۱۲۰۰ نیوتن بر متر و $\zeta_{harness}$=۰.۲۴ افت و یا پرشی در نمودار توان مهار شده نسبت به سرعت مشاهده نمی‌شود. ولی، برای ۲ و L/D=۲.۵۷، k=۱۲۰۰ نیوتن بر متر و $\zeta_{harness}$=۰.۲۴ در محدوده‌ی سرعت ۰.۹<U<۱.۳ متر در ثانیه افت و همچنین پرش در نمودار توان مهار شده نسبت به سرعت مشاهده می‌شود. نحوه‌ی الگوی جریان در نسبت فواصل بالاتر سبب پیچیدگی الگوی جریان و متعاقباً بروز افت و پرش در نمودار توان مهار شده گشته است.

۳- در سرعت ۱/۱ متر در ثانیه حرکت دو سیلندر نسبت به هم غیر هم فاز بوده ولی، برای سرعت ۱/۱۵ متر در ثانیه (سرعت وقوع افت) این حرکت به شکل هم فاز خواهد شد. پس حرکت هم فاز سبب اثر متقابل شدید دو سیلندر گشته و متعاقب آن سبب ناپایداری در منطقه‌ی گالوپینگ و افت در نمودار توان مهار شده می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله از نتایج پایان نامه دکتری نویسنده اول و با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده دوم (۹۶/۳/۰۲/۱۶۶۷۰) و با استفاده از امکانات آزمایشگاهی مرکز مطالعات انرژی‌های نو دریایی (MRELab) واقع در دانشگاه میشیگان کشور آمریکا تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی میکنند. ضمناً از حمایت معنوی قطب علمی "بهسازی و نگهداری شبکههای آبیاری و زهکشی" تشکر و قدردانی میگردد.

References

1- Alam, M.M., Moriya, M. and Sakamoto, H., 2003a. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. *Journal of Fluids and Structures*, *18*(3-4), pp.325-346.

2- Alam, M.M., Moriya, M., Takai, K. and Sakamoto, H., 2003b. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *91*(1-2), pp.139-154.

3- Assi, G.D.S., Meneghini, J.R., Aranha, J.A.P., Bearman, P.W. and Casaprima, E., 2006. Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders. *Journal of fluids and structures*, *22*(6-7), pp.819-827.

4- Assi, G.R., Bearman, P.W. and Meneghini, J.R., 2010. On the wake-induced vibration of tandem circular cylinders: the vortex interaction excitation mechanism. *Journal of Fluid Mechanics*, *661*, pp.365-401.

5- Atashi, V., Ghomeshi, M., Sajjadi, S. M., & Bernitsas, M. (2019). Effect of spacing on harnessed power for two tandem cylinders. Irrigation Sciences and Engineering, -. https://doi.org/10.22055/jise.2017.20430.1476

6- Bearman, P.W., 2011. Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, *27*(5-6), pp.648-658.

7- Bearman, P.W., 1984. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. *Annual Review of Fluid mechanics*, *16*(1), pp.195-222.

8- Bernitsas, M.M. and Raghavan, K., 2005a. Fluid motion energy converter, internasional. Provisional Patent Application. *US Patent and Trandemark Office Serial*.

9- Blevins, R.D. and Vibration, F.I., 1990. Van Nostrand Reinhold. *New York*, *34*.

10- Chang, C.C.J., Kumar, R.A. and Bernitsas, M.M., 2011. VIV and galloping of single circular cylinder with surface roughness at 3.0× 104≤ Re≤ 1.2× 105. *Ocean Engineering*, *38*(16), pp.1713-1732.

11- Govardhan, R. and Williamson, C., 2000. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, *420*, pp.85-130.

12- Govardhan, R.N. and Williamson, C.H.K., 2006. Defining the 'modified Griffin plot'in vortex-induced vibration: revealing the effect of Reynolds number using controlled damping. *Journal of Fluid Mechanics*, *561*, pp.147-180.

13- Igarashi, T. 1981. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem: 1st report. *Bulletin of JSME*, *24*(188), 323-331.

14- Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K., & Cho, K. 1972. Experimental study on structure of gas flow in tube banks with tube axes normal to flow: Part 1, Karman vortex flow from two tubes at various spacings. *Bulletin of JSME*, *15*(86), 949-956.

15- Kim, S., Alam, M. M., Sakamoto, H., & Zhou, Y. 2009. Flow-induced vibrations of two circular cylinders in tandem arrangement. Part 1: Characteristics of vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *97*(5-6), 304-311.

16- Laneville, A. and Brika, D., 1999. The fluid and mechanical coupling between two circular cylinders in tandem arrangement. *Journal of Fluids and Structures*, *13*(7-8), pp.967-986.

17- Ljungkrona, L., Norberg, C.H. and Sundén, B., 1991. Free-stream turbulence and tube spacing effects on surface pressure fluctuations for two tubes in an in-line arrangement. *Journal of Fluids and Structures*, *5*(6), pp.701-727.

18- Park, H., 2012. *Mapping of passive turbulence control to flow induced motions of circular cylinders* (Doctoral dissertation, University of Michigan).

19- Parkinson, G., 1989. Phenomena and modelling of flow-induced vibrations of bluff bodies. *Progress in Aerospace Sciences*, *26*(2), pp.169-224.

20- Sarpkaya, T., 2004. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of fluids and Structures*, *19*(4), pp.389-447.

21- Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R., 1990. On the formation and suppression of vortex 'shedding'at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, *218*, pp.71-107.

22- Sun, Q., Alam, M.M. and Zhou, Y., 2015. Fluid-Structure coupling between two tandem elastic cylinders. *Procedia Engineering*, *126*, pp.564-568.

23- Van den Abeele, F. and Voorde, J.V., 2010. Flow Induced Oscillations of Marine Risers with Wake Interference. In *Proceeding of the Comsol Conference. Paris. France*.

24- Williamson, C.H., 1996. Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *28*(1), pp.477-539.

25- Williamson, C.H. and Govardhan, R., 2004. Vortex-induced vibrations. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, *36*, pp.413-455.

DOI: 10.22055/JISE.2017.20430.1476

26- Zdravkovich, M.M., 1977. Review of flow interaction between two circular cylinders in various arrangement. *Trans. ASME*.

27- Zdravkovich, M.M., 1985. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. *Journal of Sound and Vibration*, *101*(4), pp.511-521.

28- Zdravkovich, M.M., 1987. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and Structures*, *1*(2), pp.239-261.

29- Zhou, Y. and Yiu, M.W., 2006. Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, *548*, pp.17-48.