

## بررسی تغییرات ناگهانی توان مهار شده در ناحیه‌ی گالوپینگ برای دو سیلندر پشت سر هم

ویدا آتشی\*، مهدی قمشی

گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2017.50239](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.50239)

### چکیده

در این مقاله اثر حرکت هم‌فاز و غیر هم‌فاز دو سیلندر زبر دایره‌ای پشت سر هم بر حرکت ناشی از جریان بررسی شده است. 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، یا به اختصار VIV و گالوپینگ رایج‌ترین پدیده‌ها در حرکت ناشی از جریان هستند که به دلیل اثر متقابل لایه‌ی برشی و کف آب سیلندر بالادست رخ می‌دهد. در این مقاله اثر فاصله‌ی دو سیلندر زبر دایره‌ای پشت سر هم بر FIM بررسی شده است. نمودارهای توان مهار شده برای سیلندر بالادست، پایین‌دست و مجموع انرژی با کمک دستگاه مبدل انرژی استخراج گردیده است. مبدل گردابه از یک جسم بلاف صلب تشکیل شده است که به صورت الاستیک روی پایه‌ای نصب می‌شود و در معرض جریان سیال قرار می‌گیرد. انرژی مکانیکی حاصل از ارتعاشات استوانه نیز توسط سیستم انتقال قدرت به ژنراتور منتقل می‌شود. معمولاً با افزایش سرعت میزان انرژی مهار شده در منطقه‌ی گالوپینگ افزایش می‌یابد، اما برخلاف انتظار در محدوده‌ی سرعت‌های بین ۰/۹ و ۱/۳ متر در ثانیه، یک افت یا یک پرش ناگهانی دیده می‌شود. هدف این مقاله، یافتن دلیل حضور این تغییرات با بررسی نحوه‌ی نوسانات دو سیلندر نسبت به یکدیگر می‌باشد. یافته‌ها نشان می‌دهد که دلیل حضور افت در میزان توان مهار شده ۷/۲۳ و ۲۵/۵ درصدی به ازای سختی فنر ۸۰۰ و ۱۲۰۰ نیوتن در متر ناشی از تغییرات در نحوه‌ی الگوی نوسانات سیلندر پایین دست می‌باشد.

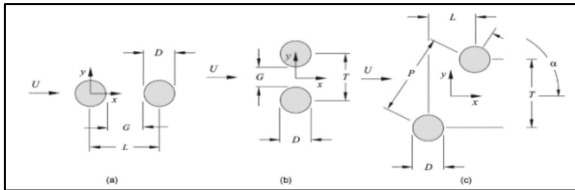
**واژگان کلیدی:** توان مهار شده، ناحیه‌ی گالوپینگ، نوسانات غیر هم فاز، نوسانات هم فاز.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: [vida.atashi@yahoo.com](mailto:vida.atashi@yahoo.com)

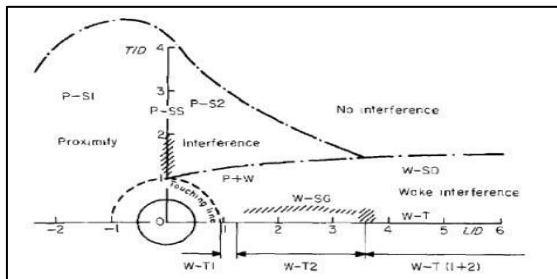
## ۱. مقدمه

زمینه‌های مهندسی شده است. سیستم دو سیلندری بیشترین مورد مطالعه را در بین چند سیلندری‌ها به دلیل آرایش ساده‌ی آن داشته است. دو سیلندر می‌توانند به صورت کنار هم، پشت سرهم و یا زیگزآگی در کنار هم قرار بگیرند (شکل ۱). اثر متقابل بین سیلندرها قویا به آرایش بین سیلندرها، خصوصیات جریان و عدد رینالدز بستگی دارد. طبق تحقیقات Zdravkovich (1977, 1985 و 1987)، سه نوع اثر متقابل بین دو سیلندر می‌تواند وجود داشته باشد (Zdravkovich, 1977a, 1997 & 2002) (شکل ۲):

اثر متقابل نزدیک: زمانی رخ می‌دهد که سیلندرها به یکدیگر نزدیک باشند.  
اثر متقابل کف آب: زمانی رخ می‌دهد که یک سیلندر در کف آب سیلندر دیگر قرار گیرد.  
بدون اثر متقابل: زمانی رخ می‌دهد که سیلندرها به اندازه‌ی کافی از هم دور باشند که دینامیک جریان آنها از یکدیگر مستقل باشد.



شکل ۱- انواع آرایش دو سیلندر (a) پشت سرهم، (b) کنار هم و (c) زیگزآگی



شکل ۲- دسته بندی اثر متقابل رژیم‌های جریان

مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش فاصله‌ی طولی دامنه‌ی نوسانات کاهش پیدا می‌کند (Assi et al., 2010)، چرا که با افزایش فاصله، گردابه‌ها از سیلندر بالادست بیشتر پراکنده می‌شوند (Assi et al., 2010). مکانیزم نوسانات سیلندر پایین دست به دلیل

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)، یا به اختصار VIV، رایج‌ترین پدیده در حرکت ناشی از جریان (FIM) می‌باشد. وقتی یک سیلندر الاستیک دایره‌ای نصب شده در معرض جریان یکنواخت عرضی قرار بگیرد، گردابه‌ها، نیروهای نوسانی بر سیلندر اعمال کرده که نتیجه‌ی آن VIV می‌باشد. مشخصه‌ی VIV قفل شدگی می‌باشد به این معنی که در محدوده‌ی همگام سازی، فرکانس جریان گردابه‌ها با فرکانس نوسانات سیلندر تقریباً برابر شده و حرکات بزرگ سیلندر مشاهده می‌شود (Govardhan and Williamson, 2000). مطالعات کاملی در خصوص VIV در مقالات برمن (Bearman, 1984 & 2011)، سارپکایا (Sarpkaya, 2004)، و گواردهان و ویلیامسون (Govardhan and Williamson, 2004) انجام شده است. گالوپینگ شکل دیگری از FIM می‌باشد که از لحاظ هیدرودینامیکی - آیرودینامیکی ناپایدار بوده و در فرکانس کم‌تر و دامنه‌ی بیشتری نسبت به VIV رخ می‌دهد. این پدیده عمود بر جریان بوده و نسبت به VIV مخرب‌تر می‌باشد ولی پیچیدگی‌های VIV را ندارد. با افزایش سرعت، FIM با VIV به صورت جریان گردابه‌ای شروع شده و این گردابه‌ها در دو طرف سیلندر جریان یافته و سبب حرکت عرضی سیلندر می‌شوند. ارتعاش ناشی از گردابه‌ها (VIV) برای یک سیلندر، که برای دهه‌ها مورد مطالعه بوده و هنوز هم موضوع بحث در بخش مرور مقالات (Sarpkaya, 2004 و Williamson, 2004) می‌باشد که به دلیل پیچیدگی دینامیک آن است. انتظار می‌رود که این پیچیدگی در حرکت القایی ناشی از جریان برای سیلندره‌ای متعدد به طور چشمگیری افزایش یابد. تداخل جریان در یک گروه سیلندر، موضوع بسیاری از مطالعات در گذشته با توجه به کاربرد عملی در

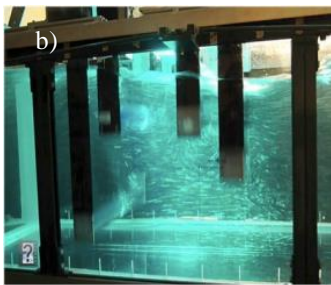
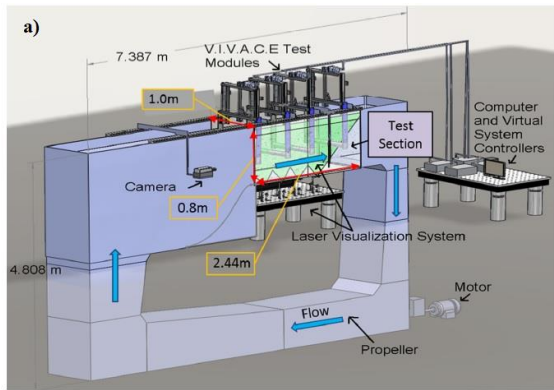
تعداد اندکی از مطالعات بر روی سیلندر سخت کشسان در بالادست انجام شده است. To و Lam (2007) واکنش یک سیلندر سخت کشسان واقع در بالادست یک سیلندر ثابت را با قطری دو برابر در مکان‌های مختلف بررسی نموده و واکنش دامنه‌ی نوسانات سیلندر بالادست را مشاهده نمودند (To and Lam, 2007). مشاهدات نشان داد که نوسانات سیلندر بالادست در بسیاری از موقعیت‌های بالادست سرکوب می‌شود و قفل‌شدگی در سرعت کاهشی نزدیک به ۶ مشاهده شد. از طرفی، نوسانات با دامنه‌ی بالا در سرعت کاهشی بالا ( $U_R$ ) زمانی که سیلندر بالادست با سیلندر پایین‌دست به صورت پشت سرهم در  $\frac{d}{D} < 1/17$  جاگذاری شده باشد، مشاهده شد. با مشاهدات و آزمایشات عینی، آنان دریافتند که کف آب ناشی از سیلندر بالادست تحت تاثیر سیلندر پایین‌دست تغییر می‌کند و بالطبع فرکانس جریان گردابه‌ها نیز تغییر خواهد کرد. این نتایج نشان می‌دهد که واکنش سیلندر بالادست نیز تحت تاثیر حضور سیلندر ثابت پایین‌دست می‌باشد.

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 مطالعات 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  $L/D = 1/2$ ،  $1/5$ ،  $2/5$ ،  $3/5$ ،  $4/5$  و  $6/5$  چهار رژیم را مشاهده کردند (Sun et al., 2015). در رژیم ۱ ( $L/D \leq 1/5$ ) هر دو سیلندر گالوپینگ را تجربه می‌کنند و سیلندر پایین‌دست دامنه‌ی ارتعاشات کوچکتری نسبت به سیلندر بالادست دارد. در رژیم ۲ ( $1/5 < L/D < 2/5$ ) 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 ( $2/5 < L/D < 3/5$ )، دامنه‌ی ارتعاش سیلندر پایین‌دست بزرگتر از سیلندر بالادست است. در این

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. Assi et al. (2006, 2010) در مورد ترم گالوپینگ ناشی از کف آب تردید داشتند چرا که بر این باور بودند یک نیروی بازگرداننده هیدرودینامیکی نقش مهمی در واکنش سیلندر پایین‌دست در کف آب سیلندر بالادست ایفا می‌کند (Assi et al. 2006 & 2010). نیروی بازگرداننده باعث بازگشت سیلندر به جایگاه اصلی خود می‌شود و این می‌تواند به عنوان 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 کف آب بالادست و سیلندر پایین‌دست باعث نوسان سیلندر پایین‌دست شده باشد. Assi et al. (2010) آزمایش‌هایی جهت بررسی ساز و کار WIV سیلندر پایین‌دست در کف آب 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 آرام‌کننده‌های جریان، آنها اثر گردابه‌ها را بر  $WIV^2$  بررسی کرده و متوجه شدند که سیلندر پایین‌دست یک VIV معمولی را تجربه می‌کند. بر اساس مشاهدات، WIV یک پدیده‌ی شدید شونده و یک نوع کف آب مستقل از حرکت ناشی از جریان (FIM) نیست. آنها پیشنهاد دادند که مکانیزم کف آب جایگزین که اولین بار توسط Zdravkovich (1977a) پیشنهاد داده شد، می‌تواند متقاعدکننده‌ترین تشریح برای WIV باشد، و در عین حال، ساختار ورتکس ناپایدار نقش مهمی در حفظ ساز و کار WIV بازی می‌کند (Assi et al., 2010).

<sup>۴</sup> Wake-induced vibration

اینچ) انجام شد. ولتاژ مستقیماً با اتصال ژنراتور به سیستم داده‌برداری انجام می‌شود.



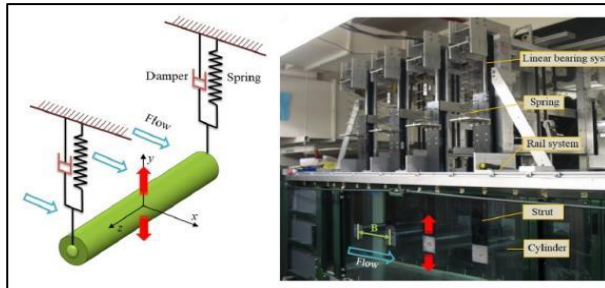
شکل ۳- (a) شکل شماتیک و واقعی (b) کانال LTFSW

در هر آزمایش، پس از اینکه حالت پایدار حاصل شد، به مدت ۶۰ ثانیه داده‌برداری انجام می‌شود. جزئیات مربوط به کالیبره کردن کانال در مقاله Bernitsas et al. (2006b) آورده شده است (Bernitsas et al., 2006). فرکانس نوسانات حقیقی  $f_{osc}$  نیز توسط Fast Fourier Transform برای یک سیکل خاص محاسبه شده است. برای بررسی اثر حرکت ناشی از جریان بر دو سیلندر در حال نوسان نسل دوم مدل آزمایشگاهی از VIVACE در سال 2009 ساخته شد. ساختار دستگاه‌های جدید ساده اما قوی است و در دستگاه‌های نسل دوم از هر دو نوع فنر چه مکانیکی و چه سیستم VCK می‌توان استفاده کرد. علاوه بر این، فاصله‌ی بین سیلندرها بوسیله‌ی یک ریل قابل تنظیم می‌باشد و کار کردن با آنها نیز آسان است. شکل ساده‌ی شماتیکی از مدل VIVACE یک تک سیلندر در شکل ۴ نشان داده شده است. بخش‌های مختلف این مدل عبارتند از: یک سیلندر صلب با قطر  $D$  و طول  $L$ ، دو فنر

وضعیت اتصال مجدد لایه‌ی برشی سیلندر بالادست در جلوی سطح سیلندر پایین‌دست رخ می‌دهد. رژیم  $(L/D > 4)$  لرزش‌های کوچک برای سیلندر پایین‌دست ناشی از گردابه‌های همرفتی از سیلندر بالادست می‌باشد و لرزشی برای سیلندر بالادست مشاهده نشده است. در تحقیق حاضر دو سیلندر با آرایش پشت سر هم در حال نوسان هستند و هر دو سیلندر قابلیت نوسان در جهت عرضی جریان (حرکت عمودی) را دارند. به طور معمول، با افزایش سرعت جریان ابتدا VIV ظاهر شده و به دنبال آن گالوپینگ مشاهده می‌شود. پس از رسم نمودارهای توان مه‌ار شده نسبت به عدد رینالدز، مشاهده گردید که در ناحیه‌ی گالوپینگ برخلاف انتظار تغییرات ناگهانی‌ای در مقدار توان مشاهده می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی دلیل وقوع افت‌ها و پرش‌های موجود در مقدار توان سرکوب شده در ناحیه‌ی گالوپینگ و ارتباط این تغییرات ناگهانی با نحوه‌ی نوسانات دو سیلندر نسبت به یکدیگر (هم فاز و یا غیر هم فاز) می‌باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

تمامی آزمایش‌های انجام شده در این مقاله در کانال LTFSW در آزمایشگاه MRELab دانشگاه میشیگان آمریکا انجام شد. مقطع مورد آزمایش دارای ۲/۴۴ متر طول، ۱ متر عرض و از جنس پلکسی گلس بوده که قابلیت مشاهده توسط دو لیزر ۵ 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 ۳). آزمایش‌ها توسط دو سیلندر زبر از جنس آلومینیوم با قطر ۰/۰۸۸۹ متر (۳/۵ اینچ) و طول ۰/۹۱۴ متر (۳۶

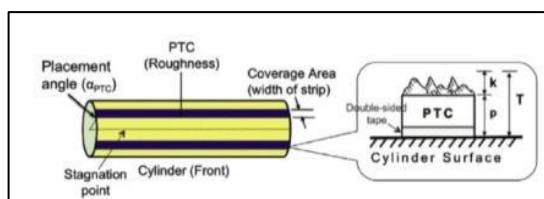


شکل ۴- شکل شماتیک مبدل VIVACE یک تک سیلندر (سمت چپ) و یک نمونه مبدل VIVACE در کانال LTFSW (سمت راست)

جدول ۱- اجزای مبدل VIVACE برای دو سیلندر

نشانه	سیلندر اول	سیلندر دوم	پارامترها
D	۰/۰۸۸۹	۰/۰۸۸۹	قطر (متر)
L	۰/۹۱۴	۰/۹۱۴	طول (متر)
m	۷/۲۸۶	۷/۲۸۶	جرم در حال نوسان (کیلوگرم)
k	۱۲۰۰ و ۸۰۰	۱۲۰۰ و ۸۰۰	سختی فنر (نیوتن بر متر)
$\zeta$	۰/۱۶	۰/۱۶	میرایی نسبی سیستم

برای افزایش FIM سیلندرها و تولید انرژی جنبشی بیشتر از روش زبر کردن سیلندر استفاده شد. این کار به صورت معرفی دو نوار زبر و مطالعات و آزمایش‌های گسترده در در MRElab صورت گرفت (Bernitsas and Raghavan, 2007a and 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 مقدار حرکت ناشی از جریان تاثیر می‌گذارد. عرض نوار ۰/۵ اینچ (۱/۲۷ سانتیمتر) بوده که ۱۶ درجه از سطح سیلندر به قطر ۳/۵ اینچ (۸/۸۹ سانتیمتری) را تحت پوشش قرار می‌دهد. شکل ۵ و جدول ۲ جزئیات نوار زیر P6۰ (قابل دسترس تجاری) را به جزئیات نشان می‌دهد که در این تحقیق از آنها استفاده شده است.



خطی نگهدارنده به سختی  $\frac{K_{spring}}{2}$  و میرایی حاصل از مکانیزم انتقال و PTO<sub>system</sub> سیلندر که با محور خود در جهت Z قرار می‌گیرد و عمود بر سرعت جریان U است و 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 تسمه-ها 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. میرایی سیستم برای هر ترکیب جرم و سختی برای رسیدن به  $\zeta_{structure}=0/02$  متنوع است. سیلندر در جهت Y نوسان می‌کند که عمود بر محور خود (جهت Z) و سرعت جریان (جهت X) می‌باشد. نمونه‌ی مبدل‌های VIVACE تک سیلندر نیز در شکل ۴ 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 VIVACE برای دو سیلندر در جدول ۱ آورده شده است. سختی فنر و میرایی سیستم با آزمون‌های تست میرایی آزاد (Free decay test) در هوا اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، از سیستم فنرهای مجازی ( $V_{ck}$ ) به جای فنرها واقعی در آزمایش‌ها برای تولید توان استفاده شده است.

شکل ۵- چیدمان PTC بر روی سیلندر

جدول ۲- جزئیات نوار PTC

پارامترهای نوار زبر (P60)	مقدار	نمایه
زاویه قرارگیری نوار زبر (درجه)	۲۰	$\alpha_{PTC}$ (degree)
زاویه ی تحت پوشش نوار (درجه)	۱۶	$\theta$ (degree)
ضخامت شن و نوار (میلیمتر)	۰/۵۸۶	P(mm)
متوسط ارتفاع گریت (میلیمتر)	۰/۲۶	K(mm)
ضخامت کل نوار (میلیمتر)	۰/۸۴۷	T= P+k(mm)

شده که با تابانیدن نور لیزر الگوی جریان قابل مشاهده و فیلمبرداری می باشد. سیستم  $V_{ck}$  در ران های یک دقیقه ای سرعت و دامنه ی نوسانات هر سیلندر را ضبط کرده و محاسبات تکمیلی جهت برآورد توان مهباز شده انجام گردید.

### ۳. نتایج

همانطور که اشاره شد در نمودار توان با افزایش سرعت/سرعت کاهش/عدد رینالدز، توان مهباز شده نیز بیشتر خواهد شود. در نمودارهای توان حاصل از آزمایش های حاضر برای دو سیلندر مجاز به حرکت در راستای عرضی در بخشی از محدوده ی گالوپینگ، در محدوده ی سرعت های بین  $U < 1/3$  متر در ثانیه، در تمامی نمودارها حداقل یک افت یا یک پرش ناگهانی دیده می شود. این افت و یا پرش بسته به مقادیر  $k$  و یا  $k_{harness}$  متفاوت خواهند بود. جهت بررسی و یافتن دلیل برای این افت ها و پرش ها مشاهدات تکمیلی ای در آزمایشگاه MRElab انجام گرفت. در سری جدید آزمایش ها اقدام به تکرار آزمایش ها با پارامترهای قبل گردید، با این تفاوت که این بار با استفاده از دوربین sony مدل Rx 10 II و اضافه کردن ذرات آلومینیوم اکسید فیلمبرداری دقیقتر و با وضوح بیشتر از هر ران صورت گرفت. در این بخش نتایج حاصل از انجام مجدد آزمایش ها آورده شده است.

شکل ۶ نمایش توان تبدیل شده و توان مهباز شده بر حسب وات در مقابل سرعت/سرعت کاهش/عدد رینالدز می باشد. همانطور که در شکل مشخص است در این آزمایش سختی فنر ( $k$ ) برابر ۸۰۰ (شکل الف) و ۱۲۰۰ (شکل ب) نیوتن بر متر، میرایی نسبی ( $k_{harness}$ ) برابر ۰/۱۶ و فاصله (L/D) برابر ۲/۵۷ می باشد. در باقی نمودارهای حاصل از آزمایش نیز افت ها و پرش ها در شکل نمودارها مشاهده گردید. دلیل انتخاب این نمودارها این است که در فاصله ی ۲/۵۷، افت به وجود آمده در انرژی مهباز شده با تغییر در میرایی و سختی فنر اغلب در

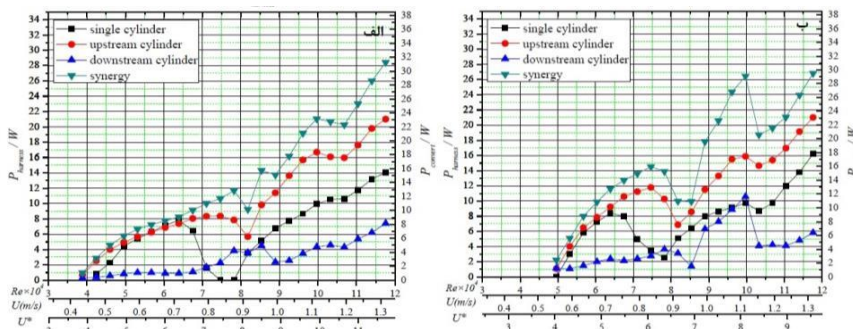
این آزمایش ها در محدوده ی سرعت جریان (U) بین ۰/۳۵ و ۱/۳۵ متر در ثانیه و عدد رینولدز  $30000 \leq Re \leq 120000$  که در رژیم TrSL3 می افتد، قرار می گیرد. با ارزیابی نتایج حاصل از توان مهباز شده این نتیجه حاصل شد که در محدوده ی سرعت  $U < 1/3$  متر در ثانیه معمولا یک افت و یک جهش در توان مهباز شده مشاهده می گردد. هدف این تحقیق بررسی علت حضور افت و پرش و یافتن توضیحی برای حضور این افت و پرش در نمودار توان می باشد. جهت بررسی این موضوع مشاهدات تکمیلی ای در آزمایشگاه دانشگاه میسینگان انجام گرفت. در سری جدید آزمایش ها با استفاده از دوربین سونی مدل آر ایکس II-10 و اضافه کردن ذرات آلومینیوم اکسید فیلمبرداری دقیق تر و با وضوح بیشتر از هر ران صورت گرفت. روش انجام آزمایش ها به این صورت می باشد که با روشن کردن پمپ آب وارد کانال شده و در حین انجام آزمایش ها آب در کانال به گردش در می آید. تمامی تنظیمات پارامترهای آزمایش ها اعم از: سرعت، سختی، میرایی نسبی و دامنه ی نوسانات توسط سیستم  $V_{ck}$  تنظیم می گردد. جرم نسبی سیلندر نیز با قرار دادن سیلندر در غلاف های متعدد قابل تغییر می باشد. با برخورد جریان به سیلندر در جلوی سیلندر گردابه هایی ایجاد شده که این گردابه ها ابتدا سبب نوسان سیلندر بالادست شده و به دلیل اتصال سیلندر به فنر این نوسانات به فنر منتقل می گردد. سیلندر پایین دست نیز به دلیل قرار گرفتن در کفاب سیلندر بالادست شروع به نوسان می کند. برای مشاهده ی بهتر این نوسانات ذرات آلومینیوم اکسید به جریان اضافه

سیلندر در یک جهت نوسان خواهند کرد. به این معنی که هر دو در حال حرکت به سمت بالا یا پایین می‌باشند.

نزدیکی رینالدز  $10500$  رخ می‌دهد و این امر مقایسه را ساده‌تر می‌نمود. در این مرحله ذکر دو تعریف برای حرکت دو سیلندر ضروری است: حرکت هم فاز و حرکت غیر هم فاز. در حالت هم فاز هر دو

فاز	تغییرات توان (%)	افت / پرش	میرایی نسبی	سختی فنر (نیوتن در متر)	$(G10^4)$ عدد رینالدز	سرعت (متر در ثانیه)
غیر هم فاز	-	-	۰/۱۶	۸۰۰	۹/۹۷	۱/۲۱
هم فاز	-۷/۲۳	افت	۰/۱۶	۸۰۰	۱/۰۳	۱/۱۶۱
غیر هم فاز	۱۹/۲۲	پرش	۰/۱۶	۸۰۰	۱/۱	۱/۲۴۲
هم فاز	-	-	۰/۱۶	۱۲۰۰	۹/۹۷	۱/۱۲۱
هم فاز	-۲۵/۵	افت	۰/۱۶	۱۲۰۰	۱/۰۳	۱/۱۶۱
هم فاز	۸/۱۶	پرش	۰/۱۶	۱۲۰۰	۱/۰۷	۱/۲۰۲

جدول ۳- میزان افزایش یا کاهش توان در مقابل تغییرات سرعت



شکل ۶- توان تبدیل شده ( $P_{convert}$ ) و مهار شده ( $P_{harness}$ ) برای (الف)  $k=800$  نیوتن بر متر و (ب)  $k=1200$  نیوتن بر متر و

$$L/D=2/57 \text{ و } \zeta_{harness}=0/16$$

نمایانگر توان مهار شده/تبدیل شده برای یک تک سیلندر در مقابل سرعت/سرعت کاهش/عدد رینالدز می‌باشد. نمودار قرمز، آبی و سبز به ترتیب نمودار توان مهار شده/تبدیل شده برای سیلندر بالادست، پایین دست و سینرژی در مقابل سرعت/سرعت کاهش/عدد رینالدز می‌باشد. در نمودار شکل ۶- الف نقطه‌ی اول مربوط به سرعت  $1/121$  متر در ثانیه می‌باشد. این سرعت در منطقه‌ی گالوپینگ واقع شده و با توجه به روند افزایشی توان در این منطقه روندی قابل انتظار دارد. اما، در نقطه‌ی با سرعت  $1/161$  متر در ثانیه شاهد افت  $7/23$  درصدی در توان بوده که قابل انتظار نیست. این روند کاهش تا سرعت  $1/242$  متر در ثانیه ادامه داشته ولی در سرعت مذکور با یک

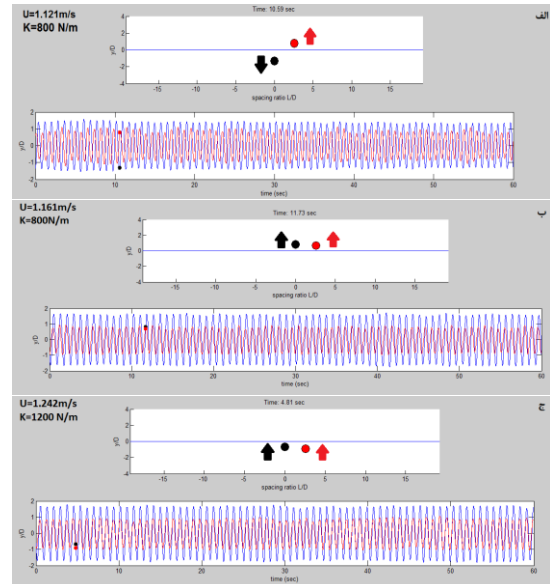
اما در حالت غیر هم فاز زمانی نوسان سیلندرها در جهت عکس می‌باشد، یعنی زمانی که یکی از سیلندرها در حالت حرکت به سمت بالا می‌باشد سیلندر دیگر به سمت پایین در حال حرکت است و یا برعکس. در بررسی اولیه، فرض بر آن شد که پاسخ برای افت یا پرش در  $A/D$  و متعاقب آن انرژی مهار شده ممکن است در تغییر فاز سیلندر از حالت غیر هم فاز به هم فاز و یا برعکس آن باشد. در راستای نیل به پاسخ به این فرضیه، از دوربین sony مدل Rx 10 II برای مشاهده و نرم افزار Matlab جهت تحلیل داده‌ها استفاده گردید. نمودار شکل ۶ در سه نقطه مورد بررسی قرار گرفتند که جزئیات این نقاط در جدول ۳ مشاهده می‌شود. در این نمودار خط مشکی

نوسانات دو سیلندر سه نقطه‌ای متناظر از نمودار شکل ۶- الف- سرعت ۱/۱۲۱، ۱/۱۶۱ و ۱/۲۴۲ متر در ثانیه- را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در برنامه‌ی Matlab این نمودار به صورت انیمیشن متحرک بوده و تنها یک فریم از آن در این نمودارها آورده شده است. دایره‌ی مشکی نمایانگر سیلندر بالادست و دایره‌ی قرمز نمایانگر سیلندر پایین دست می‌باشد. پیکان‌های موجود جهت حرکت سیلندرها را نشان می‌دهند. با توجه به تعاریف ارائه شده از اصطلاحات هم فاز و غیر هم فاز به روشنی مشهود می‌باشد که نوسانات دو سیلندر در شکل ۷- الف که مربوط به سرعت ۱/۱۲۱ متر در ثانیه می‌باشد و در نمودار شکل ۶- الف نقطه‌ای است که در آن توان مهار شده روند طبیعی خود را دارد، غیر هم فاز ولی در دو شکل ۷- ب و ج هم فاز می‌باشد. لازم به یادآوری می‌باشد که شکل ۷- ب مربوط به سرعت ۱/۱۶۱ متر در ثانیه و در نمودار شکل ۶- الف نقطه‌ای است که در آن توان مهار شده دچار افت ناگهانی می‌شود و همچنین شکل ۷- ج مربوط به سرعت ۱/۲۴۲ متر در ثانیه و در نمودار شکل ۶- الف نقطه‌ای است که در آن توان مهار شده دچار پرش ناگهانی شده و پس از این نقطه نمودار مجدداً روند نرمال افزایشی خود را ادامه خواهد داد.

برای درک بهتر و اثبات این موضوع برنامه‌ی Matlab در سه نقطه برای سختی فنر ۱۲۰۰ نیوتن بر متر و میرایی نسبی ۰/۱۶ نیز ترسیم گردید. شکل ۸- الف برای جریان با سرعت ۱/۱۲۱ متر در ثانیه، سختی فنر ۸۰۰ نیوتن بر متر و میرایی نسبی ۰/۱۶ ترسیم شده است. به همین ترتیب اشکال ۸- ب و ج به ترتیب نمایشگر جریان با سرعت ۱/۱۶۱ و ۱/۲۰۲ متر در ثانیه، سختی فنر ۱۲۰۰ نیوتن بر متر و میرایی نسبی ۰/۱۶ می‌باشند. نمودار بالایی شکل ۸- الف، ب و ج حرکت دو سیلندر را نشان می‌دهند. در واقع، شکل ۸- الف، ب و ج نوسانات دو سیلندر برای سه نقطه از نمودار شکل ۶- ب- سرعت ۱/۱۲۱، ۱/۱۶۱ و ۱/۲۰۲ متر در ثانیه- را نشان می‌دهند.

پرش مجدداً به سیر صعودی خود باز می‌گردد. نمودار شکل ۶- ب نیز به همین منوال می‌باشد. به این ترتیب که در سرعت ۱/۱۶۱ متر در ثانیه شاهد افت شدید به مقدار ۲۵/۵ درصد و در سرعت ۱/۲۰۲ متر در ثانیه پرشی با افزایش ۸/۱۶ درصد در توان مشاهده می‌شود. جهت بررسی بهتر، حرکت نوسانی دو سیلندر در برنامه‌ی Matlab اجرا گردید. نتایج حاصل در اشکال ۸ و ۹ مشاهده می‌شود.

همانطور که گفته شد این پژوهش با این فرض انجام شد که بین تغییر فاز در نوسانات دو سیلندر - از هم فاز به غیر هم فاز و یا برعکس- و پرش یا افت ناگهانی در نقاطی از نمودار رابطه‌ی معناداری وجود داشته باشد.

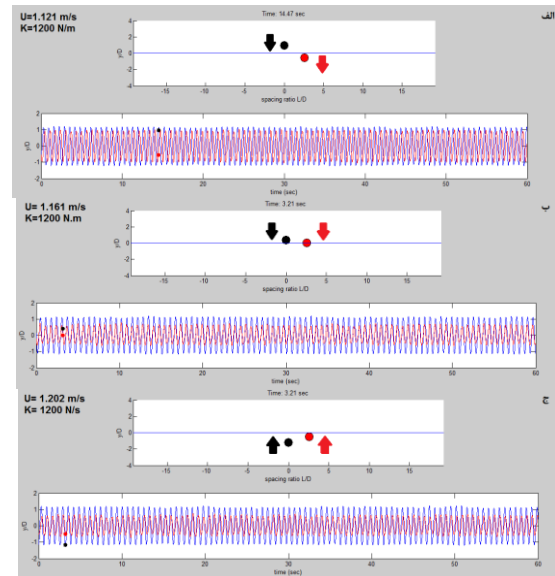
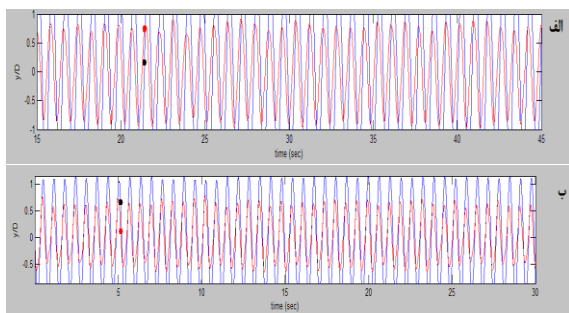


شکل ۷- شکل شماتیک حرکت دو سیلندر اجرا شده توسط برنامه Matlab برای  $K=800$  نیوتن بر متر و  $\zeta=0.16$  (الف) (سرعت ۱/۱۲۱ (ب) ۱/۱۶۱ (ج) ۱/۲۴۲ متر در ثانیه

شکل‌های ۷ و ۸ با هدف روشن شدن این موضوع از برنامه‌ی Matlab استخراج شد. شکل ۷- الف برای جریان با سرعت ۱/۱۲۱ متر در ثانیه، سختی فنر ۸۰۰ نیوتن بر متر و میرایی نسبی ۰/۱۶ ترسیم شده است. به همین ترتیب اشکال ۷- ب و ج به ترتیب نمایشگر جریان با سرعت ۱/۱۶۱ و ۱/۲۴۲ متر در ثانیه، سختی فنر ۸۰۰ نیوتن بر متر و میرایی نسبی ۰/۱۶ می‌باشند. در واقع، شکل ۷- الف، ب و ج



با فیلم‌های برداشت شده از این آزمایش‌های گویای این مطلب است که سیلندر بالادست نوسانات سیلندر پایین دست را رهبری می‌کند. به این معنی که نوسانات سیلندر پایین دست در سرعت  $1/161$  متر در ثانیه در هر دو آزمایش متاثر از ناحیه‌ی کف آب سیلندر بالادست می‌باشد. این در حالی است که این مساله در هیچ یک از دو آزمایش انجام شده در سرعت  $1/121$  متر در ثانیه دیده نمی‌شود. با مشاهده‌ی اشکال ۷ و ۸- الف مشاهده می‌شود که دامنه‌ی نوسانات هر دو سیلندر تقریباً برابر بوده - برای سیلندر بالادست اندکی بیشتر می‌باشد- و همچنین آهنگ نوسانات سیلندر بالادست مستقل از سیلندر پایین دست می‌باشد. پس می‌توان ادعا نمود که در نقطه‌ای که افت در میزان توان مهار شده به وجود آمده است، سیلندر پایین دست متاثر از کف آب سیلندر بالادست می‌باشد. این مساله را به این صورت می‌توان بیان نمود که در این سرعت خاص ( $1/121$  متر در ثانیه) برای دو آزمایش مذکور با تغییر در الگوی نوسانات دو سیلندر افت به میزان  $7/23$ - درصد به ازای سرعت  $1/121$  متر در ثانیه و سختی  $800$  نیوتن در متر و میرایی نسبی  $0/16$  و افت به میزان  $25/5$ - درصد به ازای سرعت  $1/121$  متر در ثانیه و سختی  $1200$  نیوتن در متر و میرایی نسبی  $0/16$  وجود خواهد داشت. در این الگوی خاص، سیلندر پایین دست کاملاً تحت تاثیر گرداب‌های جاری شده از سیلندر بالادست خواهد بود، این در حالی است که در سرعت بالاتر و پایین‌تر از این نقطه این پدیده مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۸- شکل شماتیک حرکت دو سیلندر اجرا شده توسط برنامه Matlab برای  $K=1200$  نیوتن بر متر و  $\zeta_{\text{harness}}=0/16$  (الف) سرعت  $1/121$  (ب)  $1/161$  (ج)  $1/202$  متر در ثانیه

با توجه مشاهدات و جهت نوسانات سیلندر این مطلب روشن است که در نقاط مذکور حرکت دو سیلندر نسبت به هم در هر سه نقطه‌ی مستخرج از نمودار (افت، پرش و بدون تغییر)، هم فاز بوده، بدین معنی که فارغ از افت یا پرش در مقدار توان مهار شده حرکت دو سیلندر در حال نوسان هم جهت هم می‌باشد. با مقایسه‌ی دو شکل ۷ و ۸ می‌توان دریافت که هر دو ستاپ انتخاب شده در سرعت  $1/161$  متر در ثانیه که سرعت متناظر با نقطه‌ای است که در آن افت رخ می‌دهد، نوسانات مربوط به دو سیلندر هم فاز می‌باشد. اما نکته‌ای که علاوه بر نوسانات هم فازی و غیر هم فازی مورد توجه در این تحقیق می‌باشد، واکنش سیلندر پایین دست در برابر کف آب سیلندر بالادست می‌باشد. با دقت در دو شکل ۷- ب و ۸- ب این موضوع مشخص می‌باشد. در شکل ۹ نمایش دقیق‌تر با بزرگنمایی نوسانات و نحوه‌ی حرکت دو سیلندر نسبت به هم برای دو شکل ۷- ب و ۸- ب قابل مشاهده می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود که دامنه‌ی نوسانات سیلندر پایین دست کوچکتر از دامنه‌ی نوسانات سیلندر بالادست می‌باشد و همچنین

Bearman P. W. 2011. Circular Cylinder Wakes and Vortex-Induced Vibrations, *J. Fluid Mech* 27: 648–658.

Bernitsas M. M., Ben-Simon Y., Raghavan K., and Garcia E. M. H., 2006b, The VIVACE converter: Model tests at high damping and Reynolds number around 105, *Proceedings 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, Hamburg, Germany, 4-9 June 2006*; ASME Transactions, *JOMAE* Feb. 2009. 131(1): 1-13.

Bernitsas M., M. and Raghavan K. 2007a, Enhancement of vortex induced forces & motion through surface roughness control, U.S. Provisional Patent Application, United States Patent and Trademark Office, Patent# 8,042,232 November 1. 2011.

Govardhan R. Williamson C.H.K. 2000. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *J. Fluid Mech.* 420: 85–130.

Park H., R. 2012. Mapping of Passive Turbulence Control to Flow Induced Motions of Circular Cylinders. Ph.D. dissertation. University of Michigan, USA.

Sarpkaya T. 2004. A Critical Review of the Intrinsic Nature of Vortex- Induced Vibrations. *J. Fluids Structures.* 19(4): 389–447.

Sun Q., Alam Md. M., and Zhou Y. 2015. Fluid-Structure Coupling between Two Tandem Elastic Cylinders, *Procedia Engineering.* 126: 564-568.

To A. P., Lam K. M., 2007. Flow-induced vibration of a flexible mounted circular cylinder in the proximity of a larger cylinder downstream, *Journal of Fluids and Structures.* 23: 523-528.

Williamson C. H. K. and Govardhan R. 2004. Vortex-Induced Vibrations. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36: 413–455.

Zdravkovich M. M., 1977a. Review of Flow Interference between Two Circular Cylinders in Various Arrangements. *Journal of Fluids Engineering.* 99: 618–633.

Zdravkovich M., M. 1997. in: E. Achenbach (Ed.), *Flow Around Circular Cylinders.* vol. 1. Oxford University Press. Oxford. UK.

Zdravkovich M., M. 2002. in: E. Achenbach (Ed.), *Flow Around Circular Cylinders.* vol. 2. Oxford University Press. Oxford. UK.

شکل ۹- شکل شماتیک بزرگنمایی شده ی نوسانات دو سیلندر برای و  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  الف) سرعت  $1/161 = K$   $800 = K$  نیوتن بر متر ب)  $1/161$  متر در ثانیه  $K = 1200$  نیوتن بر متر

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

استفاده از دو سیلندر به جای یک تک سیلندر میزان توان مهار شده را افزایش داده و الگوی جریان اطراف سیلندر را پیچیده تر می نماید.

نتایج حاصل از آزمایش ها نشان می دهد برای سختی فنر  $800$  نیوتن بر متر و میرایی نسبی  $0.16$  توان مهار شده در سرعت  $1/161$  متر در ثانیه به میزان  $7/23$  درصد کاهش داشته و در سرعت  $1/242$  متر در ثانیه نسبت به سرعت  $1/161$  متر در ثانیه  $19/22$  درصد افزایش داشته است. آزمایش با سختی فنر  $1200$  نیوتن بر متر و میرایی نسبی  $0.16$  توان مهار شده در سرعت  $1/161$  متر در ثانیه به میزان  $8/16$  درصد کاهش داشته و در سرعت  $1/202$  متر در ثانیه نسبت به سرعت  $1/121$  متر در ثانیه  $25/5$  درصد افزایش داشته است. در نقطه ای که افت در میزان توان مهار شده به وجود آمده است، نوسانات دو سیلندر به صورت هم فاز بوده و سیلندر پایین دست متاثر از کف آب سیندر بالادست می باشد.

#### منابع

Assi G. R. S., 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: 365–401.

Assi G. R. 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: 819–827.

Bearman P. W. 1984. Vortex Shedding From Oscillating Bluff Bodies, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 16 (1): 195–222.

## Investigation of Variation in Galloping Region on Harnessed Power for Two Tandem Cylinders

Atashi, Vida\* . Ghomeshi, Mehdi

Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

### Abstract

In this paper, the effect of in phase or out of phase fluctuation of two tandem circular cylinders with PTC on FIM is investigated. Flow-Induced Motion (FIM) is a phenomenon that frequently occurs when slender structures are subjected to a transverse fluid flow. VIV and galloping are the most common phenomena in FIM which occurs due to interaction between shear layers and wakes of upstream cylinders. In this paper, the effect of tandem spacing on FIM of two circular cylinders with PTC is investigated by visualization. The power harness graphs for upstream, downstream and synergy was extracted with VIVACE. The VIVACE consists of a rigid bluff body that is mounted on an elastic base and exposed to fluid flow. The mechanical energy from the cylinder vibration is also transmitted by a PTO to a generator. Normally, the harness power in galloping region increases with increasing in flow velocity and Reynolds number. Unlike what was expected, drops and jumps in Power harness in the velocity range of  $0.9 < u < 1.3 \text{ m/s}$  were observed in the galloping region. The objective of this paper is to find the reason for the presence of these drops and jumps. Results show that the reason for a 7.23 and 25.5 percent drop in power harness for spring stiffness of 800 and 1200 N/m is the changes in pattern fluctuations of the downstream cylinder.

**Keywords:** Harnessed Power, Galloping, Out of phase, In phase

**Figure 1.** Two-cylinder arrangement (a) tandem, (b) side by side and (c) staggered

**Figure 2.** Categorization of the interaction of flow regimes

**Figure 3.** (a) Schematic of the LTFSW channel- (b) Real LTFSW channel

**Figure 4.** VIVACE Converter in the LTFSW Channel with  $V_{CK}$  system: Schematic of a single-cylinder VIVACE Converter (Left) and Four-cylinders VIVACE (Right)

**Figure 5.** Configuration of the passive turbulence control (PTC) on the cylinder

**Figure 6.** Harnessed Power and Converted Power curves for  $m^* = 1.343$  and  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  a) with  $K = 800 \text{ N/m}$  spacing  $L/D = 2.57$  b) with  $K = 1200 \text{ N/m}$  spacing  $L/D = 2.57$

**Figure 7.** Time history for two tandem cylinders run by Matlab at drop a)  $U = 1.121 \text{ m/s}$ ,  $K = 800 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  b)  $U = 1.161 \text{ m/s}$ ,  $K = 800 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  and c)  $U = 1.202 \text{ m/s}$ ,  $K = 800 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  (for 60 seconds)

**Figure 8.** Time history for two tandem cylinders run by Matlab at drop a)  $U = 1.121 \text{ m/s}$ ,  $K = 1200 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  b)  $U = 1.161 \text{ m/s}$ ,  $K = 1,200 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  and c)  $U = 1.202 \text{ m/s}$ ,  $K = 1,200 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  (for 60 seconds)

**Figure 9.** Time history for two tandem cylinders at drop a)  $U = 1.161 \text{ m/s}$ ,  $K = 800 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  b)  $U = 1.161 \text{ m/s}$ ,  $K = 1,200 \text{ N/m}$ ,  $\zeta_{\text{harness}} = 0.16$  and  $L/D = 2.57$  (for 30 seconds)

**Table 1.** Particulars of two cylinders VIVACE Converter

**Table 2.** PTC strip detail

**Table 3.** Test Matrix existing local drops and jumps according to spacing ( $L/D$ ) parameters.

\* Corresponding author, E-mail: [vida.atashi@yahoo.com](mailto:vida.atashi@yahoo.com)