

# روش‌های کنترل انفعالی ارتعاشات القایی گردابه‌ها و کاربرد آن در سازه‌دریایی

انوشیروان فرشیدیان‌فر، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

farshid@ferdowsi.um.ac.ir

نادر دولت‌بادی، دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

na\_do342@stu-mail.um.ac.ir

## چکیده

ارتعاشات القایی گردابه پدیده‌ای است که در آن یک جسم با جریان سیال متقابل دارد. زمینه‌های بسیاری وجود دارد که این پدیده را می‌توان مشاهده نمود از جمله در لوله‌های مبدل‌های حرارتی، سازه‌های دریایی، پلها، خطوط انتقال برق، ساختمان‌های مرتفع و غیره. به سبب ارتعاشات القایی گردابه‌ها، سازه‌ها می‌توانند با ارتعاشات با دامنه زیادی عمود بر جهت جریان مواجه شوند که منجر به از کارافتادگی و خستگی سازه می‌گردد. بنابراین کنترل این پدیده و حتی تعدیل آن برای موقعیت‌هایی مانند سازه‌های بکار گرفته شده در زیر آب که تعمیر و کار در چنین شرایطی دشوار و پرهزینه می‌باشد، دارای اهمیت زیادی خواهد بود. این موضوع به دو روش کنترل انفعالی و فعال صورت می‌پذیرد. در این مقاله به روش‌های کنترل انفعالی بخصوص اختراعات اخیر در این زمینه پرداخته می‌شود. در این بررسی نشان داده می‌شود که وسایل کنترل انفعالی همچون باله‌های شکل دهنده خطوط جریان و تیغه‌های مارپیچی با حفاظت سازه‌های دریایی در برابر ارتعاشات القایی گردابه‌ها، عمر آنها را افزایش می‌دهند، نهایتاً به نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده در مورد ابزارهای کنترل پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جسم بلاف<sup>۱</sup>، خط جریان<sup>۲</sup>، ارتعاشات القایی سیال<sup>۳</sup>، گردابه<sup>۴</sup>، کنترل انفعالی<sup>۵</sup>، سرعت کاهش<sup>۶</sup>

## مقدمه

علم و دانش بشری، نیاز برای شناخت رفتار سیالات گوناگون در تقابل با سازه‌ها بوجود آمد. در این راستا شاخه‌ای از مطالعات در زمینه علم مکانیک که تلفیقی از مکانیک سیالات و جامدات می‌باشد، به بررسی

بشر از ابتدای زندگی خود همواره با جریان‌های مختلف سیال تعامل داشته است. ابتدائی‌ترین سیالات اتمسفر و آب می‌باشند. با گذشت زمان و پیشرفت در

ارتعاشات ناشی از جریان سیال در اطراف سازه‌ها می‌پردازد. نمونه‌ای از این ارتعاشات که با ساده‌ترین امکانات قابل مشاهده می‌باشد عبارت است از یک میله یا چوب با ارتفاع مناسب که از یک سو با دست و از سمت دیگر درون استخری قرار داده شده است و سعی می‌شود میله در یک مسیر مستقیم در آب حرکت کند. مشاهده می‌شود که انتهای درون آب تمایل به انحراف در جهت عمود بر مسیر حرکت را خواهد داشت. این حرکت، نوعی نوسان ناشی از اثر متقابل سیال و سازه با دامنه محدود می‌باشد که از گردابه‌های تشکیل شده در پشت جسم تاثیر می‌پذیرد (شکل ۱) [۱].



شکل (۱) - تاثیر متقابل سیال و سازه و تشکیل گردابه در پشت جسم

این پدیده در شاخه‌های زیادی از مهندسی و کاربردهای روزمره قابل رویت می‌باشد. از جمله می‌توان به ساختمان‌های مرتفع، پل‌ها، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، سازه‌های دریایی، خطوط لوله انتقال نفت و گاز، کابل‌ها، دودکش‌های صنعتی و غیره اشاره کرد. از تاثیرات مخرب پدیده ارتعاشات القایی سیال مثال‌های زیر قابل ذکر می‌باشند:

در سال ۱۹۶۰ در اثر تاثیر جریان باد ۳ برج از ۸ برج خنک‌کن نیروگاه فری بریج<sup>۷</sup> انگلستان بطور کامل از

بین رفت. نمونه دیگر پل تاکوما<sup>۸</sup> است که در تاریخ ۷ نوامبر ۱۹۴۰ در اثر ایجاد گردابه‌ها در اطراف پل، بعد از مدت ۳۰ دقیقه و با دامنه نوسانات حدود ۱۴ فوت، سازه فرو ریخت (شکل ۲).

تاکنون مطالعات زیادی بر روی این پدیده صورت گرفته است. در این مقاله از بحث‌های تئوری محاسباتی صرف نظر شده و تنها به روش‌های کنترل انفعالی ارتعاشات القایی پرداخته می‌شود. در همین راستا از بین تمامی روش‌های کنترل، روش‌هایی که بیشتر مرتبط با سازه‌های دریایی می‌باشند مورد بررسی قرار خواهند گرفت. پیش از آنکه مکانیزم‌ها توصیف گردند، بمنظور درک بهتر، نیاز است تا تعاریف اولیه در رابطه با ارتعاشات القایی گردابه‌ها توضیح داده شوند.

### ارتعاشات القایی سیال چیست؟

ارتعاشات القایی ناشی از جریان سیال در اطراف یک جسم، پدیده‌ای غیرخطی، خودمحرک و چند درجه آزادی است. این پدیده تنها برای اجسام بلافاصله قابل بروز می‌باشد. جسم بلافاصله جسمی است که در اثر عبور جریان از پهن‌ترین قسمت آن، در مسیر جریان سیال جدایش اتفاق بیافتد یا بعبارت دیگر دنباله‌ای در پشت جسم تشکیل گردد (شکل ۳) [۲].

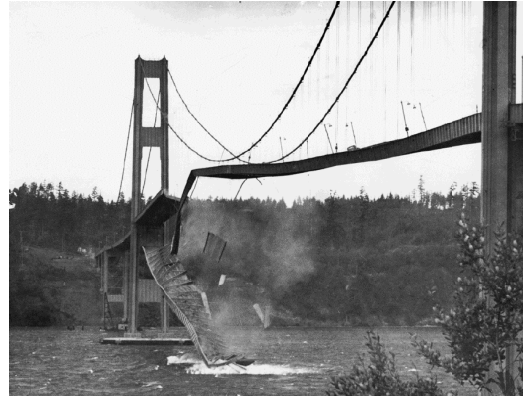
ارتعاشات القایی سیال خود به چهار دسته تقسیم می‌شود. این چهار دسته عبارتند از:

- ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها<sup>۹</sup>
- ارتعاش شلاقی<sup>۱۰</sup>
- ارتعاش لرزشی<sup>۱۱</sup>
- ارتعاش مغشوش<sup>۱۲</sup>

در این مقاله بطور مفصل به ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها پرداخته خواهد شد.



۲-د) - دودکش مجهز به تیغه‌های مارپیچ



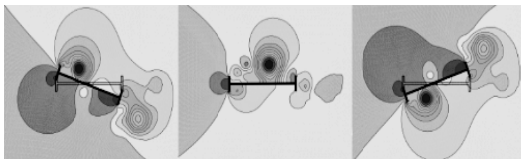
شکل (۲-الف) - نمونه‌ای از سازه‌های در معرض جریان سیال و مستعد برای ارتعاشات القایی گردابه‌ای



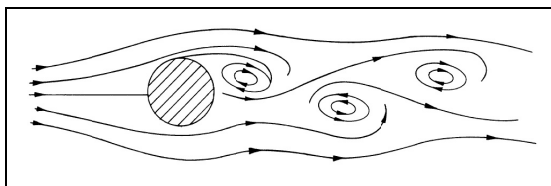
۲-ه) - برج‌های خنک‌کن نیروگاه فوری بریج انگلستان بعد از بازسازی



۲-ب) سازه دریایی



۲-و) - مدلسازی گردابه‌ها در پل تاکوما و تخریب آن تحت نوسانات گردابه‌ای

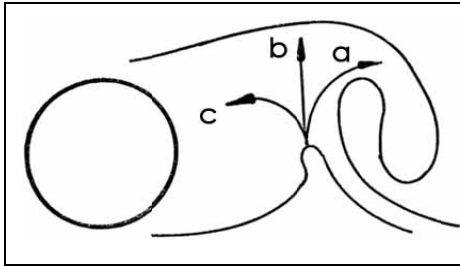


شکل (۳) - دنباله و مدل گردابه‌ها در اطراف جسم بلاف

در مورد سه نوع دیگر ارتعاشات نیز باختصار توضیحاتی داده می‌شود. ارتعاش شلاقی، ارتعاشات القایی خود محرک سیال با فرکانس پائین و دامنه نوسانات بالا است که بصورت تک بعدی و در جهت عمود بر جریان سیال اتفاق می‌افتد. این پدیده در خطوط انتقال برق فشار قوی قابل رویت می‌باشد.



۲-ج) - نیروگاه بادی بینالود



شکل (۴) - مسیرهای محتمل جریان درون دنباله

مکانیزم‌های کنترل انفعالی ارتعاشات القایی گردابه‌ها را بهتر درک کرد. این مکانیزم‌ها عبارتند از:

- افزایش میرایی
  - جلوگیری از تشدید
  - افزودن شکل هندسی برای منظم کردن خطوط جریان
  - وسایل افزودنی دیگر
  - اصلاح سطح جسم
  - اصلاح لایه مرزی
  - استفاده از یک جسم کنترلی
- در ادامه به توضیح هرکدام از این روشها خواهیم پرداخت.

### افزایش میرایی

بدین منظور دو راه حل پیش رو می‌باشد. ابتدا می‌توان در سرعت‌های پائین جریان سیال، با افزایش لزجت، میرایی سیستم را بین گردابه‌ها و سازه افزایش داد [۴]. بدین منظور از سرعتی تحت عنوان سرعت کاهیده، برای مقیاس استفاده می‌شود که نسبت سرعت آزاد سیال به حاصلضرب فرکانس در قطر جسم است (رابطه ۱):

$$V_r = \frac{U}{fD} \quad (1)$$

از آنجا که بسیاری از سازه‌ها همچون ساختمان‌های مرتفع، پل‌ها و سازه‌های دریایی در اتمسفر و آب دریا

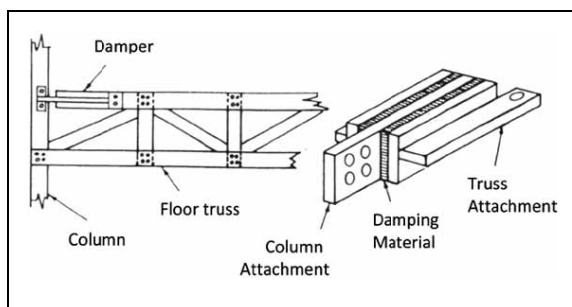
ارتعاش لرزشی شبیه به ارتعاش شلاقی می‌باشد با این تفاوت که لزوماً تک بعدی نیست. این ارتعاشات در سطوح کنترل هواپیما نمایان می‌شوند. ارتعاش مغشوش ارتعاشات ناشی از آشفتگی موجود در جریان سیال می‌باشد. نمونه‌های مورد بررسی این پدیده همچون ساختمان‌های مرتفع و پل‌ها می‌باشند.

در این قسمت ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها بررسی می‌گردد. در اثر تشکیل دنباله در پشت جسم، سرعت سیال درون دنباله نسبت به سرعت سیال پیرامون کمتر خواهد بود. لذا ذرات سیال بیرون از دنباله تمایل به تغییر مسیر بدرون دنباله خواهند داشت. پس از وارد شدن لایه برشی یا همان خط جریان سیال بدرون دنباله سه حالت ممکن است اتفاق بیافتد. این سه حالت در شکل (۴) نشان داده شده اند [۳]. اگر بعد از انحراف خط جریان بدرون دنباله، سرعت سیال درون دنباله بقدر کافی زیاد باشد می‌تواند ذرات را در مسیر  $a$  بحرکت درآورد، لذا گردابه تشکیل خواهد شد. این فرآیند سبب ایجاد تغییرات فشار در محل شروع دنباله در اطراف جسم خواهد شد که منجر به نوسانات جسم درون سیال می‌گردد. حال اگر سرعت درون دنباله بمقدار کافی زیاد نباشد، سیال می‌تواند هرکدام از مسیرهای  $b$  و  $c$  را بپیماید که نتیجه آن ایجاد گردابه نخواهد بود. هرگاه فرکانس گردابه‌های درون سیال با فرکانس طبیعی جسم برابر شود، قفل شدن ارتعاشات و یا تشدید اتفاق خواهد افتاد.

### روش‌های کنترل انفعالی ارتعاشات القایی گردابه‌ها

روش‌های مختلفی جهت کنترل انفعالی ارتعاشات القایی گردابه‌ها وجود دارد. با توجه به توضیحات فوق می‌توان نحوه عملکرد و تاثیرگذاری هریک از

می‌باشد میرا می‌سازد. ابتدا با کمک وزنه‌هایی که توسط یک رشته سیم به هم وصل شده‌اند، نیرویی خارج از فاز نیروی ارتعاش ایجاد نموده و بدینوسیله ارتعاشات را میرا می‌سازد. روش دوم توسط اصطکاک موجود بین رشته سیم‌های متصل‌کننده این دو وزنه کوچک می‌باشد که بصورت حرارت و اصطکاک، انرژی را تلف می‌سازد. مثال دیگر از این دسته، استفاده از لایه‌های لاستیکی در بین تیرهای تشکیل‌دهنده سازه‌ها می‌باشد (شکل ۶).



شکل (۶) - میراکننده خارجی لاستیکی بین سازه‌ها

### جلوگیری از تشدید

با افزایش استحکام سازه می‌توان فرکانس طبیعی سازه را به مقادیر بالاتر منتقل کرد. به عبارت دیگر، فاصله فرکانس طبیعی سیستم را با فرکانس ناشی از جریان سیال و گردابه‌ها افزایش داد اما بهبود استحکام سازه وابسته به علم مواد است که در هر زمان محدود به علم بشر می‌باشد.

### منظم کردن خطوط جریان

از آنجا که ابتدائی‌ترین دلیل بروز ارتعاشات القایی گردابه‌ها نوسانات فشار در اطراف جسم می‌باشد، لذا با استفاده از شکل‌های هندسی شبیه به قطره آب که کمترین مقاومت را در جریان ایجاد کرده و خطوط جریان را تنظیم می‌نمایند، تاثیرات متقابل سیال و سازه

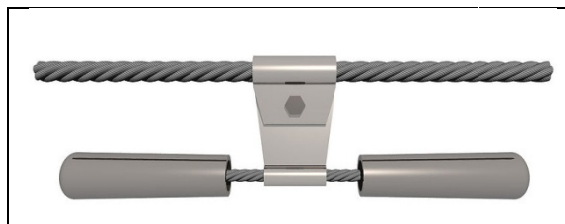
و اقیانوس بنا می‌شوند، لذا امکان کنترل لزجت سیال مقدور نمی‌باشد. به همین علت کنترل بر روی افزایش میرایی خود سازه محتمل‌تر بنظر می‌رسد. پارامتر تاثیرگذار بر روی میرایی سازه عدد میرایی کاهیده اسکراتون<sup>۱۳</sup> می‌باشد. این پارامتر توسط رابطه (۲) تعریف می‌شود که در آن  $m$  جرم واحد طول سازه،  $\delta$  کاهش لگاریتمی،  $D$  قطر جسم،  $\rho$  چگالی و  $K_S$  عدد میرایی کاهیده اسکراتون می‌باشد. برای اعداد اسکراتون بالاتر از ۶۴، رابطه (۲)، ماکزیمم دامنه در رزونانس تا مقدار ۱ درصد طولی از جسم که عمود بر جریان است (قطر)، کاهش می‌یابد [۵]:

$$k_s = \frac{2m\delta}{\rho D^2} \quad (2)$$

برای کنترل میرایی سازه نیز دو راه وجود دارد:

- افزایش میرایی داخلی
- افزایش میرایی خارجی

بمنظور افزایش میرایی داخلی می‌توان از مواد با میرایی بالا مانند مواد ویسکوالاستیک در ساختار سازه استفاده کرد [۵]، بعنوان مثال پرچ دارای این خاصیت می‌باشد. در اتصالات برج ایفل در فرانسه از پرچ استفاده شده است.



شکل ۵- نمونه‌ای از استک بریج

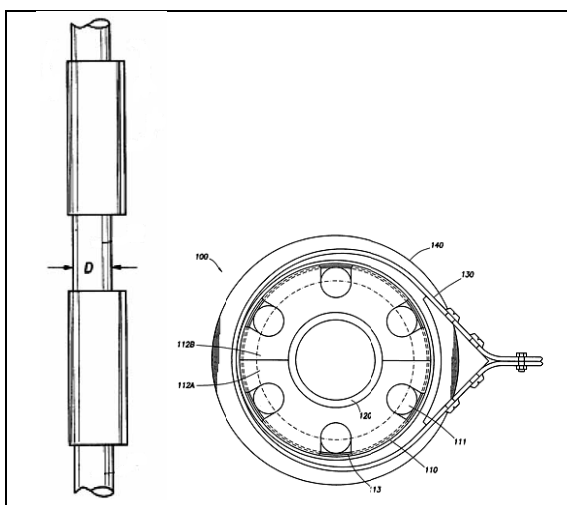
میرایی خارجی مانند استک بریج<sup>۱۴</sup> (شکل ۵) که در خطوط انتقال برق استفاده می‌شود [۶]. این وسیله به دو روش ارتعاشات سیستم را که ناشی از ارتعاش شلاقی

مقایسه با باله‌های بلند می‌باشد (شکل ۸). همچنین کار با این نوع سیستم آسانتر بوده و در یک بازه گسترده از عدد رینولدز دامنه پاسخ کاهش می‌یابد. باله‌های کوتاه را می‌توان بصورت چندتایی در جهات مختلف نصب کرد، بنابراین برای زاویه حمله‌های گسترده‌ای از جریان سیال، قابلیت کنترل ارتعاش وجود دارد.



شکل (۷) - نمونه‌ای از باله‌های خط جریان

شکل (۹) تاثیر این نوع باله را بر روی دامنه نوسانات و ضریب درگ نشان می‌دهد [۷]. هم دامنه و هم ضریب درگ، بعد از نصب باله به بیش از نیمی از مقدار قبلی خود کاهش یافته‌اند.

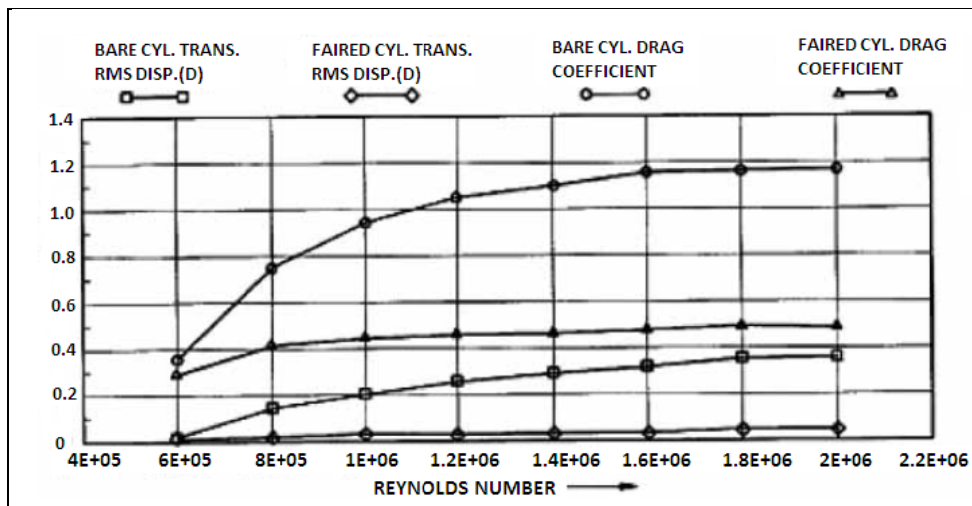


شکل (۸) - باله‌های خیلی کوتاه به همراه نمای بالایی

را کم می‌کنند. منظم کردن خطوط جریان در مواردی بیشترین تاثیر را دارد که جهت جریان ثابت بوده و سازه استحکام کافی برای جلوگیری از ارتعاش لرزشی را داشته باشد [۵]. ابزار مورد استفاده در تنظیم خطوط جریان به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

**باله‌های خط جریان:** این باله‌ها قطره آب نیز نامیده می‌شوند زیرا به شکل مقاطع ایرفویل مانند کوتاه می‌باشند (شکل ۷). این ابزار یکی از موثرترین وسایل برای تعدیل ارتعاشات القایی سیال می‌باشد. مشاهده شده است که ارتعاشات را تا ۸۰ درصد با ضریب درگ بین ۰/۱ تا ۰/۳ کاهش می‌دهد و قادر به چرخش آزادانه حول لوله بوده که می‌تواند با جهت جریان، خود را تنظیم نماید. بنابراین نیروهای القا شده کم می‌شوند. این مقاطع با کمک اتصال محوری از یکدیگر جدا می‌شوند که در عین حال امکان چرخش در آنها باقی می‌ماند. از این باله‌ها بطور گسترده در محیط‌های دریایی و در آبهای عمیق استفاده می‌شود. معمولاً این وسیله برای نسبت طول باله به قطر<sup>۱۵</sup> بیشتر از ۲ طراحی می‌شود. از دیگر کاربردها می‌توان به لوله‌های انتقال نفت و گاز اشاره کرد. اما با تمام تاثیرگذاری، باله‌ها معایبی نیز دارند مانند گران بودن و ابعاد بزرگ. همچنین کار کردن با آنها سخت می‌باشد و بدلیل کم دقتی هنگام نصب ممکن است شکل قطره‌ای خود را از دست بدهند و یا با مرور زمان با افزایش زبری سطح، تاثیرگذاری آنها کم شود.

**باله‌های خیلی کوتاه:** آلن و هیننگ<sup>۱۶</sup> در سال ۲۰۰۱ این نوع باله‌ها را ابداع کردند تا ارتعاشات القایی را در سازه‌های استوانه‌ای شکل دریایی، بویژه خطوط لوله زیر دریا، رایزرهای تولید محصول و دریل، کابل‌ها و سایر ابزارهای موجود در آبهای عمیق کاهش دهند [۷]. مزیت این باله‌ها در درگ کمتر آنها بهمراه کاهش وزن سازه در



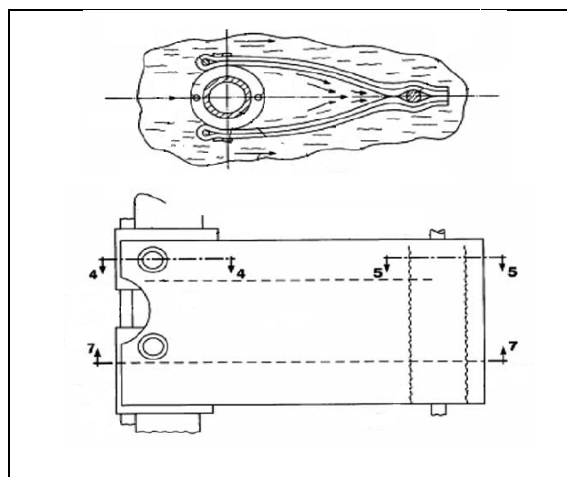
شکل (۹) - تاثیر باله‌های خیلی کوتاه بر درگ و دامنه نوسانات

**باله‌های دوار:** باله‌های دوار این مزیت را دارا هستند که تحت بازه گسترده‌ای از زاویه حمله سیال می‌توانند عمل نمایند بدون آنکه در کارایی اثرودینامیکی تاثیر بگذارند. در باله‌های دوار کوتاه (نسبت‌های کم طول باله به قطر) بسیار محتمل است که ناپایداری‌های ارتعاش شلاقی و ارتعاش لرزشی را تجربه کنیم. بمنظور جبران این ناپایداری می‌توان باله را باندازه کافی طولتر ساخت، اما در مقابل وزن سازه بیشتر و تعمیرپذیری آن کمتر خواهد شد. بعلاوه درگ افزایش می‌یابد و همچنان احتمال ارتعاش شلاقی نیز وجود خواهد داشت. بمنظور رفع این مشکل، هالور لی [۹] (سال ۲۰۰۷) از یک پمپ تعدیل‌کننده انرژی استفاده کرده است تا با ناپایداری‌های محتمل مقابله نماید (شکل ۱۱).

#### وسایل افزودنی دیگر:

باله‌ها نیز بنحوی جزو وسایل افزودنی به سیستم محسوب می‌شوند. در این قسمت به توضیح سایر ابزارهای کنترل انفعالی پرداخته می‌شود.

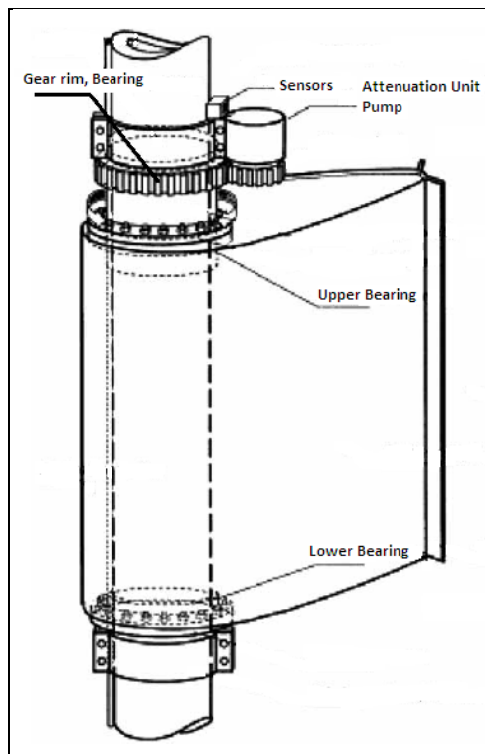
**باله‌های پلاستیکی منعطف:** اختراع دیگری که توسط کوکلی و ناتسون<sup>۱۷</sup> در سال ۲۰۰۳ ثبت شده است، باله‌هایی است از جنس ورقه‌های پلاستیکی و به نحوی روی سازه دریایی نصب می‌شوند که بدلیل فشار دینامیکی جریان در حال گذر، متورم شده و شکل منظم خطوط جریان را به خود گرفته و سبب تضعیف ارتعاشات القایی و تاثیرات گردابه‌ها می‌شود (شکل ۱۰) [۸].



شکل (۱۰) - باله‌های پلاستیکی منعطف - نمای بالا و نمای جانبی

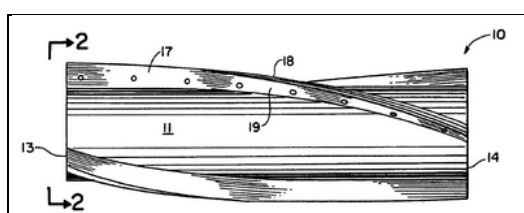
استفاده می‌شود. این روش موثر و اقتصادی می‌باشد اما در مقابل ضریب درگ را افزایش می‌دهد. افزایش درگ منجر به افزایش نیروهای در مسیر جریان می‌گردد. از دیگر معایب این روش کاهش تاثیر تیغه‌ها در اثر افزایش سرعت کاهیده و آشفته‌گی موجود در جریان می‌باشد [۱۱]. اخیرا یک سیستم تیغه‌ای مارپیچ توسط آلن<sup>۱۹</sup> در سال ۲۰۰۳ معرفی شده که در آن مارپیچ‌ها بصورت جزئی روی محیط نصب شده‌اند (حدود ۵۰ درصد) [۱۲].

**پوشش سوراخدار:** این وسیله شامل یک لایه نازک فلزی سوراخدار می‌باشد که بروی سیلندر اصلی نصب می‌شود و روی لایه‌های تحریک شده تاثیر می‌گذارد که مانع القا شدن نوسانات به سیلندر می‌گردد (شکل ۱۳). قطر بیرونی پوشش حدود ۱/۲۵ برابر قطر سیلندر اصلی است. سوراخ‌ها حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد مساحت پوشش را تشکیل داده و اندازه این سوراخ‌ها حدود



شکل (۱۱) - باله‌دوار مجهز به پمپ تعدیل کننده انرژی

**تیغه‌های مارپیچ:** مارپیچ‌ها بعنوان یکی از روش‌های اثبات شده و پر کاربرد در صنعت و سازه‌های دریایی می‌باشند. در این روش تیغه‌هایی به شکل مارپیچ اطراف سیلندر استوانه‌ای پیچیده شده‌اند (شکل ۱۲). تیغه‌ها در هنگام برخورد با جریان سیال یک جریان چرخشی به سمت بالا تولید می‌کنند که باعث ایجاد تداخل در گردابه‌ها شده و از ارتعاش سیستم جلوگیری می‌کنند. تیغه‌های نوک تیز توسط اسکراتون و والش<sup>۱۸</sup> در سال ۱۹۶۳ ابداع شدند که بطور گسترده در دودکش‌های صنعتی، برج‌ها، کابل‌ها و لوله‌های معلق و غیره استفاده می‌شوند [۱۰]. دودکش‌های دایره‌ای به تیغه‌هایی با ارتفاع بیشتر از یک هشتم قطر استوانه نیاز ندارند. بعنوان یک طرح بهینه معمولا از سه تیغه مارپیچ که در زوایای ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار دارند با گام مارپیچ ۱۵ برابر و به ارتفاع ۰/۱ برابر قطر استوانه



شکل (۱۲) - الف

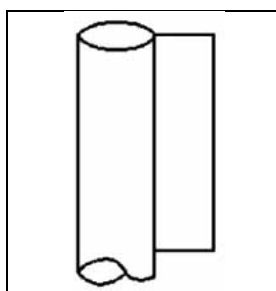


شکل (۱۲) - ب

شکل (۱۲) - نمونه‌هایی از تیغه‌های مارپیچ روی لوله



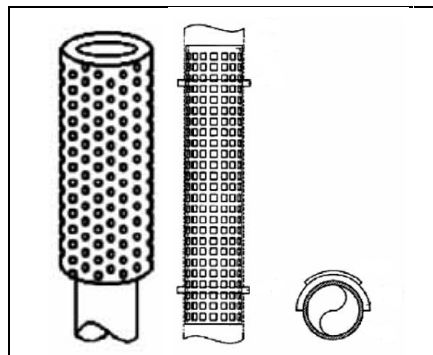
**جداکننده دنباله:** صفحه‌ای مسطح با طولی بین ۴ الی ۵ برابر قطر لوله که در پشت لوله، جایی که دنباله تشکیل می‌شود، نصب می‌گردد (شکل ۱۵). این صفحه از جابجایی نقطه تلاقی گردابه‌ها درون دنباله جلوگیری می‌کند و بدینوسیله به جریان سیال جهت می‌دهد [۱۱]. این وسیله درگ را کاهش داده اما یکی از عیب‌های آن عدم خود تنظیمی جداکننده در برابر جهت جریان می‌باشد. عبارت دیگر تنها در یک جهت جریان خاص کارایی دارد.



شکل (۱۵) - صفحه جداکننده دنباله

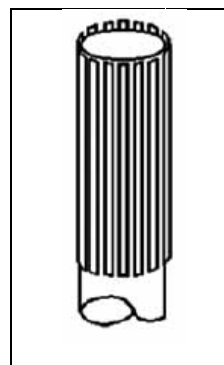
**پرچم:** پرچم‌ها همان صفحات جداکننده دنباله هستند که انعطاف پذیرند. از این وسیله زیاد استفاده نمی‌شود زیرا علی‌رغم خود تنظیم بودن، به موثری جداکننده‌ها نمی‌باشند. در اثر تغییر جریان‌ات دریایی این امکان وجود دارد که پرچم به دور لوله پیچیده و بطور کامل غیرموثر شود. از دیگر معایب آن سختی و هزینه نصب پرچم بر روی لوله می‌باشد.

**روبان‌ها و کابل‌های مویی:** روبان‌ها از جنس پلی اورتان ساخته می‌شوند. روبانی با پهنای ۱ الی ۲ برابر قطر لوله به‌مراه طول ۶ الی ۱۰ برابر و ضخامت ۰/۰۵ برابر با فاصله نصب حدود ۱ الی ۳ برابر قطر لوله بکار گرفته می‌شود (شکل ۱۶). کوان<sup>۲۰</sup> در سال ۲۰۰۲ گزارشاتی مبنی بر کاهش ارتعاشات القایی گردابه با کمک سه روبان نصب شده در زوایای ۱۲۰ درجه



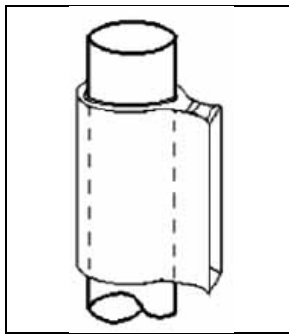
شکل ۱۳ - پوشش سوراخدار با سوراخهای دایره‌ای و مربعی

۱/۵ اینچ می‌باشد. آلن و هنینگ طرح پوشش جزئی را ارائه دادند که تنها ۴۵ تا ۵۵ درصد سطح بیرونی سیلندر به پوشش سوراخدار مجهز می‌شود [۱۳]. اصلی‌ترین مزیت پوشش سوراخدار بویژه با سوراخ‌های دایره‌ای شکل، درگ کمتر آن می‌باشد [۱۴]. **شیارهای محوری:** حالت خاصی از پوشش سوراخدار می‌باشد که بجای سوراخ، از شیارهایی در امتداد محور سیلندر بر روی سطح خارجی استفاده شده است (شکل ۱۴). قطر خارجی پوشش حدود ۱/۳ برابر قطر لوله بوده و شیارها حدود ۴۰ درصد این سطح را تشکیل می‌دهند. شیارها نسبت به پوشش سوراخدار بهتر عمل می‌کنند اما اصلی‌ترین عیب گرانی نسبی آنها است [۱۴].



شکل (۱۴) - لوله با شیارهای محوری

پره‌های راهنما: این دسته از ابزارهای افزودنی به سیستم، همانند باله‌ها عمل می‌کنند و تفاوت آنها در لبه انتهایی باله است که همانند یک جسم بلافاصله کوتاه می‌باشد (شکل ۱۸).



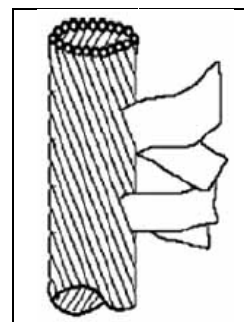
شکل (۱۸) - پره راهنما

صفحات ضایع کننده<sup>۲۱</sup>: این صفحات بصورت شعاعی بر روی سطح بیرونی لوله نصب می‌شوند و با ایجاد اغتشاش در گردابه، نوسانات را کنترل می‌کنند. استنسیبی<sup>۲۲</sup> در سال ۱۹۸۶ دریافت که این روش می‌تواند ارتعاشات القایی را تا ۷۰ درصد کاهش دهد (شکل ۱۹) [۱۶]. ادفلد<sup>۲۳</sup> در سال ۲۰۰۵ نوعی از ضایع کننده‌ها را ابداع کرد که در آنها صفحات شعاعی روی پایه‌هایی در امتداد محور قرار می‌گیرند [۱۷]. این موضوع سبب افزایش استحکام لوله و در نتیجه مقاومت آن در برابر کمپان می‌شود. اگر ارتفاع صفحات افزایش یابد مقدار درگ و نیروهای ناشی از آن افزایش خواهد یافت و با گذشتن این ارتفاع از ۰/۰۵ برابر قطر لوله نیروی برآی نوسانی کاهش می‌یابد.

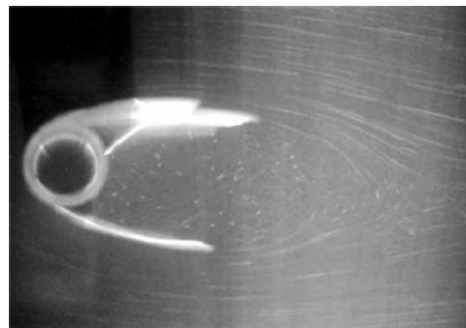
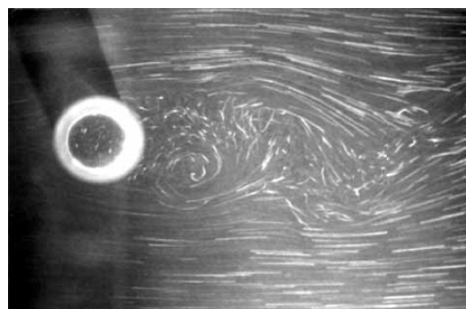
#### اصلاح سطح جسم

اوون<sup>۲۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۱ گزارش داده‌اند که استفاده از برجستگی‌های نیمکره‌ای در سازه‌های

نسبت به هم، ارائه داده است [۱۵]. روبان‌ها مزایای زیادی نسبت به سایر وسایل از جمله تیغه‌های مارپیچی دارند که این مزایا عبارتند از: طراحی ساده، سادگی نصب، راحتی کار با سازه‌های مونتاژ شده، نگهداری و مراقبت‌های کمتر و کاهش در هزینه‌های کلی. برخی از محققان حتی کاهش ضریب درگ را نیز گزارش داده‌اند. از مقایسه دو تصویر ارائه شده در شکل (۱۷) می‌توان به تاثیر روبان بر روی از بین بردن گردابه‌ها پی برد.

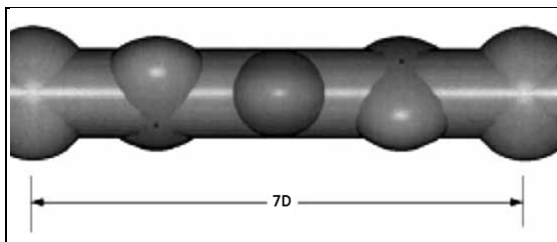


شکل (۱۶) - نمونه‌ای از روبان‌ها



شکل (۱۷) - تاثیر استفاده از روبان بر از بین رفتن گردابه‌ها و منظم کردن خطوط جریان

اما استفاده از این روش منجر به از بین رفتن شکل هندسی سازه می شود که در برخی شرایط و کاربردها قابل قبول نمی باشد. از روش اصلاح سطح جسم در کابل های نصب شده در عمق دریا، رایزرهای سازه های دریایی، دودکش ها و پایه های توربین های بادی استفاده می شود.

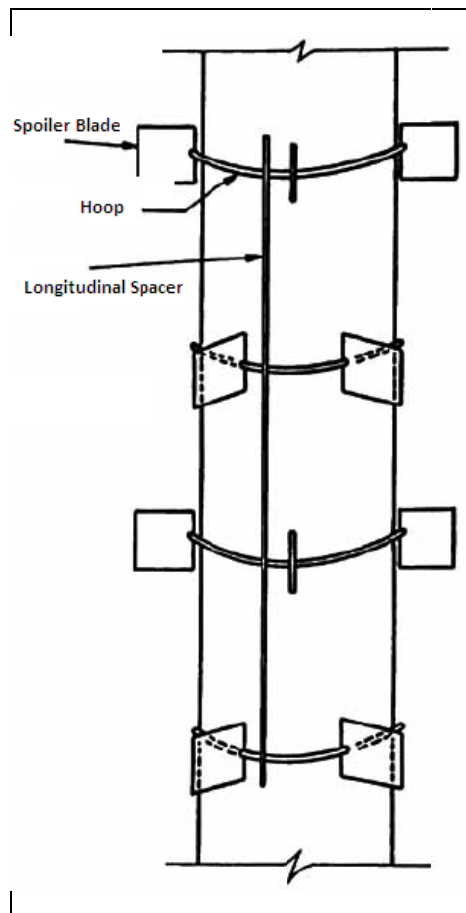


شکل (۲۰) - سطوح کروی طراحی شده روی سطح لوله

### اصلاح لایه مرزی

به دو روش می توان بر روی لایه مرزی تغییر ایجاد کرد: یکی به کمک مولدهای گردابه و دیگری با استفاده از گذرگاه ها است. مولدهای گردابه، وسایل بال شکل کوچکی هستند که تحت یک زاویه معینی نسبت به جهت جریان بصورت مورب نصب می شوند (شکل ۲۱) [۱۹]. بدلیل این شیب، هر مولد یک میدان چرخه کوچک با محور چرخش موازی جهت جریان ایجاد می نماید که یک انرژی جنبشی اضافی به لایه مرزی می دهد. این امر جدایش جریان را به تعویق می اندازد. مولدهای گردابه را می توان بر روی هواپیماها و در نیروگاه ها مشاهده نمود.

براساس اصل افزایش انرژی لایه مرزی شوو و آلن<sup>۲۵</sup> در سال ۲۰۰۳ از گذرگاه هایی درون جسم استفاده کردند [۲۰]. این وسیله نوسانات القایی گردابه و درگ را کنترل کرده و کاهش می دهد (شکل ۲۲).



شکل ۱۹ - صفحات ضایع کننده

استوانه ای ارتعاشات القایی گردابه را تا ۴۷ درصد و درگ را تا ۲۵ درصد کاهش می دهند [۱۸]. با کمک این برجستگی ها خطوط جدایش جریان مجبور به تبعیت از شکل سینوسی می شوند. همچنین با قرار دادن برجستگی ها در زوایای مختلف مشکل محدودیت زاویه ورود سیال را می توان حل کرد (شکل ۲۰). اختراع مشابهی از همین اشخاص نشان می دهد استفاده از برجستگی های با انحنای ملایم تر مانند شکل بیضوی نتایج بهتری دربر دارد. استفاده از ارتفاع برجستگی بیشتر در جائیکه سیال دارای لزجت بالاتری است مناسب می باشد. مزایای این روش، سادگی و ارزان بودن نسبی آن می باشد.

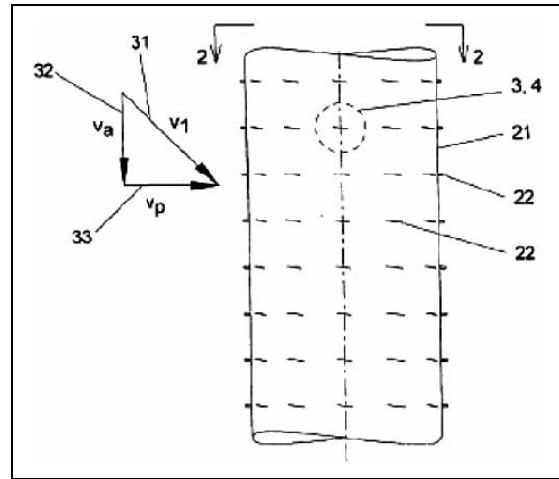
## استفاده از یک جسم کنترلی

استرایکوسکی و سرینیواسان<sup>۲۶</sup> در سال ۱۹۹۰ دریافتند که استفاده از یک سیلندر کنترلی در دنباله تشکیل شده در پشت جسم می‌تواند با پخش کردن گردابه متمرکز شده، کاملاً مانع تشکیل آن گردد [۲۱]. فاصله سیلندر کنترلی از سیلندر اصلی در امتداد جریان بر روی شکل گردابه‌ها و میزان پخش شدن آنها تاثیرگذار می‌باشد (شکل ۲۳). همچنین قطر نسبی سیلندر کنترلی به سیلندر اصلی از دیگر پارامترهای موثر بر گردابه‌ها است. شکل (۲۴) برای نسبت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ رسم شده است. مشاهده می‌شود که برای نسبت ۰/۵ دامنه نوسانات ابتدا کنترل شده اما نهایتاً با افزایش سرعت کاهیده زیاد می‌شود. اما در سایر نسبت‌ها دامنه نوسانات تقریباً ثابت مانده است.

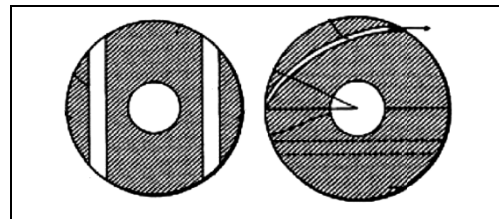
## نتیجه‌گیری

در کلیه روشهای کنترل انفعالی ارتعاشات القایی گردابه‌ها، معرفی شده در این مقاله، سه پارامتر مهم بطور مداوم نقش بازی کرده‌اند. این سه پارامتر عبارتند از هزینه، خواص آئرو دینامیک و سادگی کار. از بین تمام این روشها، روبان‌ها معیارهای سادگی کار و هزینه پائین را دارا می‌باشند. از نظر آئرو دینامیکی و کم بودن درگ باله‌های منظم کننده خطوط جریان بهترین کارایی را نشان می‌دهند. از آنجا که هنوز طرحهایی که بتوانند هر سه پارامتر را همزمان ارضاء کنند ارائه نشده‌اند، انتظار می‌رود که زمینه برای کار و تحقیق بر روی ابزارهای کنترل انفعالی موجود باشد [۲۲].

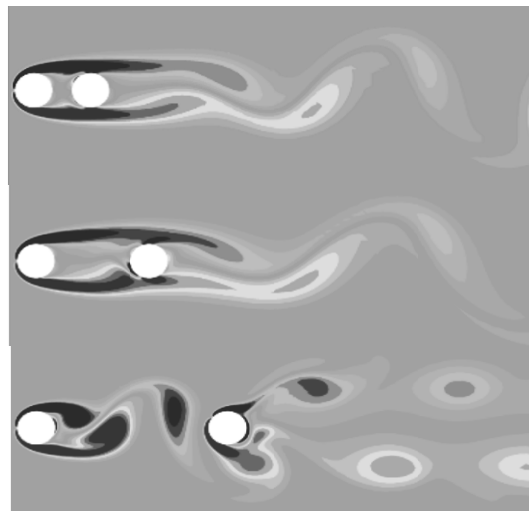
در تمام سازه‌هایی که در دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند یک جسم تنها با یک جریان سیال مواجه می‌شود. در حالیکه محیط‌های بسیاری



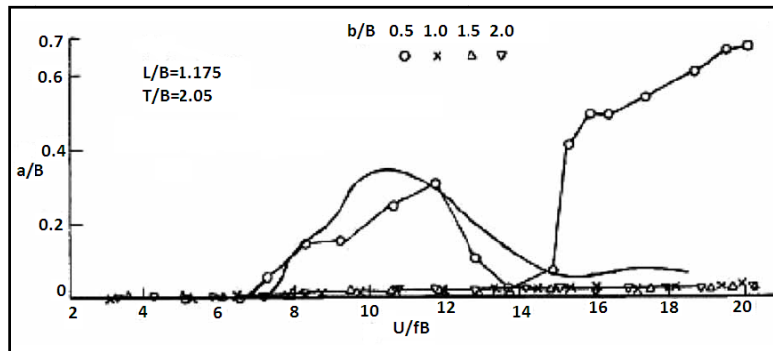
شکل (۲۱) - مولدهای گردابه بر روی لوله  
 ۲۱: سیلندر، ۲۲: مولد گردابه، ۳۱: سرعت سیال،  
 ۳۲: مولفه عمودی سرعت، ۳۳: مولفه افقی سرعت



شکل (۲۲) - گذرگاهها یا مسیره‌های جریان درون دیواره لوله به دو روش هم جهت با جریان و دارای زاویه نسبت به جریان



شکل (۲۳) - تاثیر فاصله جسم کنترلی از جسم اصلی بر روی جریان - فاصله کم، فاصله متوسط و فاصله زیاد



شکل (۲۴) - تاثیر نسبت قطر دو جسم کنترلی به دامنه نوسانات و ارتعاشات القایی گردابه‌ای (محور عمودی) با افزایش سرعت کاهیده (محور افقی) وقتی دو جسم در فاصله ثابت از یکدیگر قرار دارند- با افزایش سرعت کاهیده برای نسبت قطرهای ۰/۵ ابتدا دامنه نسبی (نسبت دامنه نوسانات به قطر جسم اصلی) کنترل شده اما نهایتاً افزایش می‌یابد، در سایر نسبت‌ها دامنه تقریباً صفر است و ارتعاشات القایی گردابه‌ها کنترل شده‌اند.

### مراجع

- [1] <http://www.wikipedia.com>
- [2] Sarpkaya, T., "Vortex Induced Oscillations: A Selective Review"; *Journal of Applied Mechanics*, 46:241-258, (1979).
- [3] Gerrard, J. H., "The Mechanics of the Formation Region of Vortices Behind Bluff Bodies"; *Journal of Fluid Mechanics*, 25: 401-413, (1964).
- [4] Zhang, H.J., Zhou, Y., So, R.M.C., Mignolet, M.P., and Wang, Z.J., "A Note on the Fluid Damping of an Elastic Cylinder in a Cross Flow", *Journal of Fluids and Structure*, 17: 479-483, (2003).
- [5] Blevins, R.D., "Flow-Induced Vibration"; Van Nostrand Reinhold Company; New York, (1990).
- [6] Dulhunty, P.W., US20040035601A1 [Patent], (2004).
- [7] Allen, D.W., and Henning, D.L.,: US20016223672B1, [Patent] (2001).
- [8] Coakley, D.B., and Knutson, R.K.: US20036517289B1, [Patent], (2003).
- [9] Lie, H.: US20070215028A1, [Patent] (2007).
- [10] Scruton, C., and Walshe, D.E.: US3076533 [Patent], (1963).
- [11] Zdravkovich, M.M., "Review and Classification of Various Aerodynamic and

همچون مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله وجود دارند که در آنها چند سازه در کنار یکدیگر همزمان با یک جریان مواجه می‌شوند. این حالت متفاوت از شرایط قبل می‌باشد، چرا که علاوه بر سیال، سازه‌ها نیز بر روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند. از پارامترهای موثر بر روی تاثیر متقابل سازه‌ها می‌توان به فاصله سازه‌ها از یکدیگر، نسبت قطری آنها، میزان سرعت کاهیده و شرایط میرایی اشاره نمود. از آنجا که مطالعه بر روی سازه‌های گروهی در ۲ الی ۳ سال اخیر بطور جدی آغاز شده است، لذا این موضوع می‌تواند به عنوان یکی از بسترهای مناسب برای تحقیق در این خصوص باشد [۲۲].

همچنین می‌توان به استفاده از مواد هوشمند در کنترل انفعالی نوسانات ناشی از گردابه‌ها اشاره نمود. از آنجا که تغییرات هندسی و افزودن اجسام دیگر به سیستم می‌تواند محدودیت‌هایی را بدنبال داشته باشد، کار بر روی موادی که با شرایط محیطی از جمله نوسانات فشار و سرعت، خواص ذاتی ماده را تغییر دهند، خالی از فایده نیست. بدین صورت که جسم بتواند میرایی درونی خود را تنظیم نماید [۲۳].

## پی‌نوشت

- 1- Bluff Body
- 2- Streamline
- 3- Fluid Induced Vibration
- 4- Vortex
- 5- Passive Control
- 6- Reduced Velocity
- 7- Ferry Bridge Power Station
- 8- Tacoma Bridge
- 9- Vortex Induced Vibration
- 10- Galloping
- 11- Flutter
- 12- Buffeting
- 13- Scruton Number
- 14- Stock-bridge
- 15- Chord to Diameter
- 16- Alen and Hening
- 17- Coackley and Knutson
- 18- Scruton and Walshe
- 19- Alen
- 20- Kwon
- 21- Spoiler Plates
- 22- Stansby
- 23- Edfeld
- 24- Owen
- 25- Shu and Alen
- 26- Strykowski and Sreenivasan

- Hhydrodynamic Means for Suppressing Vortex Shedding", *Journal of Wind Eng Industr Aerodyn*, 7: 145-189, (1981).
- [12] Allen, D.W., Henning, D.L., and Haws, J.H., McMillan, D.W., Mc Daniel, M.: US200365617340B1, [Patent], (2003).
- [13] Allen, D.W., and Henning, D.L.: US20046685394B, [Patent], (2004).
- [14] Wong, H.Y., and Kokkalis A., "A Comparative Study of Three Aerodynamic Devices for Suppressing Vortex-induced Oscillation", *J Wind Eng. Indust. Aerodyn.*, 10: 21-29, (1982).
- [15] Kwon, S.H, Cho, J.W, Park, J.S, and Choi, H.S., "The Effects of Drag Reduction by Ribbons Attached to Cylindrical Pipes", *Ocean Eng.* 29: 1945-1958, (2002).
- [16] Stansby, P,K, Pinchbeck, J.N., and Henderson, T., "Spoilers for the Suppression of Vortex-Induced Oscillations (Technical Note), *Appl. Ocean Res.*,8(3): 169-173, (1986).
- [17] Edfeldt, M.P.: US20050201832A1, [Patent], (2005).
- [18] Owen, .JC, Bearman, P.W, and Szewczyk, A.A., "Passive Control of VIV with Drag Reduction", *Journal of Fluids and Structure*, 15: 597-605, (2001).
- [19] Muehlner, E.: US20060054073, [Patent], (2006).
- [20] Shu, H., and Allen, D.W.,: US20036644894B2, [Patent], (2003).
- [21] Strykowski, P.J, and Sreenivasan, K.R., "On the Formation and Suppression of Vortex 'Shedding' at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluid Mechanics*, 218: 71-107, (1990).
- [22] Kumar, Raghavan, A., "Passive Control of Vortex Induced Vibrations": An Overview, *Recent Patents on Mechanical Engineering*, (2008).
- [23] Sarpkaya, T., "A Critical Review of the Intrinsic Nature of Vortex Induced Vibrations", *Journal of Fluids and Structure*, 389-447, (2004).



# شرکت ایتراک

مهندسی و ساخت تجهیزات صنایع ایران

---

طراحی و ساخت تجهیزات صنایع :

به ویژه برای:

- صنایع غذایی و دارویی
- صنایع شیمیایی و پتروشیمی
- تجهیزات کشتارگاهها و صنایع جنبی گوشت
- سیستم‌های انتقال مواد
- تجهیزات خطوط رنگ کارخانه‌ها
- کوره‌های زباله‌سوز و لاشه سوز
- مخازن تحت فشار و راکتورها
- سازه‌های صنعتی و انواع کریتینگ با کالوانیزه گرم

---

تهران - خیابان ظفر - خیابان نصیری - بلوار سیما جنوبی - شماره ۱۶  
صندوق پستی ۱۱۳۶ - ۱۹۳۹۵  
تلفن: ۰۷۴۲۰۷۴۲ - ۲۲۲۶۰۲۲۹ - ۲۲۲۷۲۸۲۹ تلفکس: ۰۹۹۰۲۲۲۶  
web site: www.itrac-co.com  
E-mail: info@itrac-co.com

