ISAV 2012
دومین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۶ و ۷ دی ۱۳۹۱ تهران - ایران

شبیه‌سازی عددی تاثیر استفاده از جسم کنترلی بر پاسخ سیستم در محدوده Lock-in در ارتعاشات ناشی از جریان گردابی پشت استوانه قرار گرفته بر روی بستر الاستیک

علی آجیلیان ممتاز*، انوشیروان فرشیدیان‌فر

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، فلکه پارک، ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، مشهد، ایران.
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.ajilian@yahoo.com

چکیده

ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها، که از برخورد بین جریان سیال و جامد بوجود می‌آید، از تاثیرگذارترین عوامل تخریب لوله‌های استخراج مواد نفتی و گازی در اعماق دریاها و اقیانوس‌ها می‌باشد. در این پژوهش ابتدا به شبیه‌سازی این پدیده بر روی سیلندر استوانه‌ای شکل قرار گرفته بر روی بستر الاستیک و در معرض جریان سیال پرداخته می‌شود. به منظور اعتبار سنجی نتایج، مقادیر ضرایب لیفت و درگ و دامنه نوسانات بدست آمده در عدد رینولدز ۲۰۰ با نتایج آزمایشگاهی و عددی سایر پژوهشگران مقایسه گردیده که مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌دهد. سپس تاثیر قرار گرفتن سیلندرهای کنترلی هم‌قطر با سیلندر اصلی و با چیدمان‌های خطی و مثلثی در پشت سیلندر اصلی بر دامنه ارتعاشات در ناحیه Lock-in و ضرایب لیفت و درگ بررسی می‌گردد. در آرایش خطی یک سیلندر کنترلی در ۵ نسبت فاصله مختلف از ۱.۵ تا ۳.۵ برابر قطر سیلندر اصلی قرار داده شده است. در آرایش مثلثی نیز تاثیر قرارگیری دو سیلندر کنترلی و در نسبت‌های ۱، ۱.۵ و ۲ برابر قطر سیلندر اصلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در انتها با مقایسه نتایج بدست آمده، آرایش و موقعیت بهینه سیلندرهای کنترلی تعیین می‌گردد.

کلمات کلیدی: ارتعاشات؛ گردابه؛ سیلندر کنترلی؛ Lock-in.

۱. مقدمه

ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها[1]، پدیده‌ای است که بر اثر گردابه‌های ایجاد شده ناشی از برخورد بین جریان سیال و سازه در پشت جسم جامد به وجود می‌آید و موارد زیادی مانند ساختمان‌های بلند، خطوط انتقال قدرت و لوله‌های استخراج مواد نفتی از اعماق دریاها قابل مشاهده است. وقتی جریان یکنواخت سیالی از مجاورت یک سازه عبور می‌کند، این جریان شروع به تلاطم کرده و گردابه‌هایی با آرایش منظم در دو سوی سازه ایجاد می‌کند. این گردابه‌ها که با آهنگی نوسانی در دو سوی سازه تولید می‌شوند، نیروی برآی نوسانی بر سازه اعمال می‌کنند[۱]. حال اگر این استوانه توسط تکیه‌گاه الاستیکی نگهداری شود، در اثر اعمال نیروی برآی

[1]. Vortex Induced Vibration (VIV)

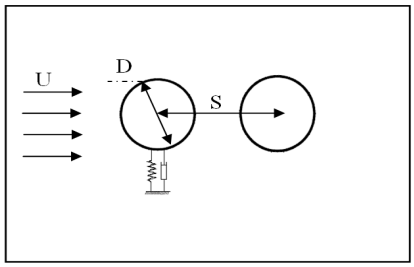
نوسانی شروع به ارتعاش خواهد کرد. اگر سرعت سیال چنان باشد که فرکانس تشکیل گردابه‌ها نزدیک فرکانس طبیعی سازه باشد، فرکانس گردابه‌سازی ناگهان بر روی فرکانس طبیعی سازه قفل می‌شود و نوسانات شدیدی در نزدیکی فرکانس طبیعی سازه رخ می‌دهد[۲]. این پدیده که به نام Lock-in یا همزمانی شناخته می‌شود سبب ایجاد نوسانات با دامنه زیاد در سازه می‌گردد که اگر این ارتعاشات مهار نشود، می‌تواند سبب آسیب رساندن به سازه و یا حتی تخریب آن گردد. به همین منظور محققان و پژوهشگران از روش‌های مختلفی جهت کاهش ارتعاشات حاصل از پدیده VIV استفاده می‌کنند. پارک و همکارانش[۳] در سال ۲۰۰۲ با قرار دادن ایرفویل در اطراف سازه و در سال ۱۹۸۲ تلاش کردند دامنه ارتعاشات حاصل از گردابه‌ها را کاهش دهند. علیرغم کاهش دامنه ارتعاشات و نیروی درگ با استفاده از روش فوق، بدلیل هزینه‌های بالای اجرا استفاده از این روش‌ها بسیار محدود می‌باشد. پژوهشگران زیادی مانند بلوینز[۴] در سال ۱۹۹۰ و چو و همکاران[۵] در سال ۱۹۹۸ با استفاده از افزایش میزان دمپینگ در سیستم، سعی در کاهش ماکزیمم دامنه ارتعاشات در رزونانس داشته‌اند. امروزه از این روش عمدتا در خطوط انتقال قدرت، توربین‌ها و فن‌ها استفاده می‌شود. از جمله روش‌های دیگر کاهش دامنه ارتعاشات، استفاده از خاصیت اینرسی ستون آب است. ساروپ و همکارانش[۶] در سال ۲۰۰۳ از این روش برای کنترل دامنه ارتعاشات و افزایش دمپینگ در ساختمان‌های بلند استفاده کرده‌اند. در این روش حجم زیادی از آب در داخل محفظه بزرگی در یکی از طبقات بالایی برج‌ها قرار داده می‌شود و با پخش انرژی در هنگام ارتعاش سازه به وسیله ایجاد موج و اصطکاک داخلی سیال، دمپینگ سیستم افزایش می‌یابد. یکی از موثرترین روش‌های کنترل ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها، استفاده از سلندر کنترلی است. سری‌نی‌واسان و همکارانش[۷] در سال ۲۰۰۳ با بهره‌گیری از قرار دادن یک سیلندر کنترلی با قطرکوچک‌تر 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 سیلندر اصلی بکاهند. پینگ و همکارانش[۱۰] در سال ۲۰۰۹ به بررسی تاثیر قرار دادن سه سیلندر قرار گرفته بر روی بستر الاستیک به صورت آرایش مثلثی که دو سیلندر کترلی در جلوی سیلندر اصلی قرار داشتند، پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب درگ بر روی استوانه‌های جلویی بیشتر از سیلندر عقبی است و دامنه نوسانات سیلندر عقبی نسبت به حالت قرار گرفتن یک سیلندر تنها در معرض جریان افزایش یافت. ون دن آبیله و همکارانش[۱۱] در سال ۲۰۱۰ به بررسی جریان بر روی دو سیلندر ثابت پشت سر هم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که قطر سیلندر قرار گرفته در پشت سیلندر جلویی بر گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی تاثیرگذار است.

علاوه بر قطر سیلندر، تعداد و نحوه چیدمان سیلندرهای کنترلی در پشت سیلندر اصلی از عوامل تاثیرگذار در استفاده از روش سیلندر کنترلی است. در این پژوهش ضمن مدلسازی سیلندر صلب استوانه‌ای شکل قرار گرفته بر روی بستر الاستیک و در معرض جریان سیال، به مطالعه تاثیر استفاده از سیلندر کنترلی هم‌قطر با سیلندر اصلی با آرایش‌های مختلف بر تشکیل گردابه‌ها، ضرایب لیفت و درگ و دامنه ارتعاشات در ناحیه Lock-in در پدیده VIV پرداخته شده است. در قسمت اول تاثیر قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در پشت سیلندر اصلی بررسی می‌گردد. سیلندر کنترلی در ۵ نسبت فاصله‌ی مختلف از S/D=۱.۵ تا S/D=۳.۵ در پشت سیلندر اصلی قرار گرفته است که S فاصله مرکز سیلندر اصلی تا سیلندر کنترلی و D قطر سیلندرها می‌باشد. سپس دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی و در نسبت فواصل S/D=۱، S/D=۱.۵ و S/D=۲ در پشت سیلندر قرار داده شده و در انتها فاصله و چیدمان بهینه سیلندرهای کنترلی مشخص می‌گردد.

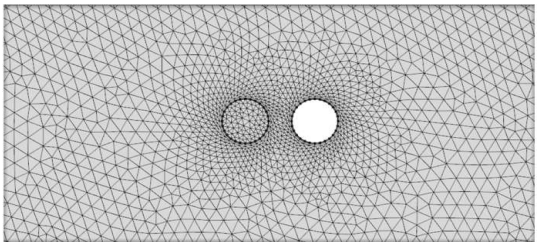
۲. مدلسازی پدیده VIV

امروزه استفاده از روش‌های نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در علوم مهندسی کاربرد وسیعی پیدا کرده است و به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی وسایل مهندسی به کار می‌روند. یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای موجود در زمینه شبیه‌سازی پدیده‌های مربوط به برخورد بین جریان سیال و جامد، نرم‌افزار Comsol Multiphysics است که در این پروژه از آن به‌منظور شبیه‌سازی پدیده VIV استفاده شده است. در شکل (۱)، بزرگ‌نمایی از میدان حل و مش‌بندی شبکه نشان داده شده است. شرایط مرزی ورودی سرعت برای دیواره سمت

چپ، خروجی فشار برای دیواره سمت راست و دیواره بدون لغزش برای دیواره‌های بالا و پایین شبکه انتخاب گردیده است. همچنین با استفاده از مش‌بندی دینامیکی و کد FSI[۲]، حرکت سیلندر اصلی بر اثر نیروی وارد شده از طرف جریان سیال مدل گردیده است.



(ب)



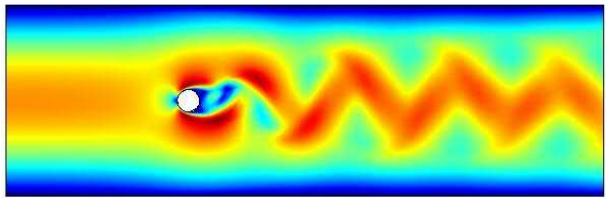
(الف)

شکل ۱. (الف) بزرگنمایی مش‌بندی شبکه. (ب) دامنه حل مسئله

شرایط استفاده شده در این شبیه‌سازی، مشابه شرایط آزمایشگاهی استفاده شده توسط گواردان و ویلیامسون[۱۰] می‌باشد. جرم سیلندر، ثابت فنر و ضریب دمپینگ ثابت فرض شده و سرعت کاهیده با افزایش تدریجی سرعت جریان تغییر می‌کند. نسبت جرم سیلندر که به صورت $m^* = \frac{4m}{\rho \pi D^2}$ تعریف می‌شود برابر ۵۰.۸ فرض شده است که در آن m جرم جسم نوسان‌کننده بر واحد طول و ρ چگالی آب است. نسبت دمپینگ، که از ارتعاشات آزاد در هوا بدست آمده برابر ۰.۰۰۲۴=ζ می‌باشد. عدد رینولدز مرجع جریان برابر $Re = \frac{UD}{\nu} = ۵۵۶$ در سرعت کاهیده $V_r = \frac{UT_n}{D} = ۵$ می‌باشد که در آن U سرعت میانگین جریان آزاد، T_n فرکانس ارتعاش آزاد در هوا و ν ویسکوزیته سینماتیک آب است.

۳. نتایج و بحث

در شکل (۲) کانتور جریان در پشت سیلندر صلب در معرض جریان سیال عدد رینولدز جریان برابر ۲۰۰ نشان داده شده است.



شکل ۲. کانتور جریان و گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی در حالت عدم وجود سیلندر کنترلی در Re=۲۰۰ و t=۱۰۰s

همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌گردد گردابه‌های ون‌کارمن بر اثر فشار منفی در پشت سیلندر به صورت متقارن ایجاد و سبب وارد کردن نیروهای درگ و لیفت به ترتیب بر سیلندر شده و آن را وادار به حرکت نوسانی می‌کنند. از طرف دیگر در نواحی نزدیک به سیلندر شدت تشکیل گردابه‌ها بیشتر است و با دور شدن از این ناحیه از شدت آن کاسته شده و به تدریج ناپدید می‌گردند.

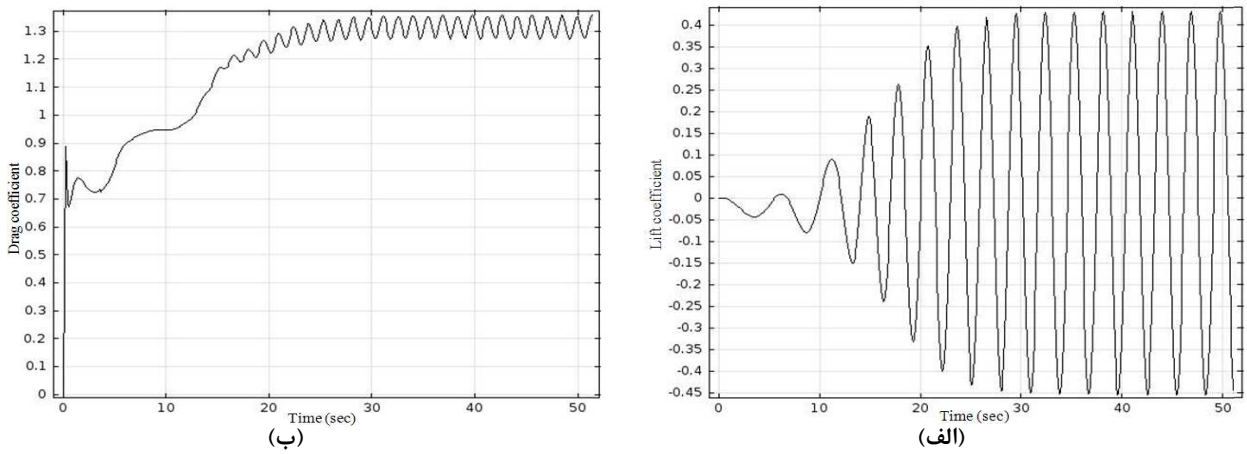
در جدول (۱) ضرایب میانگین لیفت و درگ حاصل از مدلسازی در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی و عددی سایر محققین مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده مطابقت بسیار خوبی با سایر پژوهش‌های مشابه، خصوصا نتایج بدست آمده از پژوهش لام[۱۱] دارد که بیانگر مناسب بودن مش‌بندی شبکه و دقت خوب بکار گرفته شده در شبیه‌سازی می‌باشد.

جدول ۱. مقایسه ضرایب لیفت و درگ میانگین با نتایج سایر محققین در Re=۲۰۰ در حالت عدم وجود سیلندر کنترلی

	پژوهش حاضر	پینگ [۹]	لام [۱۲]	منگینی [۱۳]
$\overline{C}_l$	۰.۴۳۱	۰.۳۹۹	۰.۴۲۶	۰.۵
$\overline{C}_d$	۱.۳۱	۱.۳۲	۱.۳۲	۱.۳۰

در شکل (۳) نمودارهای تغییرات ضرایب لیفت و درگ برحسب زمان در Re=۲۰۰ در پشت سیلندر صلب در معرض جریان سیال رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد روند تغییرات ضرایب فوق تناوبی و منظم می‌باشد.

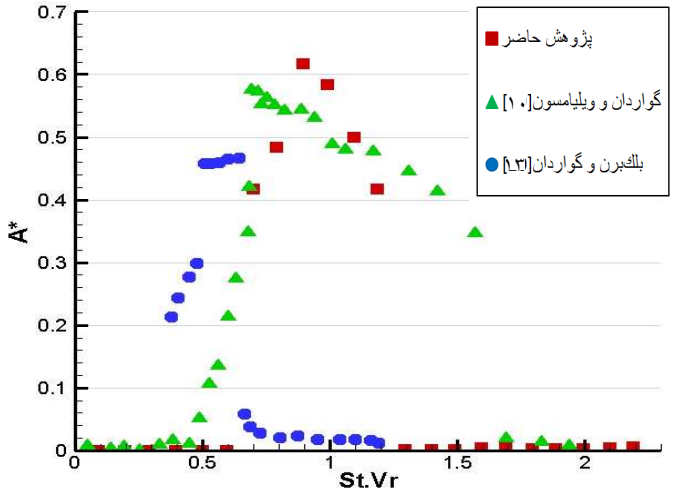
[2]. Fluid Solid Interaction



(ب) (الف)

شکل ۳. نمودار تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ در پشت سیلندر اصلی در Re=۲۰۰ در حالت عدم وجود سیلندر کنترلی

همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نوسانات سیلندر قرار گرفته بر روی بستر الاستیک، در شکل (۴) نمودار دامنه نوسانات بی‌بعد (A^*) برحسب سرعت کاهیده نشان داده شده و با داده‌های آزمایشگاهی مرجع[۱۰] و نتایج عددی بلک‌برن و گواردان[۱۳] مقایسه گردیده است. دامنه نوسانات بی‌بعد از تقسیم ماکزیمم دامنه نوسان سیلندر اصلی بر قطر آن بدست آمده و سرعت کاهیده با ضرب $\frac{UT_n}{D}$ در عدد اشتروهال، نرمالیزه شده است. عدد اشتروهال مطابق نتایج آزمایشگاهی بلک‌برن و اندرسون[۱۴]، که در سال ۱۹۹۹ انجام گردیده، در شبیه‌سازی دوبعدی برابر ۰.۲۲۵ در عدد رینولدز ۵۰۰ فرض شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد ماکزیمم دامنه نوسانات و فرم کلی روند تغییرات دامنه بی‌بعد برحسب سرعت کاهیده در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی و عددی محققین فوق‌الذکر بسیار نزدیک می‌باشد. هرچند که مقادیر بدست آمده در سایر نقاط با نتایج آزماشگاهی گواردان و ویلیامسون[۱۰] مطابقت بهتری دارد. با توجه به شکل (۴) ملاحظه می‌گردد که در شبیه‌سازی حاضر ناحیه Lock-in در اعداد St.Vr بین ۰.۷ تا ۱.۲ روی می‌دهد که در آن دامنه نوسانات سیلندر ناگهان به شدت افزایش می‌یابد. اما در ناحیه قبل و بعد از آن، دامنه ارتعاشات سیلندر بسیار ناچیز می‌باشد.

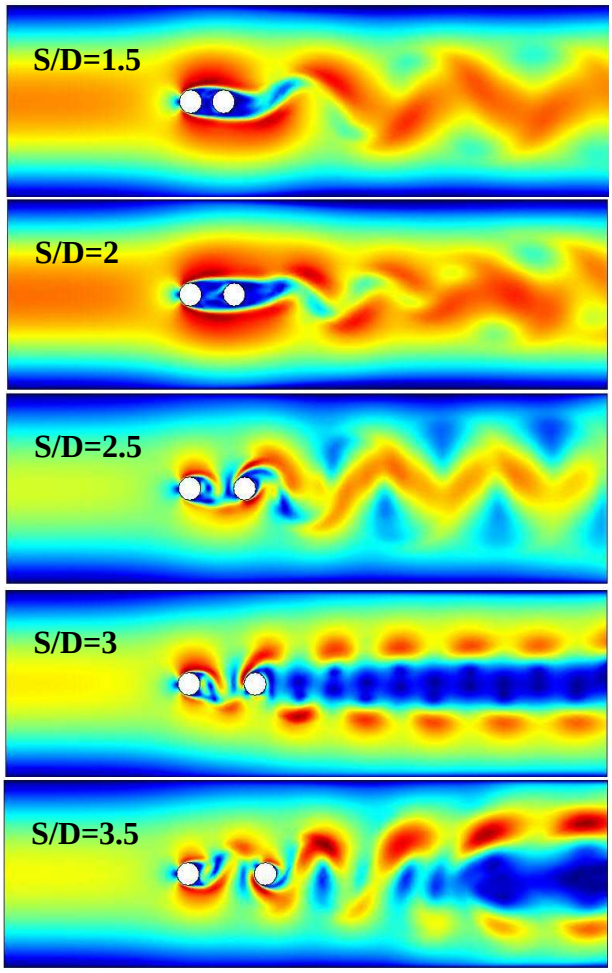


شکل ۴. مقایسه تغییرات دامنه نوسانات بی‌بعد برحسب St.Vr با نتایج سایر محققین در حالت عدم وجود سیلندر کنترلی

۳.۱ استفاده از یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در پشت سیلندر اصلی

در شکل (۵) کانتورهای جریان سیال حاصل از شبیه‌سازی حاضر در حالتی که یک سیلندر کنترلی در پشت آن قرار گرفته نشان داده شده است. سیلندرهای کنترلی در فواصل بسیار نزدیک تا نواحی دورتر نسبت به سیلندر اصلی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که از شکل (۵) ملاحظه می‌گردد تا نسبت فاصله S/D=۲ تشکیل گردابه‌ها به طور کامل تا پشت سیلندر کنترلی به تعویق افتاده است. اما در نسبت S/D=۲.۵ تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر اصلی نیز شروع شده و با افزایش فاصله سیلندر کنترلی بر شدت تشکیل آن‌ها افزوده می‌گردد به طوری که در نسبت فاصله S/D=۳.۵ گردابه‌ها به‌طور کامل در پشت سیلندر اصلی تشکیل می‌گردد و سیلندر

کنترلی تاثیری در جلوگیری از تشکیل آن در پشت سیلندر اصلی ندارد. از طرف دیگر تا هنگام قرارگیری سیلندر کنترلی در نسبت فاصله S/D=۲.۵ تشکیل گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر کنترلی به صورت متقارن می‌باشند. اما از نسبت فاصله برابر S/D=۳ و بعد از آن الگوی تشکیل گردابه‌ها تغییر کرده و به صورت غیرمتقارن تشکیل می‌گردند.



شکل ۵. کانتور جریان در حالت قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در نسبت فاصله‌های S/D مختلف در St.Vr=۱.۱

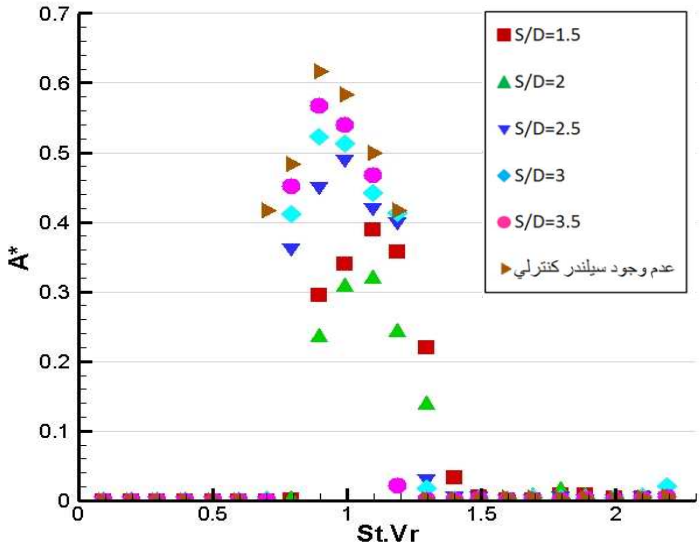
در جدول (۲) ضرایب لیفت و درگ میانگین در پشت سیلندر سیلندر اصلی هنگام قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی به صورت خطی در پشت سیلندر اصلی و در عدد Re=۲۰۰ ارائه شده است. مشاهد می‌شود که در نسبت فاصله‌های S/D=۱.۵ و S/D=۲، مقادیر ضرایب لیفت و درگ میانگین در پشت سیلندر اصلی به شدت کاهش یافته است به طوری‌که در حالت S/D=۲ این مقادیر به ترتیب حدود ۵۵٪ و ۳۰٪ کمتر از حالت عدم وجود سیلندر کنترلی است. کاهش ضرایب فوق به دلیل به تعویق افتادن تشکیل گردابه‌ها تا ناحیه پشت سیلندر کنترلی می‌باشد. از طرف دیگر در نسبت‌های S/D=۲.۵ و بزرگتر از آن، از تاثیر قرار گرفتن سیلندر کنترلی بر کاهش ضرایب لیفت و درگ به تدریج کاسته شده و در حالت S/D=۳.۵ سیلندر کنترلی تقریبا هیچ تاثیری بر کاهش نیروهای لیفت و درگ وارد بر سیلندر اصلی ندارد. علت آن تشکیل گردابه‌ها در ناحیه بین دو سیلندر است که همزمان با افزایش فاصله سیلندر کنترلی از سیلندر اصلی بر شدت تشکیل آن افزوده شده است.

جدول ۲. مقایسه ضرایب لیفت و درگ میانگین در حالت قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در Re=۲۰۰

	بدون سیلندر کنترلی	S/D=۱.۵	S/D=۲.۵	S/D=۲.۵	S/D=۳	S/D=۳.۵
$\overline{C}_l$	۰.۴۳۱	۰.۲۵	۰.۱۹	۰.۳۶	۰.۴۰	۰.۴۲
$\overline{C}_d$	۱.۳۱	۱.۰۳	۰.۹۳	۱.۲۴	۱.۲۹	۱.۳۰

در شکل (۶) تغییرات A^* برحسب St.Vr در حالتی که یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در فواصل مختلف از سیلندر اصلی قرار گرفته نشان داده شده است. قرار گرفتن سیلندر ثانویه در فواصل نزدیک به سیلندر اصلی سبب می‌شود که گردابه‌ها در

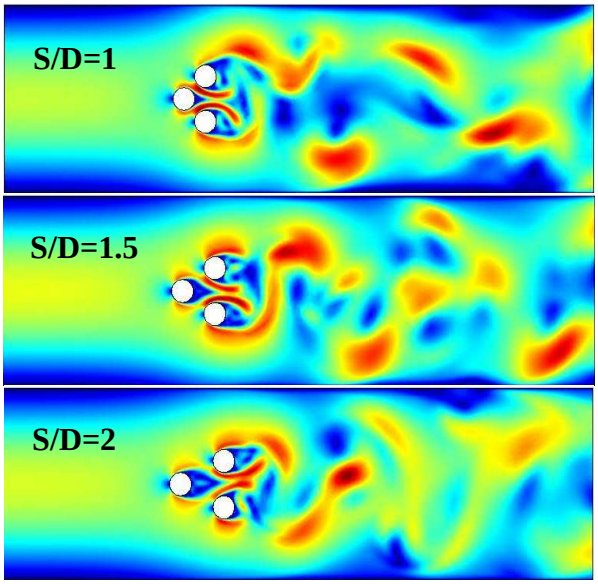
فاصله دورتری از سیلندر اصلی ایجاد گردد و به دلیل وارد آمدن نیروی کمتر بر سیلندر اصلی، دامنه نوسانات آن نیز کاهش یابد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد در نسبت S/D=۱.۵ و S/D=۲ که سیلندر ثانویه بسیار نزدیک به سیلندر اصلی است، دامنه نوسانات به شدت کاهش یافته است به طوری‌که ماکزیمم مقدار A^* از ۰.۶۰۷ در هنگام عدم وجود سیلندر کنترلی، به ۰.۳۱ در حالت قرارگیری سیلندر کنترلی در نسبت S/D=۲ رسیده است. از طرف دیگر با افزایش فاصله سیلندر کنترلی و در نسبت‌های S/D=۲.۵، S/D=۳ و S/D=۳.۵، میزان دامنه نوسانات سیلندر اصلی افزایش می‌یابد. هرچند که میزان ماکزیمم دامنه نوسانات همچنان کمتر از حالت قرار گرفتن یک سیلندر تنها در معرض جریان است. علاوه بر این ملاحظه می‌گردد که در نسبت فاصله‌های S/D=۱.۵ و S/D=۲.۵ ناحیه Lock-in در اعداد St.Vr بزرگتر از ۰.۹ تا ۱.۳ روی می‌دهد. در حالی‌که در سایر حالات، مشابه حالت عدم وجود سیلندرهای کنترلی، ناحیه Lock-in و ماکزیمم دامنه نوسانات در اعداد St.Vr بین ۰.۷ تا ۱.۲روی می‌دهد.



شکل ۶. تغییرات دامنه نوسانات بی‌بعد برحسب St.Vr در حالت استفاده از یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی

۳.۲ استفاده از دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی در پشت سیلندر اصلی

در این قسمت دو سیلندر کنترلی به صورت آرایش مثلثی در پشت سیلندر اصلی قرار داده شده‌اند. فاصله عمودی سیلندرهای کنترلی از سیلندر اصلی برابر D و فاصله افقی در نسبت فاصله‌های S/D=۱، S/D=۱.۵ و S/D=۲ می‌باشد. در شکل (۷) کانتور جریان هنگام استفاده از دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی نسبت به سیلندر اصلی نشان شده است.



شکل ۷. کانتور جریان در حالت قرار گرفتن دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی در نسبت فاصله‌های S/D مختلف در St.Vr=۱.۱

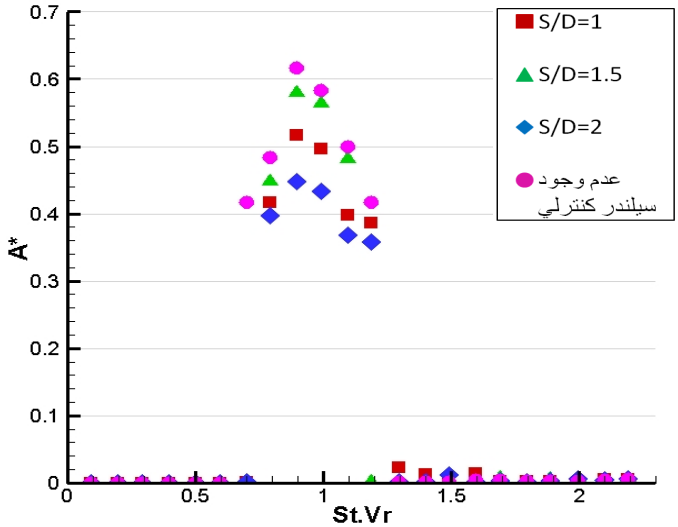
با توجه به شکل (۷) برخلاف دو آرایش قبلی، در هنگام قرارگیری سیلندرهای کنترلی در فاصله بسیار نزدیک به سیلندر اصلی و همچنین در فاصله‌های دورتر از آن جریان‌های گردابه‌ای به صورت نامظم و غیرمتقارن در پشت سیلندر اصلی تشکیل می‌گردد. از طرف دیگر در هنگام قرارگیری سیلندرهای کنترلی در نسبت فاصله‌های S/D=۱ و S/D=۲، شدت و ضخامت ناحیه تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر اصلی کمتر از حالت قرارگیری سیلندرهای کنترلی در نسبت فاصله S/D=۱.۵ است.

در جدول (۳) تغییرات ضرایب لیفت و درگ میانگین در عدد Re=۲۰۰ و موقعیت‌های مختلف دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی در پشت سیلندر اصلی نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول (۳) ملاحظه می‌گردد در نسبت فاصله S/D=۲، ضرایب میانگین لیفت و درگ میانگین به ترتیب ۲۴٪ و ۱۰٪ کاهش یافته است. کاهش این ضرایب به دلیل تغییر الگوی ایجاد گردابه‌ها در پشت سیلندر اصلی و کاهش شدت تشکیل آن‌ها می‌باشد. اما در نسبت فاصله S/D=۱.۵ ضرایب لیفت و درگ نسبت به دو نسبت فاصله دیگر بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر در این نوع چیدمان سیلندرهای کنترلی، در نسبت فاصله S/D=۲ که سیلندرهای کنترلی نسبت به سیلندر اصلی دورتر می‌باشند، نیروهای لیفت و درگ کمتری به سیلندر اصلی وارد می‌گردد.

جدول ۳. مقایسه ضرایب لیفت و درگ میانگین در حالت قرار گرفتن دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی در Re=۲۰۰

	بدون سیلندر کنترلی	S/D=۱	S/D=۱.۵	S/D=۲
$\overline{C}_l$	۰.۴۳۱	۰.۳۶	۰.۴۱	۰.۳۳
$\overline{C}_d$	۱.۳۱	۱.۲۱	۱.۲۷	۱.۱۸

در شکل (۸) نمودار دامنه نوسانات سیلندر اصلی در حالت استفاده از سیلندرهای کنترلی با آرایش مثلثی ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که در نسبت فواصل S/D=۱ و S/D=۲، میزان A^* کاهش یافته است به طوری که در حالت نسبت S/D=۲ ماکزیمم A^* به مقدار ۰.۴۷ رسیده است. اما در نسبت S/D=۱.۵، مقدار ماکزیمم A^* افزایش یافته و به مقدار ۰.۵۸ رسیده است. به عبارت دیگر قرار گرفتن سیلندرهای کنترلی با آرایش مثلثی در نسبت فاصله S/D=۱.۵، تاثیر ناچیزی در کاهش ماکزیمم مقدار A^* دارد. با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که الگوی تغییرات A^* برحسب St.Vr در همه حالات مشابه حالت عدم وجود سیلندر کنترلی است و ماکزیمم مقدار A^* در بازه اعداد St.Vr بین ۰.۷ تا ۱.۲ روی می‌دهد.



شکل ۸. تغییرات دامنه نوسانات بی‌بعد برحسب St.Vr در حالت استفاده از دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی پدیده VIV بر روی سیلندر استوانه‌های شکل قرار گرفته بر روی بستر الاستیک انجام گردید. مقایسه مقادیر ضرایب لیفت و درگ و دامنه نوسانات در ناحیه Lock-in در حالت عدم وجود سیلندر کنترلی با نتایج سایر پژوهش‌های مشابه مطابقت بسیار خوبی را نشان داد. سپس تاثیر استفاده از سیلندرهای کنترلی با آرایش‌های مختلف در پشت سیلندر

اصلی مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا با قرار دادن یک سیلندر کنترلی در پشت سیلندر اصلی در نسبت فاصله‌های ۱.۵، ۲، ۲.۵، ۳ و ۳.۵ برابر قطر سیلندر اصلی، ضرایب لیفت و درگ و دامنه نواسانات محاسبه گردید. نتایج نشان داد که تا نسبت فاصله ۲ برابر قطر سیلندر اصلی، ضرایب فوق و ماکزیمم دامنه نوسانات سیلندر در ناحیه Lock-in کاهش می‌یابد که علت آن به تعویق افتادن ایجاد جریان‌های گردابه‌ای تا پشت سیلندر کنترلی بود. اما در نسبت فاصله‌های بیش از ۲، اثرات سیلندر کنترلی به تدریج کاهش یافته و نیروهای لیفت و درگ وارد بر سیلندر اصلی افزایش می‌یابد. همچنین قرار گرفتن سیلندر کنترلی در فواصل نزدیک به سیلندر اصلی سبب به تاخیر افتادن ناحیه Lock-in به اعداد St.Vr بزرگتر از ۰.۹ می‌شود. در قسمت بعد دو سیلندر کنترلی با آرایش مثلثی در پشت سیلندر اصلی قرار داده شد. در آرایش مثلثی مشاهده گردید که قرار گرفتن سیلندرهای کنترلی در نسبت فواصل ۱ و ۲ برابر قطر سیلندر اصلی، فواصل بهینه جهت کاهش اثرات لیفت و درگ بر روی سیلندر اصلی می‌باشد. همچنین بررسی کانتورهای جریان در این نوع آرایش نشان داد قرار گرفتن سیلندرهای کنترلی به صورت مثلثی سبب ایجاد تغییر الگوی تشکیل گردابه‌ها در ناحیه پشت سیلندر اصلی می‌گردد. نتایج این پژوهش بیانگر این بود که چیدمان و فاصله بهینه قرار دادن سیلندرهای کنترلی به صورت یک سیلندر کنترلی در فاصله ۲ برابر قطر اصلی می‌باشد که بیشترین تاثیر را در کاهش نیروهای وارد بر سیلندر اصلی و دامنه ارتعاشات آن دارد.

۵. مراجع

1. Feng C.C., The measurement of vortex-induced effects in flow past a stationary and oscillating and D-section cylinder, [MASc thesis], Vancouver, University of British Columbia, 1968.S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, New York, (1998).
2. Naudascher E., Rockwell D., Flow-induced Vibrations, Rotterdam,Balkema Press, 1994.
3. Kwon S.H., Cho J.W., Park J.S., Choi H.S., "The effects of drag reduction by ribbons attached to cylindrical pipes", Ocean Engineering, Vol. 29, No. 15, pp.1945-1958, (2002).
4. Blevins R.D., Flow-Induced Vibration, 1st Ed., New York, Van Nostrand Reinhold Com., 1990.
5. Cho K.P., Cermak J.E., Lai M.L., Nielsen E.J., "Visco-elastic damping for windexcited motion of a five-story building frame", J. Wind Eng Indus. Aerodynamics, Vol. 77, pp. 269-281, (1998).
6. Swaroop K.Y., Kareem A., "Semi-active tuned liquid column dampers: experimental study", Journal of Structure Engineering, Vol. 129 No. 7, pp. 960-971, (2003).
7. Strykowski P.J., Sreenivasan K.R., "On the formation and suppression of vortex shedding' at low Reynolds numbers", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 218, 99. 71-107, (1999).
8. Jin-Ping O., Feng Xu., Yi-Qing X., "Numerical simulation of vortex induced vibration of three cylinders in regular triangle arrangement", Proceeding of the The 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan, (2009).
9. Filip V.A, John V.V., "Flow induced oscillation of marine risers with wake nterference", Proceeding of the Comsol Conference, Paris, France, (2010).
10. Govardhan, R., Williamson, C. H. K., "Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 420, pp. 85-130, (2000).
11. Lam, K., Gong, W.Q., So R.M.C., "Numerical simulation of transverse around four cylinders in an in-line square configuration", Journal of Fluids and Structures, Vol. 24, pp. 34-57, (2008).
12. Meneghini, J.R., Saltara, F., Soqueira, C.L.R., Ferrari Jr, J.A., "Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements", Journal of Fluid and Structures, Vol. 15, pp. 327-350, (2001).
13. Blackburn H.M., Govardhan R.N., C.H.K. Williamson, "A complementary numerical and physical investigation of vortex-indeced vibration", Journal of Fluids and Structures, Vol. 15, No. 3, pp. 481-488, (2000).
14. Blackburn, H.M., Henderson, R.D., "A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 385, pp. 255-286, (1999).