



یافتن فاصله بهینه و بررسی تاثیر سطح مقطع جسم کنترلی بر کاهش اثرات ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها در ناحیه قفل‌شدگی

علی آجیلیان ممتاز^{۱*} و انوشیروان فرشیدیان‌فر^۲

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی پدیده ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها و کاهش اثرات آن با بهره‌گیری از جسم کنترلی می‌باشد. به همین منظور ابتدا سیلندر استوانه‌ای شکل قرار گرفته بر روی بستر الاستیک و در معرض جریان یکنواخت سیال شبیه‌سازی می‌گردد. پس از مقایسه نتایج به دست آمده با سایر پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی مشابه و اطمینان از دقت و صحت نتایج، جسم کنترلی با سطح مقطع دایره‌ای و در ۵ نسبت فاصله مختلف در پشت سیلندر اصلی قرار داده می‌شود و ضمن بررسی تاثیر آن بر ضرایب لیفت و درگ میانگین و ماکزیمم دامنه نوسانات در ناحیه قفل‌شدگی، فاصله بهینه قرارگیری سیلندر کنترلی تعیین می‌گردد. سپس به بررسی تاثیر تغییر الگوی قرارگیری و سطح مقطع جسم کنترلی پرداخته می‌شود. به همین منظور ابتدا تاثیر قرارگیری دو سیلندر کنترلی به صورت هم‌راستا و عمود بر جریان در فاصله بهینه بدست آمده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در انتها تاثیر استفاده از جسم‌های کنترلی با سطح مقطع‌های مختلف و غیردایره‌ای که قطر هیدرولیکی برابر با سیلندر اصلی دارند، بررسی می‌گردد.

کلمات کلیدی: ارتعاشات؛ جسم کنترلی؛ گردابه؛ قفل‌شدگی.

Finding the optimum distance and studying the impact of cross-section of the control body on the reduction of vortex-induced vibrations effects in lock-in area

A. Ajilian Momtaz^{1,*} and A. Farshidianfar²

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng. Group, Ferdowsi Univ., Mashhad, Iran

² Associate Prof., Mech. Eng. Group, Ferdowsi Univ., Mashhad, Iran

Abstract

The objective of this study is to examine the phenomenon of vortex-induced vibrations and reduction of its effects using the control body. For that reason, first the circular cylinder located on the elastic foundation and subjected to uniform fluid flow, is simulated. After comparing the obtained results with those of other similar numerical and laboratory investigations and ensuring the accuracy and correctness of the results, the control body with a circular cross-section is placed behind the master cylinder at 5 different distance ratios and examining its effect on the mean lift and drag coefficients and maximum amplitude of oscillations in lock-in area and the optimal configuration and location of control cylinders are defined. Then, the effect of changing the arrangement and cross-section of the control body are studied. For that reason, first the effect of two control cylinders in parallel and perpendicular arrangement to the current at the optimal distance are studied. Finally, the impact of using the control bodies with different noncircular cross-sections, which have hydraulic diameter equal to the master cylinder, are investigated.

Keywords: Vibration; Control body; Vortex; Lock-in.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، پدیده ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها^۱ که از برخورد جریان سیال با جسم جامد بوجود می‌آید، در بسیاری از پژوهش‌های مربوط به مکانیک سازه و ارتعاشات مورد مطالعه قرار گرفته است. این‌گونه ارتعاشات در موارد زیادی مانند دودکش‌های بلند نیروگاه‌ها، کابل‌های نگهدارنده پل‌ها، سازه‌های دریایی، ساختمان‌ها و برج‌های مرتفع و لوله‌های استخراج مواد نفتی از اعماق دریاها دیده می‌شود. وقتی جریان یکنواخت سیالی از مجاورت یک سازه عبور می‌کند، این جریان دیگر یکنواخت و منظم نخواهد بود بلکه 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 برای نوسانی بر سازه اعمال می‌کنند. برای یک سازه ساکن، مثل یک استوانه، فرکانس تولید این گردابه‌ها تابع عدد اشتروهل، $St=f_v D/U$ ، است که در آن U سرعت یکنواخت سیال، D قطر استوانه و f_v فرکانس گردابه‌سازی است [۱]. حال اگر این استوانه توسط تکیه‌گاه الاستیکی نگهداری شود، در اثر اعمال نیروی برای نوسانی شروع به ارتعاش خواهد کرد. با شروع این نوسانات، سازه نیز بر سیال اثر گذاشته و فرکانس گردابه‌سازی را دست‌خوش تغییر می‌کند. در سرعت‌های کم این فرکانس همچنان از رابطه اشتروهل پیروی می‌کند ولی با افزایش سرعت، دیگر تابع این رابطه نخواهد بود. 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 قفل‌شدگی^۲ 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. این مسئله به خصوص در ساختمان‌های بلند که افراد زیادی در آن حضور دارند و یا لوله‌های استخراج مواد نفتی که در اعماق اقیانوس‌ها با صرف هزینه‌های گزاف نصب می‌گردند،

بیشتر مورد توجه است. لذا کاهش دامنه این‌گونه ارتعاشات امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

به طور کلی، دامنه ارتعاشات بوسیله سرعت جریان، خواص سیال، هندسه و ابعاد جسم، میزان دمپینگ و همچنین جهت جریان کنترل می‌شود. اما این پارامترها در اکثر مواقع، مانند جریان سیال بر روی لوله‌های استخراج مواد نفتی در اعماق دریاها، غیر قابل پیش‌بینی و کنترل می‌باشند. به همین منظور محققان و پژوهشگران از روش‌های دیگری جهت کاهش ارتعاشات حاصل از پدیده VIV استفاده می‌کنند. پارک^۳ و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۲ با قرار دادن ایرفویل در اطراف سازه توانستند نیروی درگ را تا حد زیادی کاهش داده و از تشکیل گردابه‌ها در پشت جسم بکاهند. در سال ۱۹۸۲، کواکالیس و ونگ^۴ [۴] با ایجاد خطوط جریان مارپیچ حول جسم تلاش کردند دامنه ارتعاشات حاصل از گردابه‌ها را کاهش دهند. علیرغم کاهش دامنه ارتعاشات و نیروی درگ با استفاده از روش‌های فوق، اما مشکلاتی از قبیل هزینه‌های بالای اجرا و مشکلات حمل و نقل، استفاده از این روش‌ها را محدود کرده است. پژوهشگران زیادی مانند بلوینز^۵ [۵] در سال ۱۹۹۰، هیگدرون^۶ [۶] در سال ۱۹۸۲، چو^۷ و همکاران [۷] در سال ۱۹۹۸ و پاتیل^۸ و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از افزایش میزان دمپینگ در سیستم، سعی در کاهش ماکزیمم دامنه ارتعاشات در رزونانس داشته‌اند. این عمل با استفاده از نصب دمپرهای ویسکو الاستیک در بین اعضای سازه که عمدتاً از جنس پلیمر است انجام می‌گیرد. امروزه از این روش در خطوط انتقال قدرت، توربین‌ها و فن‌ها استفاده می‌شود. از جمله روش‌های دیگر کاهش دامنه ارتعاشات، استفاده از خاصیت اینرسی ستون آب است. کواو^۹ و همکارانش [۹] در سال ۱۹۹۹ و ساروپ^{۱۰} [۱۰] 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

³ Park et al⁴ Kokkalis & Wong⁵ Blevins⁶ Hagedorn⁷ Cho⁸ Patil⁹ Kwok¹⁰ Swaroop¹ Vortex Induced Vibration (VIV)² Lock-in

داد که قطر سیلندر قرار گرفته در پشت سیلندر جلویی بر خطوط جریان و گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی تاثیرگذار است. همچنین ضریب درگ بر روی سیلندر قرار گرفته در عقب کمتر از سیلندر قرار گرفته در جلوی آن است.

علاوه بر قطر جسم کنترلی، فاصله و سطح مقطع آن در پشت سیلندر اصلی، از عوامل مهم و تاثیرگذار در استفاده از این روش 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 جسم کنترلی هم‌قطر با سیلندر اصلی و با آرایش‌ها و سطح مقطع‌های مختلف بر تشکیل گردابه‌ها، ضرایب لیفت و درگ و دامنه ارتعاشات در ناحیه قفل‌شدگی در پدیده VIV پرداخته شده است. در قسمت اول، به منظور یافتن فاصله بهینه، تاثیر قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در پشت سیلندر اصلی بررسی می‌گردد. سیلندر کنترلی در ۵ نسبت فاصله‌ی مختلف از $S/D=1/5$ تا $S/D=3/5$ قرار گرفته است که S فاصله مرکز سیلندر اصلی تا مرکز جسم کنترلی و D قطر سیلندر می‌باشد. سپس به منظور بررسی تاثیر سطح مقطع، تاثیر تغییر چیدمان و سطح مقطع جسم کنترلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به همین منظور ابتدا دو سیلندر کنترلی با آرایش‌های هم‌راستا و عمود بر جهت جریان سیال در پشت سیلندر اصلی و در فاصله بهینه بدست آمده در قسمت قبل قرار داده شده و تاثیر استفاده از این چیدمان بررسی می‌گردد. در قسمت بعد تاثیر استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع‌های غیر دایروی که قطر هیدرولیکی برابر با سیلندر اصلی دارند و در فاصله بهینه بدست آمده قرار داده شده‌اند، مطالعه می‌گردد. در انتها با مقایسه نتایج، فاصله بهینه و تاثیر تغییر سطح مقطع جسم کنترلی مشخص می‌گردد.

۲- جریان حول استوانه

در این قسمت به بررسی جریان بر روی استوانه و تشکیل گردابه‌ها در ناحیه پشت آن پرداخته می‌شود.

در سرعت‌های پایین سیال و در اعداد رینولدز بسیار کوچک (کوچکتر از ۰/۵)، جریان از نوع بسیار آهسته یا خزشی می‌باشد [۱۵]. اثرات اینرسی ناچیز و قابل صرف‌نظر

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 دیگر از روش‌های کاهش دامنه ارتعاشات در پدیده VIV، ایجاد زائده بر روی سطح جسم است. اوون^۱ و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۱ گزارش کرده‌اند که با استفاده از این روش و ایجاد زائده‌هایی به شکل نیمکره بر روی سطح جسم، نوسانات ناشی از گردابه‌ها تا حدود ۴۰٪ نیروی درگ تا ۲۵٪ کاهش می‌یابد. از این روش عمدتاً در دودکش‌ها و توربین‌های بادی استفاده می‌گردد. علیرغم مزایایی همچون سادگی اجرا و هزینه کم، اما در اکثر کاربردهای مهندسی، تغییر شکل هندسی عملی و مورد پذیرش نمی‌باشد. یکی از موثرترین روش‌های کنترل ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها، استفاده از سیلندر کنترلی (ثانویه)^۲ است. سری‌نی‌واسان^۳ و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۰۳ 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 سیلندر اصلی بکاهند. پینگ^۴ و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۹ با قرار دادن سه سیلندر قرار گرفته بر روی بستر الاستیک به صورت آرایش مثلثی که دو سیلندر کنترلی در جلوی سیلندر اصلی قرار داشتند، به بررسی تاثیر این چیدمان بر ضریب درگ و دامنه نوسانات سیلندرها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب درگ بر روی استوانه‌های جلویی بیشتر از سیلندر عقبی است. همچنین با استفاده از این آرایش دامنه نوسانات سیلندر عقبی نسبت به حالت قرار گرفتن یک سیلندر تنها در معرض جریان افزایش یافت. ون دن آبیله^۵ و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۰ به بررسی تاثیر قرار گرفتن دو سیلندر پشت سر هم که به صورت ثابت قرار داشتند بر تشکیل گردابه‌ها و ضریب درگ در پشت سیلندرها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان

¹ Owen

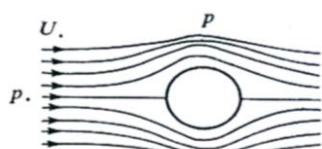
² control cylinder (secondary cylinder)

³ Sreenivasan

⁴ Jin-Ping

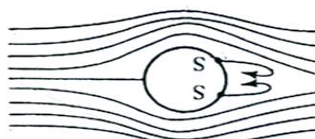
⁵ Van-den Abile

۱/۳ پسای کل است. ون کارمن به‌طور نظری و آزمایش نشان داده که در این ناحیه نسبت h/l برابر با ۰/۲۸۱ است.



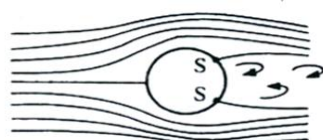
$$Re < 0.5$$

(الف)



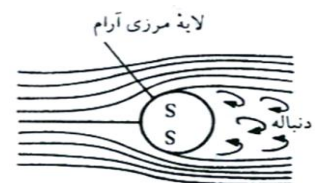
$$2 < Re < 30$$

(ب)



$$10^3 < Re < 90$$

(ج)



$$10^5 < Re < 2 * 10^3$$

(د)



$$Re > 2 * 10^5$$

(ه)

شکل ۱- جریان حول استوانه

تا عدد رینولدز $2 * 10^5$ لایه مرزی روی استوانه از نوع آرام است و بسته به شدت تلاطم جریان، به لایه مرزی متلاطم قبل از جدایی جریان، تبدیل می‌شود، همان‌طور که

است و خطوط جریان شباهت زیادی به یک سیال ایده‌آل (غیرلزج) دارد. برای این حالت، پسای فشار قابل صرف‌نظر است و تقریباً همه نیروی وارد بر استوانه، ناشی از اصطکاک است. در این حالت جدایی جریان مشاهده نمی‌شود. شکل ۱- الف خطوط جریان و توزیع فشار را برای این حالت نشان می‌دهد. در این محدوده نیروی پسا، مستقیماً متناسب با سرعت است یعنی اینکه رابطه بین $\log C_D$ و $\log Re$ تقریباً خطی است. در این حالت گردابه‌هایی در پشت جسم ایجاد می‌شود که با سطح آن تماس نداشته و از نوع آرام است.

با افزایش عدد رینولدز، مقدار نیروی اینرسی زیادتر می‌شود، به‌طوری که دیگر قابل صرف‌نظر کردن نیست و در این صورت تنها از طریق تجربی مقدار پسا یا ضریب آن، به دست می‌آید. خطوط جریان نیز به علت تشکیل یک سری گردابه‌های کم‌وبیش منظم در ناحیه برخاستگی یا دنباله، پشت جسم، حالت تقارن خود را از دست می‌دهد.

در محدوده اعداد رینولدز بین ۲ و ۳۰، جدایی لایه مرزی در نقطه S رخ می‌دهد، همان‌طور که در شکل ۱- ب نشان داده شده است. این دنباله به صورت دو گردابه ثابت با قدرت برابر و با جهت‌های مخالف، در پشت استوانه تشکیل می‌شود. در قسمت بیرونی ناحیه دنباله، حرکت سیال در همان مسیر اصلی جریان است. در این حالت یک لایه مرزی آرام در مجورت سطح جسم تشکیل شده و پس از رسیدن به پشت کره، جدایی جریان اتفاق می‌افتد. در این حالت نیروی مقاوم سیال توسط ترکیبی از نیروهای برشی و فشاری تعیین می‌گردد.

با افزایش بیشتر عدد رینولدز، گردابه‌ها در نقاط جدایی، در جهت جریان دراز می‌شوند و شروع به ارتعاش می‌کنند تا در حدود $Re=90$ ، بسته به شدت تلاطم جریان، از استوانه فاصله می‌گیرند، (شکل ۱- ج). این گردابه‌ها به‌طور منظم و تناوبی از بالا و پایین استوانه تشکیل شده و از بین می‌روند. این فرایند را با افزایش عدد رینولدز، می‌توان شدت داد تا اینکه دو ردیف گردابه در ناحیه دنباله ایجاد شود، که جهت آن‌ها مخالف یکدیگر است. علت صدایی که در اثر وزش باد از سیم‌های تلفن و برق و همچنین در پدیده ارتعاشات VIV به گوش می‌رسد، همین پدیده می‌باشد. این گردابه‌ها را گردابه‌های کارمن می‌نامند. در این مرحله، پسای فشار تقریباً

برابر سرعت جریان سیال بر روی دیواره آن قرار داده می‌شود. معادلات حرکت جریان سیال و جابجایی جسم جامد بر اثر نیروهای وارده از طرف سیال به‌طور همزمان و به صورت کوپل و با بهره‌گیری از روش عددی نیوتن-رافسون حل می‌گردد. حرکت جریان سیال در داخل کانال توسط معادلات ناویر-استوکس برای میدان سرعت $u=(u,v,w)$ و فشار p به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)] + \quad (1)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = F \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot u = 0$$

که در آن I بیانگر ماتریس یکه واحد و F نیروهای حجمی تاثیرگذار بر سیال است.

نیروهای فشاری و ویسکوز از طرف سیال بر سیلندر نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_T = -n \cdot (-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)) \quad (3)$$

که در آن n بردار عمود بر سطح است.

ضمناً از آن‌جا سیلندر به صورت یک درجه آزادی مدل شده است تنها در جهت عمود بر جریان می‌تواند نوسان کند.

شرایط استفاده شده در این شبیه‌سازی، مشابه شرایط آزمایشگاهی استفاده شده توسط گواردان و ویلیامسون [۱۸]

در سال ۲۰۰۰ می‌باشد. جرم سیلندر، ثابت فنر و ضریب دمپینگ ثابت فرض شده و سرعت کاهیده با افزایش تدریجی

سرعت جریان تغییر می‌کند. همچنین عدد رینولدز با تغییر سرعت کاهیده تغییر می‌کند و مقادیر آن بین ۴۰ تا ۹۹۰

می‌باشد. نسبت جرم سیلندر که به صورت $m^* = \frac{4m}{\rho\pi D^2}$

تعریف می‌شود برابر $5.0/8$ 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 $\zeta = 0.024$ فرض گردیده است که با ضرب آن در مقدار

دمپینگ بحرانی، میزان دمپینگ ناشی از جریان سیال بدست می‌آید. عدد رینولدز مرجع جریان برابر $Re = \frac{UD}{\nu} = 556$

سرعت کاهیده $v_T = \frac{UT_n}{D} = 5$ می‌باشد که در آن U سرعت

میانگین جریان آزاد، T_n فرکانس ارتعاش آزاد در هوا و ν ویسکوزیته سینماتیک آب است.

در شکل ۱- د نشان داده شده است، که سبب می‌شود نقاط جدایی بیشتر به سمت عقب حرکت کنند. یعنی اینکه نقطه جدایی به سمت عقب‌تر جسم انتقال می‌یابد و در نتیجه ضریب پسا، C_D کاهش می‌یابد. این پدیده باعث باریک‌تر یا موجک‌تر شدن ناحیه گردابه‌ای می‌شود و چون پسای فشاری ناگهان کم می‌شود، ضریب پسا کاهش می‌یابد. برای $Re > 10^4$ ، مقدار C_D مستقل از عدد رینولدز است. پدیده فوق، یعنی کم شدن پسای فشاری و در نتیجه کاهش ضریب پسا، کاربردهای زیادی از جمله در طراحی توپ‌های گلف و طراحی بال هواپیما دارد.

۳- مدل‌سازی پدیده VIV

امروزه استفاده از روش‌های حل عددی و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در محاسبات کامپیوتری و علوم مهندسی کاربرد وسیعی پیدا کرده است و به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی وسایل مهندسی به کار می‌روند [۱۶]. یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای موجود در زمینه شبیه‌سازی، خصوصاً در زمینه پدیده‌های مربوط به برخورد بین جریان سیال و جامد، نرم‌افزار کامسول^۱ است که در این پروژه از آن به‌منظور شبیه‌سازی پدیده VIV استفاده شده است.

در شکل ۲، بزرگ‌نمایی میدان حل و مش‌بندی شبکه نشان داده شده است. طول دامنه حل برابر $D/2.8$ فرض 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. سیلندر نیز به صورت دایره‌ای به قطر D مدل گردیده که دیواره اطراف آن محل برخورد جریان سیال با جامد می‌باشد.

حل تحلیلی پدیده‌های مشترک بین سیال و جامد عموماً بسیار پیچیده می‌باشد و عمدتاً از روش‌های عددی برای حل این‌گونه مسائل استفاده می‌گردد. در پژوهش حاضر نیز با استفاده از مش‌بندی دینامیکی و کد FSI^۲، حرکت سیلندر اصلی بر اثر نیروهای وارد شده از طرف جریان سیال مدل گردیده است. با استفاده از این کد سرعت حرکت سیلندر

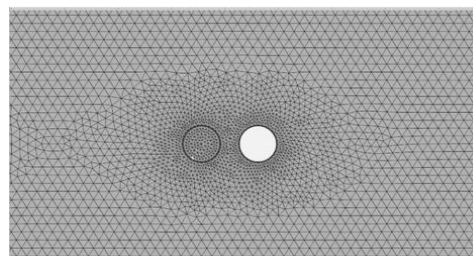
^۱ Comsol Multiphysics

^۲ fluid solid interaction

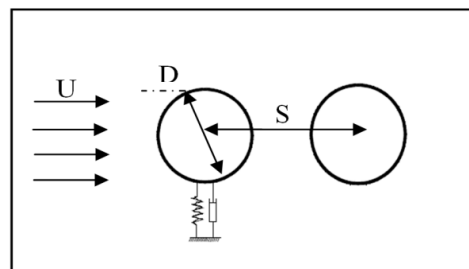
^۳ Govardhan & Williamson

در شکل‌های ۴ و ۵، نمودارهای تغییرات ضرایب لیفت و درگ برحسب زمان در عدد $Re=200$ در پشت سیلندر صلب استوانه‌ای شکل در معرض جریان سیال رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد روند تغییرات ضرایب فوق تناوبی و منظم بوده و ضرایب درگ و لیفت میانگین به ترتیب برابر $\bar{C}_d = 1/31$ و $\bar{C}_l = 0/431$ می‌باشد.

در جدول ۱ ضرایب میانگین لیفت و درگ حاصل از مدلسازی در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی و عددی سایر محققین مقایسه گردیده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده مطابقت بسیار خوبی با سایر پژوهش‌های مشابه، خصوصاً نتایج بدست آمده از پژوهش لام [۱۹] دارد که بیانگر مناسب بودن مش‌بندی شبکه و دقت خوب بکار گرفته شده در شبیه‌سازی می‌باشد.

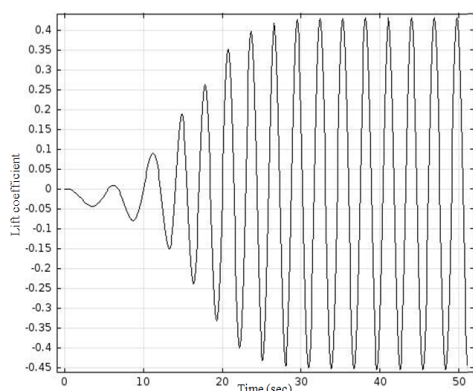


(الف)

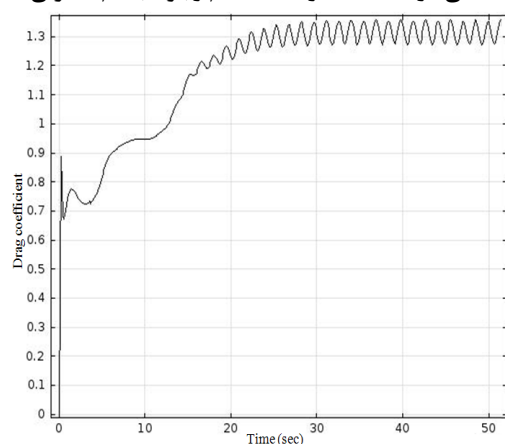


(ب)

شکل ۲- (الف) بزرگنمایی مش‌بندی شبکه، (ب) دامنه حل مسئله



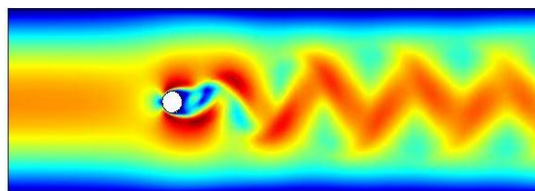
شکل ۴- نمودار تغییرات ضرایب لیفت در پشت سیلندر اصلی در $Re=200$ در حالت عدم وجود جسم کنترلی



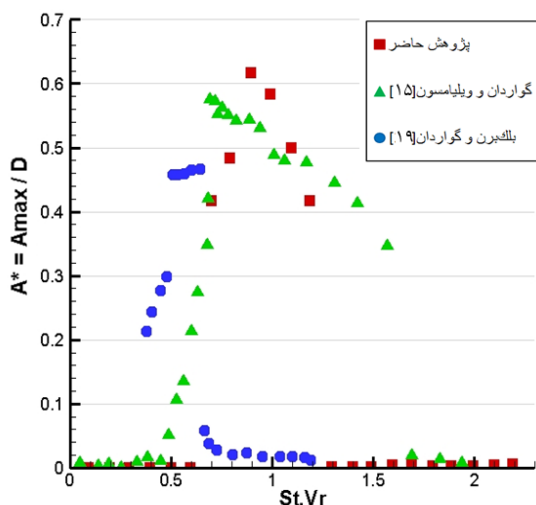
شکل ۵- نمودار تغییرات ضرایب درگ در پشت سیلندر اصلی در $Re=200$ در حالت عدم وجود جسم کنترلی

۴- نتایج و بحث

در شکل ۳ کانتور جریان و گردابه‌های ایجاد شده در پشت یک سیلندر صلب قرار گرفته در معرض جریان سیال هنگامی که عدد رینولدز جریان برابر ۲۰۰ است نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد گردابه‌های ون کارمن بر اثر فشار منفی در پشت سیلندر به صورت متقارن ایجاد شده‌اند و سبب وارد کردن نیروهای درگ و لیفت به ترتیب در جهت جریان سیال و عمود بر آن بر سیلندر شده و آن را وادار به حرکت نوسانی می‌کنند. از طرف دیگر با توجه به شکل ۳ ملاحظه می‌گردد که 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.



شکل ۳- کانتور جریان و گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی در حالت عدم وجود سیلندر کنترلی در $Re=200$ و $t=100s$



شکل ۶- مقایسه تغییرات A^* برحسب $St.Vr$ با نتایج سایر محققین در حالت عدم وجود جسم کنترلی

۴-۱- استفاده از یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در پشت سیلندر اصلی

در شکل ۷ کانتورهای برخورد جریان سیال با سیلندر اصلی در حالتی که یک سیلندر کنترلی در پشت آن قرار گرفته نشان داده شده است.

سیلندرهایی کنترلی در فواصل بسیار نزدیک تا نواحی دورتر نسبت به سیلندر اصلی یعنی از نسبت فاصله $S/D=1/5$ تا $S/D=3/5$ قرار گرفته‌اند. همان‌طور که از شکل ۶ ملاحظه می‌گردد تا نسبت فاصله $S/D=2$ تشکیل گردابه‌ها به طور کامل تا پشت سیلندر کنترلی به تعویق افتاده است. اما در نسبت $S/D=2/5$ 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 $S/D=3/5$ 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 همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است تا هنگام قرارگیری سیلندر کنترلی در نسبت فاصله $S/D=2/5$ تشکیل گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر کنترلی به صورت متقارن می‌باشند. اما از نسبت فاصله برابر $S/D=3$ و بعد از آن الگوی تشکیل گردابه‌ها تغییر کرده و به صورت غیرمقارن تشکیل می‌گردند.

جدول ۱- مقایسه ضرایب لیفت و درگ میانگین با نتایج سایر محققین در $Re=200$ در حالت عدم وجود جسم کنترلی

پژوهش حاضر	پینگ [۱۳]	لام ^۱ [۱۹]	فارنت ^۲ [۲۰]	منگینی ^۳ [۲۱]	
\bar{C}_l	۰/۴۳۱	۰/۳۹۹	۰/۴۲۶	۰/۵۱	۰/۵
\bar{C}_d	۱/۳۱	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۶	۱/۳۰

همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نوسانات سیلندر قرار گرفته بر روی بستر الاستیک، در شکل ۶ نمودار دامنه نوسانات بی‌بعد (A^*) برحسب سرعت کاهیده نشان داده شده و با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۱۸] و نتایج عددی بلک‌برن و گواردان [۲۲] مقایسه گردیده است. دامنه نوسانات بی‌بعد از تقسیم ماکزیمم دامنه نوسان سیلندر اصلی (A_{max}) بر قطر آن بدست آمده و سرعت کاهیده با ضرب $\frac{U_{Tn}}{D}$ در عدد اشتروهاال، نرمالیزه شده است. عدد اشتروهاال مطابق نتایج آزمایشگاهی بلک‌برن و اندرسون^۴ [۲۳]، که در سال ۱۹۹۹ انجام گردیده، در شبیه‌سازی دوبعدی برابر $0/225$ فرض شده است. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد ماکزیمم دامنه نوسان 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 آزمایشگاهی مرجع [۱۸] مطابقت بهتری دارد. با توجه به شکل ۶ ملاحظه می‌گردد که در شبیه‌سازی حاضر ناحیه قفل‌شدگی در اعداد $St.Vr$ بین $0/7$ تا $1/2$ 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.

¹ Lam
² Farrant
³ Meneghini
⁴ Blackburn & Henderson

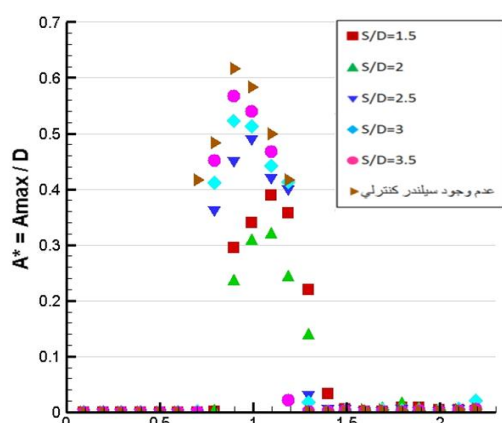
جدول ۲- مقایسه ضرایب لیفت و درگ میانگین در حالت

قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در $Re=200$

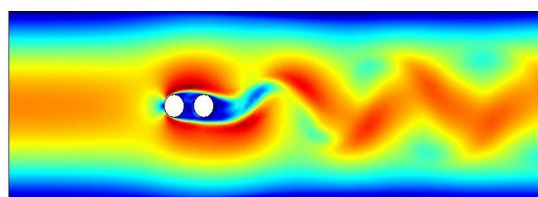
S/D=	S/D=	S/D=	S/D=	S/D=	بدون سیلندر کنترلی
۳/۵	3	۲/۵	2	۱/۵	
۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۴۳۱ \bar{C}_l
۱/۳۰	۱/۲۹	۱/۲۴	۰/۹۳	۱/۰۳	۱/۳۱ \bar{C}_d

با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که در نسبت فاصله‌های $S/D=1/5$ و $S/D=2$ ، مقادیر ضرایب لیفت و درگ میانگین در پشت سیلندر اصلی کاهش یافته است به طوری که در حالت $S/D=2$ 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 $S/D=2/5$ و بزرگتر از آن، از تاثیر قرار گرفتن سیلندر کنترلی بر کاهش ضرایب لیفت و درگ به تدریج کاسته شده و در حالت $S/D=3/5$ سیلندر کنترلی تقریباً 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.

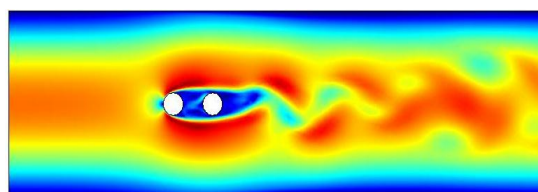
در شکل ۸ تغییرات A^* برحسب $St.Vr$ در حالتی که یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در فواصل مختلف از سیلندر اصلی قرار گرفته نشان داده شده است.



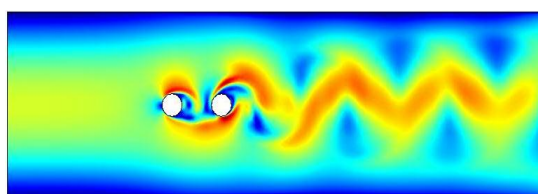
شکل ۸- تغییرات A^* برحسب $St.Vr$ در حالت استفاده از یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی



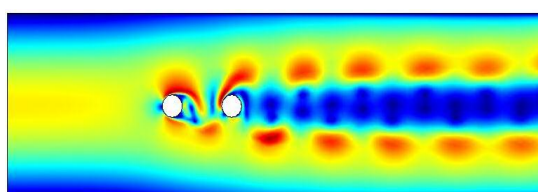
$S/D=1/5$



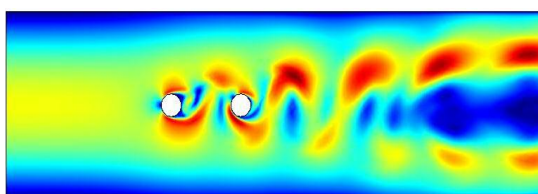
$S/D=2$



$S/D=2/5$



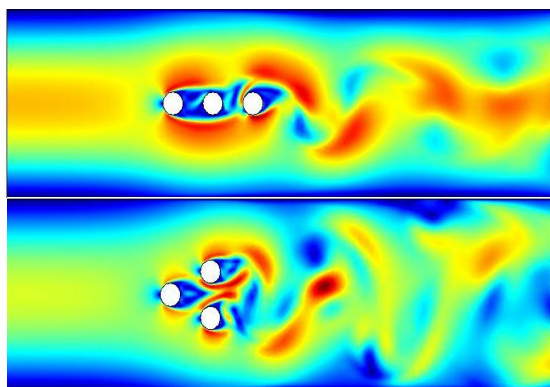
$S/D=3$



$S/D=3/5$

شکل ۷- کانتور جریان در حالت قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی با آرایش خطی در نسبت فاصله‌های S/D مختلف در $St.Vr=1/1$

در جدول ۲ ضرایب لیفت و درگ میانگین در پشت سیلندر اصلی هنگام قرار گرفتن یک سیلندر کنترلی به صورت خطی در پشت سیلندر اصلی در عدد $Re=200$ ارائه شده است.



شکل ۹- کانتور جریان در حالت قرار گرفتن دو سیلندر کنترلی به صورت هم‌راستا و عمود بر جریان در $S/D=2$ و $St.Vr=1/1$

با توجه به شکل ۹ ملاحظه می‌گردد که قرار گرفتن سیلندر کنترلی به صورت هم‌راستا با جریان سیال سبب جلوگیری از تشکیل گردابه‌های منظم و متناوب کارمن در پشت سیلندر اصلی شده و ایجاد آن‌ها را تا ناحیه پایین‌دست سیلندرها کنترلی به تعویق می‌اندازد. اما در هنگام قرارگیری سیلندرها کنترلی در جهت عمود بر جریان، گردابه‌ها در ناحیه‌ی باریک بین سیلندرها کنترلی و سیلندر اصلی تشکیل می‌گردد. هرچند که شدت تشکیل گردابه‌ها نسبت به حالت عدم وجود سیلندرها کنترلی کمتر می‌باشد، اما در این حالت نسبت به حالت قرارگیری سیلندرها کنترلی به صورت هم‌راستا با جریان نیروهای فشاری بیشتری بر سیلندر اصلی وارد می‌آید. از طرف دیگر در هنگام قرارگیری سیلندرها کنترلی به صورت هم‌راستا با جریان تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر کنترلی به صورت متقارن می‌باشد. اما در آرایش عمود بر جریان تشکیل گردابه‌ها به صورت نامتقارن و با الگوی نامنظم می‌باشد.

در جدول ۳ تغییرات ضرایب لیفت و درگ میانگین در عدد $Re=200$ و آرایش‌های مختلف دو سیلندر کنترلی در پشت سیلندر اصلی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در آرایش هم‌راستا با جریان، ضرایب میانگین لیفت و درگ میانگین به ترتیب حدود ۰.۴۹٪ و ۰.۲۶٪ کاهش یافته است. کاهش این ضرایب به دلیل دور شدن ناحیه تشکیل گردابه‌ها از سیلندر اصلی و قرار گرفتن آن در پشت سیلندر کنترلی دوم است که سبب کاهش نیروهای لیفت و درگ وارد بر سیلندر اصلی می‌گردد. از طرف دیگر ملاحظه

نیروی مقاوم سیال ترکیبی از نیروهای برشی و فشاری است. با افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، ناحیه گردابه‌ای پشت کره گسترش می‌یابد و نیروی فشاری سهم مهم‌تری در تعیین نیروی مقاوم کل و ارتعاشات سیلندر اصلی خواهد داشت. اما قرار گرفتن سیلندر ثانویه در فواصل نزدیک به سیلندر اصلی سبب کاهش نیروی فشاری و تشکیل گردابه‌ها در فاصله دورتری از سیلندر اصلی شده و در نتیجه دامنه نوسانات آن نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد در حالت نسبت $S/D=1/5$ و $S/D=2$ که سیلندر ثانویه بسیار نزدیک به سیلندر اصلی است، دامنه نوسانات کاهش یافته است به طوری که ماکزیمم مقدار A^* از 0.607 در هنگام عدم وجود سیلندر کنترلی، به 0.31 در حالت قرارگیری سیلندر کنترلی در نسبت $S/D=2$ رسیده است. از طرف دیگر با افزایش فاصله سیلندر کنترلی و در نسبت‌های $S/D=2/5$ ، $S/D=3$ و $S/D=3/5$ ، 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 با توجه به شکل ۸ ملاحظه می‌گردد که در نسبت فاصله‌های $S/D=1/5$ و $S/D=2/5$ نه تنها میزان دامنه نوسانات سیلندر اصلی کاهش یافته است بلکه ناحیه قفل‌شدگی نیز در اعداد $St.Vr$ بین 0.9 تا $1/3$ روی می‌دهد. در حالی که در سایر حالات، مشابه حالت عدم وجود سیلندرها کنترلی، ناحیه قفل‌شدگی و ماکزیمم دامنه نوسانات در اعداد $St.Vr$ بین 0.7 تا $1/2$ روی می‌دهد.

باتوجه به نتایج به دست آمده در این قسمت، فاصله بهینه قرارگیری جسم کنترلی در نسبت فاصله $S/D=2$ می‌باشد. لذا در ادامه با قرار دادن جسم کنترلی در نسبت فاصله $S/D=2$ ، به بررسی تاثیر تغییر الگوی قرارگیری جسم کنترلی و سطح مقطع آن پرداخته می‌شود.

۴-۲- استفاده از دو سیلندر کنترلی به صورت هم‌راستا

و عمود بر جریان در پشت سیلندر اصلی

در شکل ۹ کانتورهای جریان در حالت استفاده از دو سیلندر کنترلی به صورت هم‌راستا و عمود بر جهت جریان در پشت سیلندر اصلی در نسبت فاصله $S/D=2$ نشان داده شده است.

حالت عدم وجود سیلندرهای کنترلی برابر 0.607 می‌باشد که در آرایش هم‌راستا با جهت جریان ماکزیمم مقدار آن برابر 0.34 و در آرایش عمود بر جهت جریان به 0.46 می‌باشد. به عبارت دیگر قرارگیری سیلندرهای کنترلی به صورت هم‌راستا با جهت جریان تاثیر بیشتری در کاهش ماکزیمم مقدار دامنه نوسانات در ناحیه قفل‌شدگی دارد. همچنین همان‌طور که ملاحظه می‌گردد روند تغییرات نمودار A^* برحسب $St.Vr$ در هر دو حالت قرار گرفتن سیلندرهای کنترلی بسیار شبیه به حالت قرار گرفتن یک سیلندر تنها در معرض جریان است اما گستره ناحیه قفل‌شدگی کاهش ناچیزی یافته و در آرایش هم‌راستا با جهت جریان بین اعداد $St.Vr$ بزرگتر از 0.8 و کمتر از $1/1$ و در آرایش عمود بر جریان بین اعداد $St.Vr$ بزرگتر از 0.8 و کمتر از $1/2$ روی می‌دهد. در حالی که در هنگام قرارگیری یک سیلندر تنها در معرض جریان ناحیه قفل‌شدگی در گستره اعداد $St.Vr$ بین 0.7 تا $1/2$ روی می‌دهد. یعنی در آرایش هم‌راستا با جریان نه تنها ماکزیمم دامنه نوسانات، بلکه گستره ناحیه قفل‌شدگی نیز کاهش بیشتری می‌یابد.

۴-۳- استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع

غیردایروی در پشت سیلندر اصلی

در شکل ۱۱ کانتور جریان در حالت استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع غیردایروی در نسبت فاصله $S/D=2$ نشان داده شده است. قطر هیدرولیکی مقاطع انتخاب شده برابر D می‌باشد. ضمن این‌که نسبت طول به عرض مستطیل برابر ۳ فرض گردیده است.

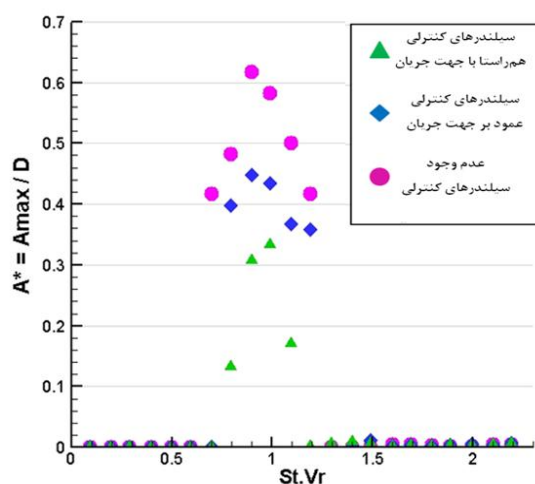
همان‌طور که از شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد جسم‌های کنترلی از تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر اصلی جلوگیری کرده و ایجاد آن را تا ناحیه پشت جسم کنترلی به تعویق انداخته‌اند. از مقایسه کانتورها مشاهده می‌شود که بیشترین شدت و ضخامت ناحیه تشکیل گردابه‌ها در پشت جسم کنترلی در هنگام استفاده از سطح مقطع مربعی و کمترین ضخامت در هنگام استفاده از سطح مقطع مستطیلی که به صورت هم‌راستا با جریان قرار دارد به وجود می‌آید. علاوه بر این، استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مستطیلی و به صورت عمود بر جریان، نه تنها در پشت سیلندر اصلی، بلکه در جلوی آن نیز از شدت ایجاد گردابه‌ها تا حد زیادی

می‌گردد در آرایش عمود بر جریان، ضرایب میانگین لیفت و درگ میانگین به ترتیب 24% و 10% کاهش یافته است. کاهش کمتر این ضرایب در این آرایش نسبت به آرایش هم‌راستا با جریان، به دلیل تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر اصلی و تغییر الگوی ایجاد آن‌ها می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه ضرایب لیفت و درگ میانگین در حالت قرار گرفتن دو سیلندر کنترلی با آرایش هم‌راستا و عمود بر جهت جریان در $Re=200$ و $S/D=2$

	بدون سیلندر کنترلی	آرایش هم‌راستا با جهت جریان	آرایش عمود بر جهت جریان
\bar{C}_l	۰/۴۳۱	۰/۲۲	۰/۳۳
\bar{C}_d	۱/۳۱	۰/۹۸	۱/۱۸

در شکل ۱۰ تغییرات A^* برحسب $St.Vr$ زمانی که دو سیلندر کنترلی با آرایش‌های هم‌راستا و عمود بر جهت جریان در نسبت فاصله $S/D=2$ قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تغییرات A^* برحسب $St.Vr$ در حالت استفاده از دو سیلندر کنترلی با آرایش‌های هم‌راستا و عمود بر جریان در $S/D=2$

با توجه به شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد که قرار گرفتن سیلندرهای کنترلی در پشت سیلندر اصلی سبب کاهش دامنه نوسانات سیلندر اصلی می‌گردد. ماکزیمم مقدار A^* در

مقطع مربع، کاهش ضرایب لیفت و درگ میانگین نسبت به سطح مقطع مستطیلی بسیار کمتر می‌باشد.

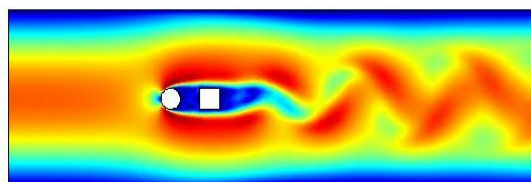
جدول ۴- مقایسه ضرایب لیفت و درگ میانگین در حالت قرار گرفتن جسم کنترلی با سطح مقطع غیردایروی

در $Re=200$ و $S/D=2$

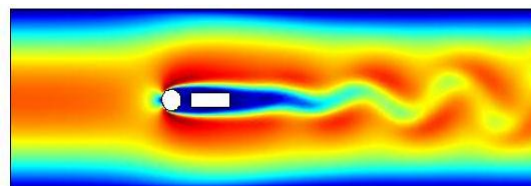
بدون جسم کنترلی	مربع	مستطیل در راستای جریان	مستطیل عمود بر جریان
\bar{C}_l	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۲۱
\bar{C}_d	۱/۳۱	۱/۱۹	۱/۰۱

در شکل ۱۲ تغییرات A^* برحسب $St.Vr$ هنگام استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع غیردایروی در نسبت فاصله $S/D=2$ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد که در همه حالات ماکزیمم دامنه نوسانات کاهش یافته است. ماکزیمم مقدار A^* در حالت عدم وجود سلندرها کنترلی برابر $0/607$ می‌باشد که در هنگام استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مربعی، مستطیل در راستای جریان و عمود بر آن به ترتیب مقدار آن به $0/47$ و $0/42$ می‌رسد. به عبارت دیگر استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مستطیلی و به صورت عمود بر جریان تاثیر بیشتری در کاهش ماکزیمم مقدار دامنه نوسانات در ناحیه قفل‌شدگی دارد. همچنین همان‌طور که ملاحظه می‌گردد روند تغییرات نمودار A^* برحسب $St.Vr$ در هنگام استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مربعی مشابه حالت قرار گرفتن یک سیلندر تنها در معرض جریان است اما در این حالت گستره ناحیه قفل‌شدگی افزایش یافته و در بین اعداد $St.Vr$ بزرگتر از $0/6$ و کمتر از $1/6$ روی می‌دهد. در حالی که در هنگام قرارگیری یک سیلندر تنها در معرض جریان ناحیه قفل‌شدگی در گستره اعداد $St.Vr$ برابر $0/7$ تا $1/2$ روی می‌دهد. از طرف دیگر از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مستطیلی، علاوه بر افزایش گستره ناحیه قفل‌شدگی، سبب تغییر روند تغییرات A^* نیز شده و در ناحیه بعد از قفل‌شدگی (اعداد $St.Vr$ بزرگتر از $1/6$)، دامنه نوسانات به طور نامنظم تغییر کرده و به سمت صفر میل نمی‌کند. در حالی که در آرایش مربعی، مشابه حالت عدم وجود جسم کنترلی، دامنه نوسانات قبل و بعد از ناحیه قفل‌شدگی بسیار ناچیز می‌باشد.

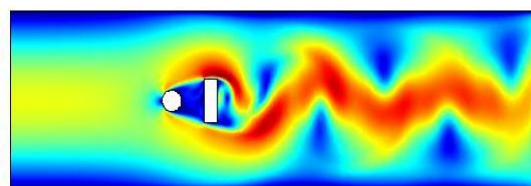
جلوگیری می‌کند که سبب کاهش نیروهای وارد شده بر سیلندر اصلی می‌گردد. از طرف دیگر با توجه به شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد که تشکیل گردابه‌ها در پشت جسم کنترلی با سطح مقطع چهارضلعی مشابه حالت عدم وجود جسم کنترلی و به صورت متقارن و منظم می‌باشد.



الف - مربع



ب- مستطیل در راستای جریان



ج- مستطیل عمود بر جریان

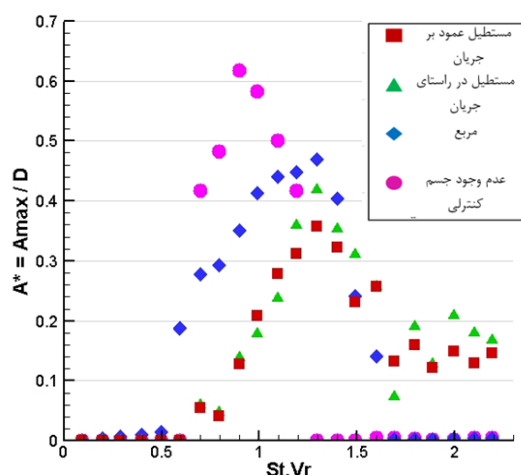
شکل ۱۱- کانتور جریان در حالت قرار گرفتن جسم کنترلی با سطح مقطع غیردایروی در $S/D=2$ و $St.Vr=1/1$

در جدول ۴ تغییرات ضرایب لیفت و درگ میانگین در عدد $Re=200$ و در هنگام استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع چهارضلعی در پشت سیلندر اصلی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تاثیر استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مستطیلی و به صورت عمود بر جریان بیشتر از دو حالت دیگر بوده و ضرایب لیفت و درگ میانگین به ترتیب حدود 23% و 52% کاهش یافته است. علت اصلی کاهش این ضرایب، با توجه به شکل ۱۱، کاهش ضخامت و دور شدن ناحیه تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر اصلی و قرار گرفتن آن در پشت جسم کنترلی است که سبب کاهش نیروهای لیفت و درگ وارد بر سیلندر اصلی می‌گردد. از طرف دیگر ملاحظه می‌گردد در هنگام استفاده از جسم کنترلی با سطح

گرفتن سیلندر کنترلی در فاصله ۲ برابر قطر سیلندر اصلی، فاصله بهینه جهت کاهش نیروهای وارد شده بر سیلندر اصلی و دامنه نوسانات آن می‌باشد.

در قسمت بعد دو سیلندر کنترلی با دو آرایش مختلف هم‌راستا با جهت جریان سیال و عمود بر آن در پشت سیلندر اصلی و در نسبت فاصله بهینه $S/D=2$ که در قسمت قبل به دست آمده بود، قرار داده شد. نتایج بیانگر آن بود که برخلاف آرایش هم‌راستا با جریان، در هنگام قرارگیری سیلندرهایی کنترلی به صورت عمود بر جریان، الگوی تشکیل گردابه‌ها تغییر کرده و به صورت نامنظم و نامتقارن تشکیل می‌گردد. اما در هر دو آرایش نیروهای وارد بر سیلندر اصلی و دامنه نوسانات آن کاهش می‌یابد. هرچند که تاثیر آرایش هم‌راستا با جریان بسیار بیشتر می‌باشد.

در انتها استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع غیردایروی و به صورت مربع، مستطیل هم‌راستا با جریان و عمود بر آن در نسبت فاصله $S/D=2$ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد تغییر سطح مقطع تاثیری بر الگوی تشکیل گردابه‌ها نداشته و گردابه‌ها همچنان به صورت متقارن تشکیل می‌گردند. از طرف دیگر استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مستطیلی و به صورت عمود بر جریان نسبت به دو سطح مقطع دیگر تاثیر به مراتب بیشتری در کاهش دامنه ارتعاشات و ضرایب لیفت و درگ میانگین در پشت سیلندر اصلی دارد. علاوه بر این برخلاف سایر حالات، در هنگام استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع مستطیلی به صورت هم‌راستا و عمود بر جریان، در ناحیه بعد از قفل‌شدگی دامنه نوسانات سیلندر اصلی به سمت صفر میل نکرده و به صورت نامنظم کاهش و افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از سطح مقطع مربعی سبب افزایش گستره ناحیه قفل‌شدگی می‌گردد. به طور کلی نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که فاصله بهینه قرار دادن سیلندرهایی کنترلی به صورت یک سیلندر کنترلی در نسبت فاصله $S/D=2$ می‌باشد که بیشترین تاثیر را در کاهش نیروهای وارد بر سیلندر اصلی و دامنه ارتعاشات آن دارد. بعد از آن استفاده از دو سیلندر کنترلی هم‌راستا با جریان و جسم کنترلی با سطح مقطع مستطیلی که به صورت عمود بر جریان قرار داده شود، تاثیر بیشتری در کنترل پدیده VIV دارند.



شکل ۱۲- تغییرات A^* بر حسب $St.Vr$ در حالت استفاده از جسم کنترلی با سطح مقطع غیردایروی در $S/D=2$

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی پدیده VIV بر روی سیلندر استوانه‌ای شکل قرار گرفته بر روی بستر الاستیک انجام گردید. به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، مقادیر ضرایب لیفت و درگ و دامنه نوسانات در ناحیه قفل‌شدگی در حالت عدم وجود جسم کنترلی با نتایج سایر پژوهش‌های مشابه در این زمینه مقایسه گردید که مطابقت بسیار خوبی را نشان داد. سپس تاثیر استفاده از جسم‌های کنترلی با آرایش‌ها و سطح مقطع‌های مختلف در پشت سیلندر اصلی مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا با قرار دادن یک سیلندر کنترلی در پشت سیلندر اصلی در نسبت فاصله‌های $1/5$ ، $2/5$ ، $3/5$ و $4/5$ برابر قطر سیلندر اصلی، ناحیه تشکیل گردابه‌ها بررسی و ضرایب لیفت و درگ و دامنه نوسانات اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که با قرار گرفتن سیلندر کنترلی تا نسبت فاصله $S/D=2$ ، ضرایب فوق و ماکزیمم دامنه نوسانات سیلندر در ناحیه قفل‌شدگی کاهش می‌یابد که علت آن به تعویق افتادن ایجاد جریان‌های گردابه‌ای و ویک‌ها 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 قفل‌شدگی به اعداد $St.Vr$ بزرگتر از $0/9$ می‌گردد. به عبارت دیگر نتایج نشان داد قرار

- [8] Patil A, Sungmoon J, Seunghole L, Soon-Duck K (2011) Mitigation of vortex-induced vibrations in bridges under conflicting objectives. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 99: 1243–1252.
- [9] Hitchcock PA, Glanville MJ, Kwok KCS (1999) Damping properties and wind induced response of a steel frame tower fitted with liquid column vibration absorbers. *Wind Eng Indust Aerodyn* 83(14): 183–196.
- [10] Swaroop KY, Kareem A (2003) Semi-active tuned liquid column dampers: experimental study. *Structure Engineering* 129(7): 960–971.
- [11] Owen JC, Bearman PW, Szewczyk AA (2001) Passive control of VIV with drag Reduction. *Fluids Structure* 15(9): 597–605.
- [12] Strykowski PJ, Sreenivasan KR (1999) On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers. *Fluid Mechanics* 218(99): 71–107.
- [13] Jin-Ping O, Feng X, Yi-Qing X (2009) Numerical simulation of vortex induced vibration of three cylinders in regular triangle arrangement. Proc of the The 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan.
- [14] Filip VA, John VV (2010) Flow induced oscillation of marine risers with wake interference. Proc of the Comsol Conference, Paris, France.
- [۱۵] نبهانی ن، مکانیک سیالات (۱۳۸۰) تهران، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۲۳۹–۲۵۱.
- [۱۶] نقه‌الاسلامی ن، اخوت الف، حاج عسگرخانی م ع، تنهایی ب (۱۳۹۰) مرجع کامل نرم‌افزار COMSOL Multiphysics تهران، آریا پژوه، ۸۵–۱.
- [17] Xiuling W, Darrell WP (2007) Benchmarking COMSOL Multiphysics 3.4. Department of Mechanical Engineering, University of Nevada Las Vegas.
- [18] Govardhan R, Williamson CHK (2000) Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *Fluid Mechanics* 420: 85–130.
- [19] Lam K, Gong WQ, So RMC (2008) Numerical simulation of transverse flow around four cylinders in an in-line square configuration. *Fluids and Structures* 24: 34–57.
- [20] Farrant T, Tana M, Price WG (2000) A cell boundary element method applied to laminar vortex-shedding from arrays of cylinders in various arrangements. *Fluids and Structures* 14: 375–402.
- [21] Meneghini JR, Saltara F, Soqueira CLR, Ferrari Jr JA (2001) Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in

۶- فهرست علائم و نشانه‌ها

عدد اشتروهل	St
فرکانس گردابه‌سازی، Hz	f_v
قطر استوانه، m	D
سرعت یکنواخت جریان سیال، m/s	U
فاصله مرکز سیلندر اصلی تا سیلندر کنترلی، m	S
نسبت جرم سیلندر	m^*
جرم جسم نوسان‌کننده بر واحد طول، kg/m	m
چگالی آب، kg/m ³	ρ
نسبت دمپینگ	ζ
عدد رینولدز	Re
سرعت کاهیده	V_r
فرکانس ارتعاش آزاد در هوا، s	T_n
ویسکوزیته سینماتیک آب، m ² /s	ν
ضریب درگ میانگین	\bar{C}_d
ضریب لیفت میانگین	\bar{C}_l
دامنه نوسانات بی‌بعد	A^*
ماکزیمم دامنه نوسان سیلندر اصلی، m	A_{max}

مراجع

- [1] Feng CC (1968) The measurement of vortex-induced effects in flow past a stationary and oscillating and D-section cylinder, [MASC thesis], Vancouver, University of British Columbia.
- [2] Naudascher E, Rockwell D (1994) Flow-induced Vibrations, Rotterdam. Balkema Press.
- [3] Kwon SH, Cho JW, Park JS, Choi HS (200) The effects of drag reduction by ribbons attached to cylindrical pipes. *Ocean Engineering* 29(15): 1945–1958.
- [4] Wong HY, Kokkalis A (1982) A comparative study of three aerodynamic devices for suppressing vortex-induced oscillation. *Wind Engineering Industrial Aerodynamics* 10(2): 21–29.
- [5] Blevins RD (1990) Flow-Induced Vibration, first Ed., New York, Van Nostrand Reinhold Company.
- [6] Hagedorn P (1982) On the computation of damped wind-excited vibrations of overhead transmission lines. *Sound and Vibration* 83(2): 253–271.
- [7] Cho KP, Cermak JE, Lai ML, Nielsen EJ (1998) Visco-elastic damping for windexcited motion of a five-story building frame. *Wind Eng Industrail Aerodynamics* 77: 269–281.

- investigation of vortex-induced vibration. *Fluids and Structures* 15(3): 481–488.
- [23] Blackburn HM, Henderson RD (1999) A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder. *Fluid Mechanics* 385: 255–286.
- tandem and side-by-side arrangements. *Fluid and Structures* 15: 327–350.
- [22] Blackburn HM, Govardhan RN, Williamson CHK (2000) A complementary numerical and physical