

کنترل جریان آشفته اطراف سیلندر با استفاده
از ترکیب صفحه و سیلندر کنترلی

Original Article

سید احمدرضا عرفانیان (کارشناس ارشد)

علیرضا جهانگیریان* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

در این مقاله جریان آشفته اطراف یک سیلندر با استفاده از یک پیکربندی کنترلی جدید شامل صفحه جداکننده در پایین دست جریان و سیلندر کنترلی در بالادست جریان به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. عدد رینولدز جریان برابر 1310° در نظر گرفته شد که شامل ریزش گردابه‌های نامتقارن اطراف سیلندر است. نهایتاً پارامترهایی نظیر ضریب پسا، برآ و توزیع ضریب فشار روی سطح مورد بررسی قرار گرفته است. مدل آشفته‌گی $K\omega - sst$ به منظور محاسبه‌ی ترم‌های تنش رینولدز به کار گرفته شد. برای ارزیابی کارایی این پیکربندی در کاهش نیروهای نوسانی وارد بر سیلندر، ابتدا یک صفحه به طول L در پایین دست جریان به سیلندر اصلی متصل و طول آن تغییر داده شد تا طول بهینه‌ی صفحه برای کنترل جریان به دست آید. نتایج نشان داد که اضافه شدن صفحه‌ی کنترلی، تأثیر قابل توجهی بر ساختار جریان دارد و دامنه‌ی نوسانات ضریب برآ و مقدار متوسط ضریب پسا سیلندر را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. در قسمت دوم یک سیلندر کنترلی با قطری کم‌تر از قطر سیلندر اصلی در بالادست آن قرار گرفت و فاصله‌ی آن تا سیلندر اصلی تغییر داده شد. مشخص شد که سیلندر کنترلی در بعضی از فواصل تأثیر مثبت چندانی بر دامنه‌ی نوسانات ضریب برآی سیستم ندارد در حالی که در همه‌ی فواصل بررسی شده، سیلندر کنترلی ضریب پسا سیلندر را کاهش می‌دهد. در ادامه سیلندر به همراه ترکیب همزمان سیلندر کنترلی و صفحه‌ی جداکننده در پیکربندی‌های بهینه‌ی به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این پیکربندی باعث کاهش قابل توجه ضرایب برآ و پسا کل سیستم شده و کارایی آن خصوصاً در کاهش ضریب پسا از هر کدام از حالت‌های سیلندر کنترلی و صفحه‌ی جداکننده به تنهایی، به مراتب بهتر است.

واژگان کلیدی: جریان مغشوش، جریان اطراف سیلندر، کنترل غیرفعال، ریزش گردابه، صفحه‌ی جداکننده، سیلندر کنترلی.

rerfani92@gmail.com
ajahan@aut.ac.ir

۱. مقدمه

یک ناحیه‌ی بازگردشی پایدار، متشکل از دو گردابه‌ی متقارن با قدرت یکسان و با گردش در راستای مخالف یکدیگر تشکیل می‌دهند. در محدوده‌ی اعداد رینولدز $150 \leq Re \leq 400$ لایه‌های مرزی از دو سمت بالایی و پایینی سطح سیلندر به صورت نامتقارن جدا می‌شود و دو لایه‌ی برشی نامتقارن ایجاد می‌کند. در این حالت دنباله^۱ ناپایدار می‌شود. هرگردابه‌ی که می‌ریزد الگوی جریان اطراف سیلندر را نامتقارن و ضرایب برآ و پسا را نوسانی می‌کند. تا عدد رینولدز 150° مسیر گردابه‌ی کارمن آرام است؛ در محدوده‌ی $300 \leq Re \leq 150$ گذار به توربولانس برای دنباله اتفاق می‌افتد و در محدوده‌ی زیر بحرانی^۲، یعنی در محدوده‌ی عدد رینولدز $3 \times 10^5 \leq Re \leq 300$ ریزش گردابه قوی و کماکان متناوب است.^[۱]

آثار نامطلوب ریزش گردابه و نیروهای آیرودینامیکی روی اجسام پخ، محققین را به فکر کنترل این پدیده انداخت. کنترل جریان به دو صورت فعال و غیرفعال

بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند ساختمان‌ها، برج‌ها، دودکش‌ها، پایه‌ی خطوط انتقال برق، پایه‌ی پل‌ها، کابل‌ها و لوله‌های زیر آب و لوله‌های استخراج نفت در رده‌ی اجسام پخ^۱ قرار می‌گیرند که شناخت و کنترل جریان سیال حول آنها از اهمیت به سزایی برخوردار است.^[۱] از جمله ویژگی‌های جریان اطراف اجسام پخ مانند سیلندر می‌توان به جدایش جریان، ریزش گردابه، نیروی درگ زیاد و ایجاد دنباله‌ی طولانی در پشت جسم اشاره کرد. در اعداد رینولدز خیلی پایین ($Re \leq 5$) جدایش جریان رخ نمی‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، $40 \leq Re \leq 5$ ، جریان از پشت سیلندر جدا شده و لایه‌های برشی جدا شده در دنباله‌ی سیلندر به هم می‌پیوندند و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۹/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۳/۲۲، پذیرش ۱۳۹۸/۳/۲۸، ۱۳۹۸/۳/۲۸

DOI:10.24200/J40.2019.52091.1485

بین سیلندرها (به خصوص قبل از فاصله‌ی بحرانی) حساس است. استفاده از صفحه‌ی جداکننده و سیلندرکنترلی به طور جداگانه برای کنترل جریان حول سیلندر توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته، ولی استفاده‌ی ترکیبی از این دو وسیله تاکنون به انجام نرسیده است. در تحقیق حاضر علاوه بر بررسی جریان اطراف سیلندر با صفحه‌ی جداکننده و سیلندرکنترلی به صورت مجزا، به بررسی کارایی عملکرد ترکیب هم زمان آن‌ها در کاهش نیروهای وارد به سیلندر از طرف جریان می‌پردازیم.

۲. معادلات حاکم و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر جریان غیر دائم، لزج و تراکم ناپذیر برای رژیم جریان آشفته به روش متوسط‌گیری رینولدز عبارت است از: [۱۳]

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-u_i' u_j' \right) \quad (2)$$

که در آن p فشار استاتیکی، t زمان، U_j سرعت و ν ویسکوزیته‌ی سینماتیکی است. عبارت اضافی که در انتها و سمت راست معادله‌ی ۲ ظاهر شده نشان‌گر اثر آشفتگی است. برای بسته شدن معادله‌ی ۲ این تنش‌های رینولدز $(-u_i' u_j')$ باید مدل‌سازی شود. در این تحقیق از مدل آشفتگی $K\omega - sst$ به دلیل توانایی این مدل در شبیه‌سازی جریان‌های دارای گرادیان فشار معکوس و دارای جدایش جریان که در جریان اطراف سیلندر یک ویژگی مهم به شمار می‌رود استفاده شده است. [۱۵، ۱۲] در مرز ورودی شرط یکنواخت ($u = U, v = 0$) اعمال شده است. عدد رینولدز بر حسب این سرعت یکنواخت بیان می‌شود:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (3)$$

که در آن U سرعت یکنواخت جریان آزاد، ρ چگالی، μ ویسکوزیته‌ی دینامیکی و D قطر سیلندر است. همه‌ی شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار ANSYS FLUENT ۱۷٫۲ و به صورت موازی انجام شد. پردازش موازی برای اجرای برنامه روی پردازش‌گرهای چندگانه برای کاهش زمان محاسبات و افزایش بهره‌وری صورت می‌گیرد. برای این کار حل‌گر غیردائم با دقت مضاعف و فشار مینا انتخاب شد. در تحقیق حاضر از حل‌گر کوپل برای حل معادلات مومنتوم و فشار استفاده شده است. دقت گسسته‌سازی معادلات هم در مکان و هم در زمان از مرتبه‌ی ۲ انتخاب شد. گرادیان متغیرهای حل شده در مرکز سلول‌ها به روش حداقل مربعات که نسبت به روش مبتنی بر سلول گرین - گوس^۴ دقت بیشتر و نفوذ کاذب کم‌تری دارد، گسسته‌سازی شد. باقی‌مانده‌های جرم و مومنتوم برای هم‌گرایی مطلق نیز 10^{-6} انتخاب شد. شرط عدم لغزش ($u = 0, v = 0$) بر سطح سیلندر اعمال شده است. همچنین در خروجی شرط مرزی فشار محیط و در دیواره‌های جانبی نیز شرط مرزی تقارن ($\frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0$) اعمال شده است. برای مقداردهی اولیه‌ی متغیرها از روش هیبرید استفاده شد. مقداردهی اولیه به این روش مجموعه‌ی بی‌اثر و عمل‌ها و روش‌های میان‌یابی مرزی است. این روش معادله‌ی لاپلاس را برای ایجاد یک میدان سرعت متناظر با دامنه‌های هندسی پیچیده و یک میدان فشار که وصل‌کننده‌ی

صورت می‌گیرد. کنترل فعال نیازمند انرژی خارجی است در حالی که کنترل غیرفعال به انرژی خارجی نیاز ندارد. از جمله ابزارهای مورد استفاده در کنترل غیر فعال می‌توان به صفحه‌ی جداکننده و سیلندرکنترلی اشاره کرد. [۳] جریان اطراف سیلندر به علت کاربرد گسترده در صنایع مهندسی و وجود پدیده‌های پیچیده‌ی سیالاتی نظیر جدایش جریان و ریزش گردابه مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. پژوهش‌گران مشخصات دینامیکی میدان‌های فشار و سرعت جریان تراکم ناپذیر در رژیم‌های آرام و آشفته پشت سیلندر دایروی را به صورت عددی به روش حجم محدود مورد بررسی قرار دادند. [۴] جریان آشفته در اعداد رینولدز 1000 و 3900 با استفاده از مدل اغتشاشی $K - \epsilon$ استاندارد و $K - \epsilon$ realized و همچنین $K\omega - sst$ بررسی و توانایی این مدل‌ها در محاسبه‌ی ضرایب برآ و پسا نیز تأیید شد. نتایج بررسی جریان روی یک سیلندر در رینولدز 3900 ، هم به صورت عددی (شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ) و هم به صورت تجربی با سیم داغ و PIV نشان داد [۵] که با نتایج شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برخی از محققین مطابقت خوبی دارد اگرچه با نتایج تجربی برخی دیگر مقادیر تفاوت دارد. بررسی تجربی اثر صفحه‌ی جداکننده روی جریان دنباله‌ی پایین دست یک سیلندر دایروی که به صورت متقارن در کانال قرار داده شده، [۶] در حالی که فاصله‌ی L/D از صفر تا 1.5 تغییر داده شد و عدد رینولدز نیز بین 2400 تا 3000 بود، نشان داد که صفحه‌ی جداکننده روی پایداری آشفتگی‌های دنباله تأثیر گذاشته و در $L/D = 1$ نوسانات سرعت محو شدند. همچنین در بررسی جریان اطراف یک سیلندر با صفحه‌ی جداکننده، [۷] اثر تغییر طول صفحه و عدد رینولدز روی مشخصات جریان نشان داد که اگر طول صفحه از طول بحرانی بیشتر باشد، ریزش گردابه کاملاً محو می‌شود. تغییرات ضرایب پسا و برآ با توجه به طول صفحه دارای دو الگوی فقط کاهشی و کاهش کلی با افزایش جزئی می‌باشد. الگوی اول در رینولدزهای کم‌تر از 1800 و الگوی دوم در رینولدزهای بالاتر روی می‌دهد. همچنین هنگامی که طول صفحه برابر قطر سیلندر است، فرکانس گردابه و ضرایب پسا و برآ بر حسب رینولدز به کمینه‌ی محلی خود می‌رسد. بررسی تجربی جریان اطراف دو سیلندر پشت سر هم که نزدیک دیوار قرار داده شده‌اند، [۸] در حالی که عدد رینولدز برحسب قطر 6300 بود و نسبت فاصله‌ی مرکز تا مرکز از 1.5 تا 6 تغییر کرد و نسبت فاصله‌ی بین دیوار و سیلندر نیز از 0.15 تا 2 متغیر بود، نشان داد که جریان شدیداً به پارامترهای فاصله‌ی مرکز تا مرکز و فاصله تا دیوار بستگی دارد. در ادامه، در بررسی جریان گذرنده از دو سیلندر پشت سر هم با قطرهای متفاوت و با استفاده از روش حجم محدود، [۹] قطر سیلندر پایین دست ثابت نگه داشته شد و قطر بالادستی از $D - 0.1D$ تغییر کرد. در حالی که عدد رینولدز برحسب قطر سیلندر اصلی 1000 و 1500 بود؛ فاصله‌ی بین سیلندرکنترلی و سیلندر اصلی نیز از $4D - 0.1D$ تغییر کرد، مشخص شد که نسبت فاصله و نسبت قطر تأثیر مهمی بر ضرایب برآ، پسا، توزیع فشار و فرکانس ریزش گردابه دارد. در بررسی جریان غیردائم و لزج اطراف یک سیلندر دایروی تا عدد رینولدز 1000 ، از یک روش عددی مرتبه‌ی ۲ براساس فرمولاسیون سرعت - فشار و روش‌های ابقایی استفاده شد. [۱۰] همچنین محققین کنترل غیرفعال ریزش گردابه پشت سیلندر به وسیله‌ی یک صفحه‌ی جداکننده‌ی متصل، با طول‌های مختلف را به صورت تجربی بررسی کردند؛ [۱۱] داده‌های جریان با تکنیک PIV در رینولدز 6300 اندازه‌گیری شد و طول صفحه از 0.2 تا 2.4 متغیر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که طول صفحه اثر مهمی بر مشخصات جریان دارد. بررسی مشخصات آیرودینامیکی دو سیلندر پشت سر هم به صورت تجربی در جریان یکنواخت در عدد رینولدز $10^2 \times 6.5$ [۱۲] نشان داد که نیروی نوسانی برآ و پسای سیلندر پایین دستی به شدت به فاصله‌ی

جدول ۱. نتایج استقلال از شبکه برای جریان گذرنده از سیلندر تنها در رینولدز ۳۹۰۰.

شبکه	تعداد سلول	$\overline{C_d}$	$\overline{C_l}$	St
درشت	۴۵۰۰۰	۱٫۵۴۰	۱٫۵۵۸	۰٫۲۲۶
متوسط	۹۹۰۰۰	۱٫۵۲۸	۱٫۵۴۰	۰٫۲۲۷
ریز	۱۸۵۰۰۰	۱٫۵۲۸	۱٫۵۴۲	۰٫۲۲۷

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج برای جریان گذرنده از سیلندر در رینولدز ۳۹۰۰.

نویسندگان	$\overline{C_d}$	$\overline{C_l}$	St
حاضر	۱٫۵۲	۱٫۵۴	۰٫۲۲۷
مرجع [۱۶]	۱٫۵۹	-	۰٫۲۳۵
مرجع [۱۷]	۱٫۶۵	-	۰٫۲۴۴
مرجع [۱۸]	-	-	۰٫۲۱۵
مرجع [۱۹]	۱٫۰۴	-	۰٫۲۱۰

استروهاال نشان‌دهنده‌ی فرکانس بدون بعد ریزش گردابه است که با استفاده از آنالیز فوریه مبتنی بر فرکانس غالب موجود در سری زمانی ضریب برآ به دست می‌آید:

$$St = \frac{fD}{U} \quad (4)$$

که در آن D قطر سیلندر، f فرکانس ریزش گردابه و U سرعت جریان آزاد است. ضرایب پسا و برآی سیستم چنین محاسبه شدند:

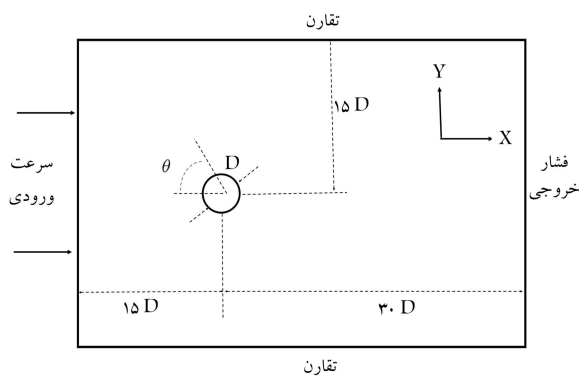
$$C_D(system) = C_D(rod) \times 0.5 \rho U^2 \times d + C_D(cylinder) \times 0.5 \rho U^2 \times D \quad (5)$$

$$C_L(system) = C_L(rod) \times 0.5 \rho U^2 \times d + C_L(cylinder) \times 0.5 \rho U^2 \times D \quad (6)$$

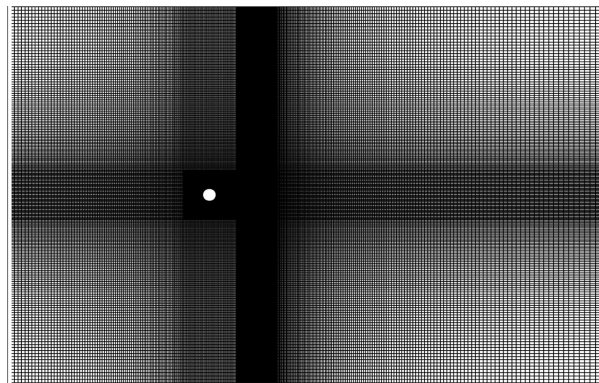
که در آن $C_D(rod)$ و $C_D(cylinder)$ به ترتیب ضریب پسای سیلندر و سیلندر کنترلی و $C_L(rod)$ و $C_L(cylinder)$ به ترتیب ضریب برآی سیلندر و سیلندر کنترلی است. با توجه به جدول ۱ شبکه‌ی «متوسط» برای ادامه‌ی شبیه‌سازی انتخاب شد. در جدول ۲ نتایج این شبیه‌سازی و مقایسه‌ی آن با دیگر نتایج ارائه شده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی کنونی با نتایج دیگران تطابق خوبی دارد.

در ادامه جریان اطراف سیلندر در عدد رینولدز ۱۳۱۰۰ شبیه‌سازی شده است. این عدد رینولدز متناظر با رژیم جریان زیر بحرانی برای جریان اطراف سیلندر است. خطوط هم‌تراز فشار و ورتیسیته‌ی جریان اطراف سیلندر برای رینولدز ۱۳۱۰۰ در شکل ۳ و توزیع ضریب فشار نسبی روی سطح سیلندر در شکل ۴ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود ریزش تناوبی گردابه پشت سیلندر اتفاق افتاده است و این تناوبی بودن ریزش گردابه به دلیل لایه‌های برشی است که به صورت متناوب از سطح سیلندر جدا شده و هم‌زمان یک نیروی برآی متناوب را به سیلندر وارد می‌کنند. همچنین خطوط هم‌تراز فشار نیز نشان می‌دهد که در لبه‌ی جلویی و نقطه‌ی سکون سیلندر مقدار فشار بیشتر و در پشت سیلندر مقدار فشار کم‌تر است و به همین سبب اختلاف فشار جلو و پشت سیلندر یک نیروی پسای قابل



شکل ۱. ابعاد هندسی دامنه و شرایط مرزی.



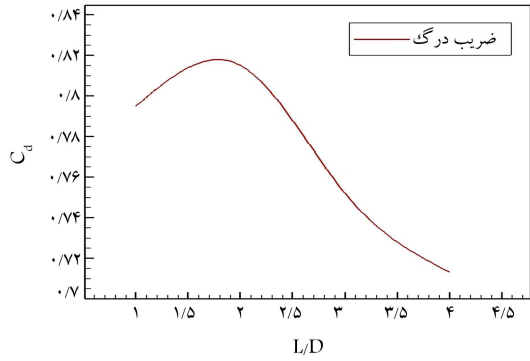
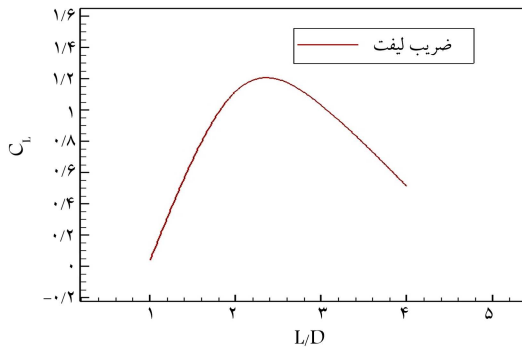
شکل ۲. شبکه‌ی چند بلوکی با سازمان ایجاد شده اطراف سیلندر و شبکه‌ی مستطیلی در سایر نواحی.

مقادیر فشار بالا و فشار پایین در دامنه‌ی محاسباتی به صورت هموار است، حل می‌کند. برای شبیه‌سازی جریان اطراف سیلندر، یک دامنه‌ی مستطیلی به طول $45D$ و عرض $30D$ انتخاب شد (شکل ۱)، به طوری که مرزهای دامنه کم‌ترین تأثیر را روی ریزش گردابه، ضرایب نیرو و سایر کمیت‌ها داشته باشد. مرز ورودی و خروجی به ترتیب در فاصله $15D$ و $30D$ از مرکز سیلندر قرار گرفته‌اند؛ مرکز سیلندر دارای مختصات $X = 15D$ و $Y = 15D$ است؛ قطر سیلندر معادل $D = 1m$ انتخاب شد. اطراف سیلندر یک شبکه‌ی چند بلوکی با سازمان ایجاد شد که نحوه‌ی بلوک‌بندی دامنه در شکل ۲ نشان داده شده است. شبکه‌ی تولید شده در نزدیکی دیوار سیلندر ریزتر است و هرچه از سطح سیلندر دور می‌شویم درشت‌تر می‌شود. برای سایر نواحی نیز یک شبکه‌ی مستطیلی نسبتاً درشت ایجاد شد.

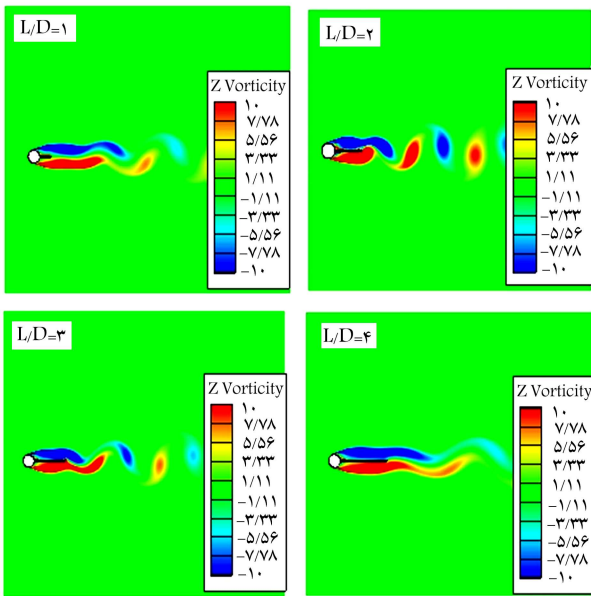
۳. ارائه‌ی نتایج و بحث

۳.۱. اعتبارسنجی

ابتدا نتایج برای سیلندر تنها در عدد رینولدز ۳۹۰۰ ارائه و با دیگر نتایج مقایسه شده است. برای این منظور نتایج استقلال از شبکه برای رینولدز ۳۹۰۰ در جدول ۱ آورده شده است. برای این منظور سه شبکه‌ی مختلف درشت، متوسط و ریز مورد استفاده قرار گرفت و کمیت‌هایی نظیر ضرایب برآ و پسا و عدد استروهاال مورد مقایسه قرار گرفت. در این جدول $\overline{C_d}$ و $\overline{C_l}$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی متوسط ضریب پسا و بیشترین دامنه‌ی نوسانات ضریب برآ است. همچنین عدد

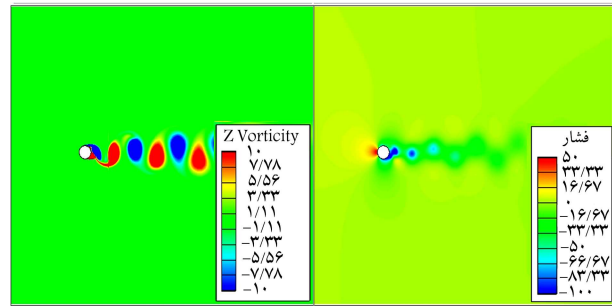


شکل ۶. تغییرات ضریب پسا و برآ کل با تغییر L/D .

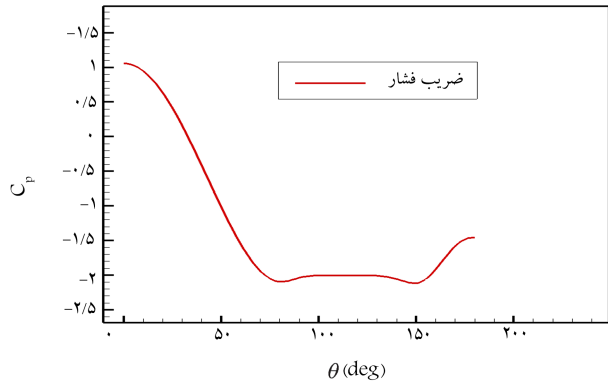


شکل ۷. خطوط هم‌تراز برای جریان گذرنده از سیلندر با صفحه‌ی جداکننده متصل پایین دست با طول‌های مختلف در عدد رینولدز 13100 .

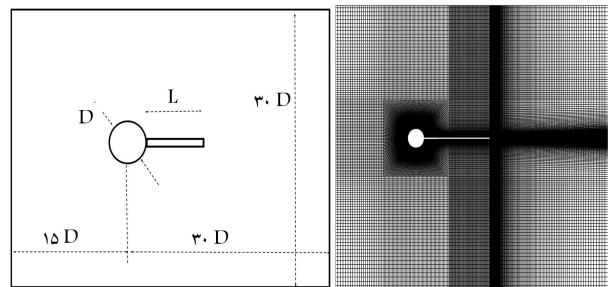
کل مقداری افزایش یافت و سپس با افزایش بیشتر $\frac{L}{D}$ ، $(\frac{L}{D} > 2)$ ، ضریب پسا به آرامی کاهش یافت. ضریب برآی کل نیز با افزایش $\frac{L}{D}$ ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. بیشترین کاهش ضریب برآ در $\frac{L}{D} = 1$ اتفاق افتاد که ضریب برآی سیستم حدوداً ۹۷ درصد کاهش یافت. ضریب پسا نیز در $\frac{L}{D} = 1$ تقریباً ۴۸ درصد نسبت به سیلندر تنها کاهش یافت (شکل ۶). البته بیشترین کاهش ضریب پسا در $\frac{L}{D} = 4$ اتفاق افتاد که این کاهش حدوداً ۵۴ درصد بود. خطوط هم‌تراز ورتیسیتی برای جریان اطراف سیلندر به همراه صفحه‌ی متصل پایین دست در شکل ۷ نشان



شکل ۳. خطوط هم‌تراز فشار استاتیکی (پاسکال) و ورتیسیتی برای جریان گذرنده از سیلندر در رینولدز 13100 .



شکل ۴. توزیع ضریب فشار روی سطح سیلندر در عدد رینولدز 13100 .



شکل ۵. ابعاد هندسی دامنه و شبکه‌ی چندبُلُکی سازمان‌یافته‌ی اطراف سیلندر و صفحه.

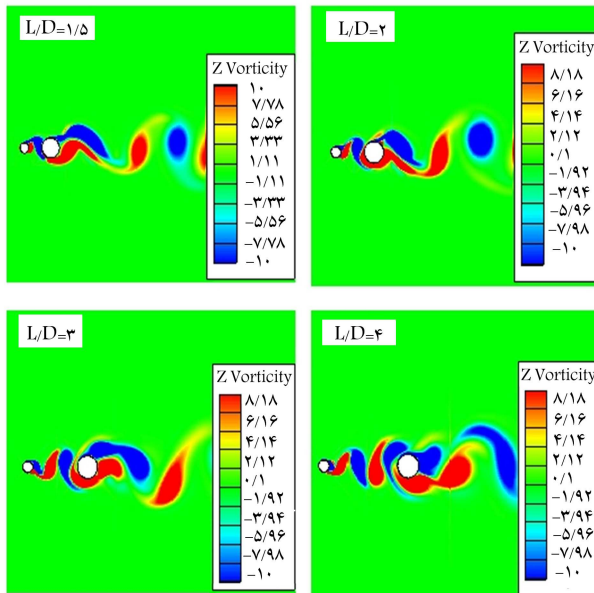
جدول ۳. ضرایب برآ و پسا و عدد استروهل برای جریان گذرنده از سیلندر تنها در عدد رینولدز 13100 .

مرجع	اندازه شبکه	$\overline{C_d}$	$\overline{C_l}$	St
مقاله‌ی حاضر	۹۹ هزار المان	۱,۵۳۸	۱,۷۳۳	۰,۲۳۰
[۲۰]	۸,۶ میلیون المان	۱,۳۵۱	-	۰,۲۰

توجه به سیلندر وارد می‌شود. مقادیر ضرایب برآ و پسا نیز در جدول ۳ آورده شده است.

۲.۳. سیلندر به همراه صفحه‌ی جداکننده در پایین دست

صفحه‌ی L به صورت افقی در راستای خط مرکزی به پایه‌ی سیلندر متصل شده است. پارامتر $\frac{L}{D}$ از ۱ تا ۴ تغییر کرد (شکل ۵). در شکل ۶ تغییرات ضرایب پسا و برآ با تغییرات $\frac{L}{D}$ نشان داده شده است. با افزایش $\frac{L}{D}$ از ۱ تا ۲، ضریب پسی



شکل ۱۰. خطوط هم‌تراز و رتیبسته برای سیلندر به همراه سیلندر کنترلی در بالادست.

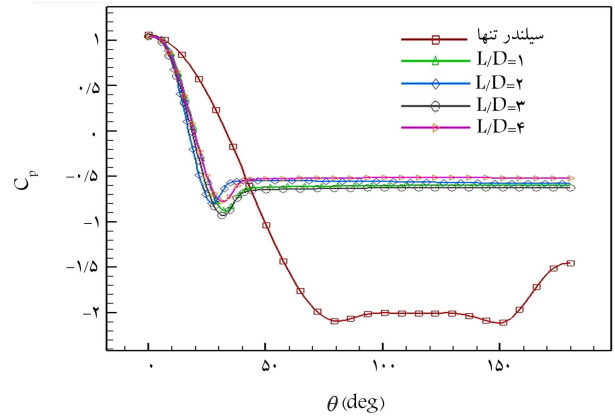
جدول ۵. ضرایب برآ و پسا برای سیلندر کنترلی (rod) و سیستم.

$C_l(system)$	$C_d(system)$	$C_l(rod)$	$C_d(rod)$	$\frac{C}{D}$
۱٫۹۳۲	۰٫۸۱۷	۰٫۶۶۰	۰٫۵۵۷	۱٫۵
۱٫۸۶۸	۰٫۸۹۶	۰٫۷۲۰	۰٫۶۶۶	۲
۱٫۶۳۲	۰٫۸۷۷	۰٫۷۸۸	۰٫۷۳۰	۳
۱٫۵۲۹	۱٫۰۰۸	۰٫۸۰۳	۰٫۷۵۴	۴

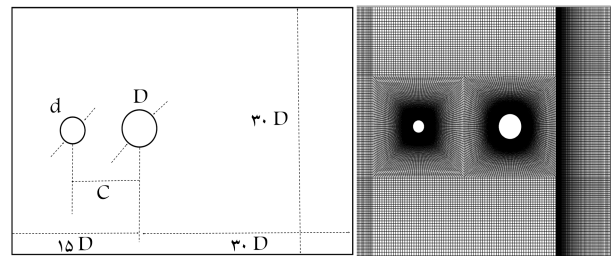
نیز برابر 13100 و بر حسب قطر سیلندر کنترلی تقریباً 6500 است. بنابراین جریان در مود ضربه‌ی دنباله قرار دارد [۲۲-۲۴] و برای همه‌ی فواصل $\frac{C}{D}$ ریزش گردابه از سیلندر کنترلی اتفاق می‌افتد (شکل ۱۰). ضرایب برآ و پسا برای سیلندر کنترلی و سیستم (شامل سیلندر و سیلندر کنترلی) در جدول ۵ ارائه شده است. ضریب برآی سیلندر در $\frac{C}{D} = 1/5$ به مقدار ۴ درصد افزایش یافت، در حالی که ضریب برآی سیستم در فواصل $\frac{C}{D} \geq 3$ کاهش یافت که مقدار این کاهش در $\frac{C}{D} = 4$ حدود ۱۱ درصد بود. ضریب پسای سیستم در همه‌ی فواصل بررسی شده کاهش یافت. مقدار کاهش ضریب پسای سیستم در فواصل $\frac{C}{D} = 1$ و $\frac{C}{D} = 4$ به ترتیب $47/5$ درصد و 35 درصد بود (شکل ۱۱). توزیع ضریب فشار روی سیلندر در شکل ۱۲ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود سیلندر کنترلی بالادست هم فشار نقطه‌ی سکون و هم فشار پایه‌ی سیلندر را کاهش داده و در نتیجه به کاهش قابل توجه ضریب پسا منجر شده است. واضح است که در $\frac{C}{D} = 4$ ضریب فشار نقطه‌ی سکون بیشترین کاهش را یافته و در $\frac{C}{D} = 2$ ضریب فشار پایه‌ی سیلندر بیشترین افزایش را داشته است.

۴.۳. ترکیب هم‌زمان سیلندر کنترلی و صفحه‌ی جداکننده

چنان‌که از نتایج شبیه‌سازی‌های قسمت‌های قبل دریافت شد، صفحه‌ی جداکننده هم ضریب پسا و هم ضریب برآ را کاهش داد در حالی که سیلندر کنترلی در مود جریان ضربه‌ی دنباله، ضریب پسا را به طور قابل توجهی کاهش داد ولی تأثیر کمی بر کاهش ضریب برآ داشت. در این بخش ترکیب سیلندر اصلی به همراه صفحه‌ی جداکننده و سیلندر کنترلی مورد بررسی قرار گرفت تا کارایی این پیکربندی در کنترل



شکل ۸. توزیع ضریب فشار روی سطح سیلندر برای سیلندر به همراه صفحه متصل پایین دست.



شکل ۹. ابعاد هندسی دامنه و شبکه چند بلوکی با سازمان اطراف سیلندر و سیلندر کنترلی.

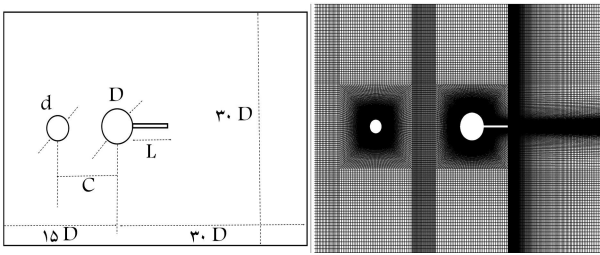
جدول ۴. مقایسه‌ی عدد استروهال به دست آمده در $L/D = 1$.

مرجع	عدد رینولدز	عدداستروال
مقاله‌ی حاضر	13100	$0/162$
[۲۱]	20000	$0/183$

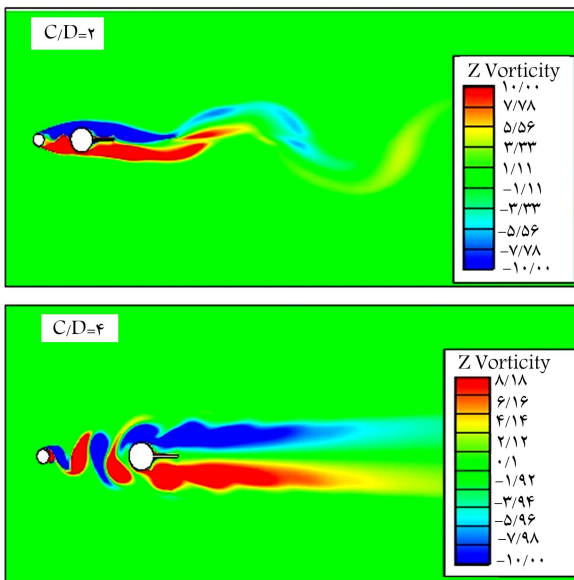
داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود ریزش گردابه در هیچ کدام از حالت‌ها کاملاً محو نشده و همچنان ریزش گردابه از سیلندر اتفاق می‌افتد ولی در بعضی حالت‌ها مخصوصاً در $\frac{L}{D} = 1$ و $\frac{L}{D} = 4$ ضعیف شده و در نتیجه باعث کاهش نیروی برآ شده است در حالی که در $\frac{L}{D} = 2$ و $\frac{L}{D} = 3$ مقدار این تضعیف کم‌تر است و همچنان ریزش گردابه تناوبی و قوی است که با نقاط آبی و قرمز پررنگ در شکل ۷ مشهود است. توزیع ضریب فشار روی سطح سیلندر در شکل ۸ ارائه شده است. چنان‌که دیده می‌شود، صفحه‌ی متصل پایین دست اثری روی ضریب فشار نقطه‌ی سکون جلوی سیلندر ندارد ولی مقدار مطلق فشار پایه‌ی سیلندر را به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهد و بنابراین باعث کاهش نیروی پسا می‌شود. عدد استروهال به دست آمده در تحقیق حاضر در نسبت فاصله‌ی $\frac{L}{D} = 1$ با داده‌های تجربی جرارد و همکاران [۲۱] در جدول ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. تفاوت ظاهر شده در نتایج، با توجه به اختلاف اعداد رینولدز قابل توجیه است.

۳.۳. سیلندر به همراه سیلندر کنترلی

در این قسمت یک سیلندر کنترلی با قطری کم‌تر از قطر سیلندر اصلی ($\frac{d}{D} = 0/5$) در راستای خط مرکزی در بالادست سیلندر قرار داده شد. فاصله‌ی مرکز تا مرکز ($\frac{C}{D}$) از $1/5$ تا ۴ تغییر کرد (شکل ۹). عدد رینولدز بر حسب قطر سیلندر اصلی



شکل ۱۳. ابعاد هندسی دامنه و شبکه‌ی چندبلوکی با سازمان اطراف سیلندر، سیلندر کنترلی و صفحه.



شکل ۱۴. خطوط هم‌تراز ورتیسیتی برای سیلندر به همراه سیلندر کنترلی در بالادست.

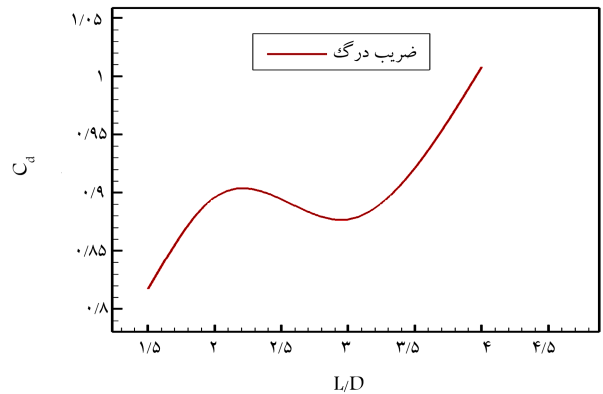
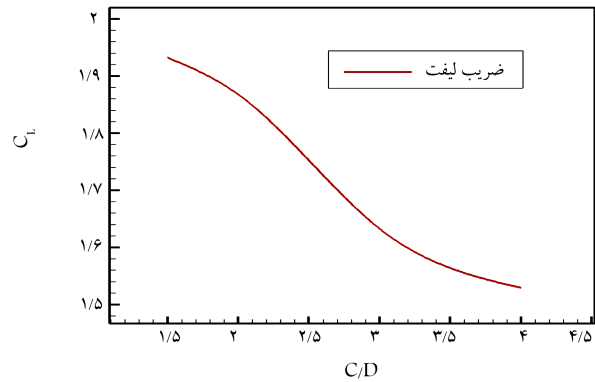
جدول ۶. ضرایب برآ و پسا برای سیلندر کنترلی (rod) و سیستم.

$\bar{C}_l(system)$	$\bar{C}_d(system)$	$\bar{C}_l(rod)$	$\bar{C}_d(rod)$	$\frac{C}{D}$
۰٫۹۱۰	۰٫۳۹۰	۰٫۲۹۶	۰٫۳۳۲	۲
۰٫۵۵۵۳	۰٫۶۶۴	۰٫۷۷۹	۰٫۷۳۱	۴

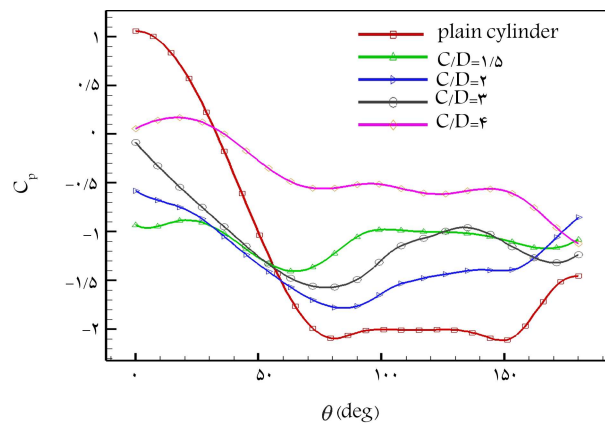
کنترلی اتفاق می‌افتد. همچنین در هیچ کدام از فواصل بررسی شده ریزش گردابه پشت سیلندر اصلی کاملاً محو نشده است بلکه به طور قابل توجهی ضعیف‌تر شده است. توزیع ضریب فشار روی سیلندر در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حضور صفحه‌ی جداکننده در پایین دست و سیلندر کنترلی در بالادست سیلندر اصلی قدرمطابق فشار نقطه‌ی سکون و پایه‌ی سیلندر را به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش داده است و بنابراین باعث کاهش پسا و برآی سیلندر شده است. همچنین در نسبت فاصله‌ی $\frac{C}{D} = 2$ فشار نقطه‌ی سکون کاهش بیشتری یافته در حالی که در نسبت فاصله‌ی $\frac{C}{D} = 4$ فشار پایه‌ی سیلندر افزایش بیشتری داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق جریان مغشوش اطراف سیلندرها با روی به همراه صفحه‌ی جداکننده و سیلندر کنترلی در عدد رینولدز 1310° مورد بررسی قرار گرفت. پس از مشخص



شکل ۱۱. تغییرات ضریب پسا و برآ کل با تغییر C/D .

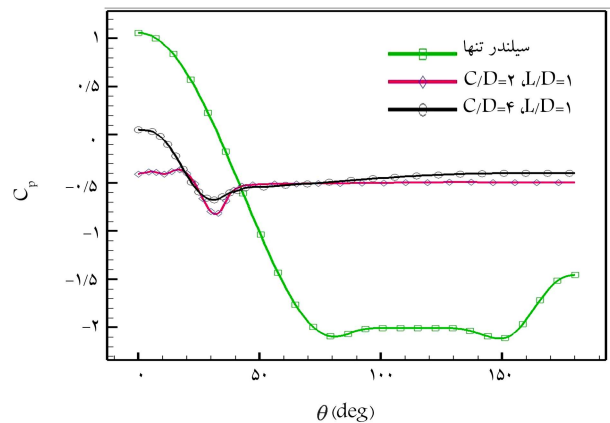


شکل ۱۲. توزیع ضریب فشار روی سیلندر برای سیلندر به همراه سیلندر کنترلی.

غیرفعال جریان مشخص شود. برای این منظور صفحه‌ی جداکننده با نسبت طول $\frac{L}{D} = 1$ و سیلندر کنترلی با دو نسبت فاصله $\frac{C}{D} = 2$ و $\frac{C}{D} = 4$ انتخاب شد (شکل ۱۳). این پیکربندی‌ها لزوماً پیکربندی بهینه نیست ولی یکی از گزینه‌های احتمالی است. نتایج نشان داد که این پیکربندی هم ضریب پسا و هم ضریب برآ را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در نسبت فاصله‌ی $\frac{C}{D} = 2$ ضریب پسا و برآی سیستم نسبت به سیلندر تنها به ترتیب ۷۵ درصد و ۴۷ درصد کاهش یافت. در نسبت فاصله‌ی $\frac{C}{D} = 4$ نیز ضریب پسا و برآی سیستم به ترتیب ۵۷ درصد و ۶۳ درصد کاهش یافت. مقادیر ضرایب پسا و برآی سیلندر کنترلی و سیستم (شامل سیلندر اصلی، کنترلی و صفحه‌ی جداکننده) در جدول ۶ ارائه شده است. خطوط هم‌تراز ورتیسیتی در شکل ۱۴ نشان داده شده است؛ مشاهده می‌شود که در هر دو نسبت فاصله به دلیل بودن جریان در مود ضربه‌ی دنباله، ریزش گردابه از سیلندر

شدن پیکربندی بهینه در این حالات نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها عبارت است از:

- صفحه‌ی جداکننده و سیلندر کنترلی دو ابزار ساده، ارزان و مؤثر در کنترل غیر فعال جریان است.
- صفحه‌ی پایین دست با تضعیف یا محوگردابه‌های ریخته شده از سیلندر، فشار پایه‌ی سیلندر را افزایش داده و ریزش گردابه‌ها را تضعیف می‌کند.
- سیلندر کنترلی با ایجاد نوعی مانع در برابر جریان ورودی به سیلندر، به کمبود مومنوم در ناحیه‌ی جلوی سیلندر می‌انجامد و باعث کاهش فشار نقطه سکون می‌شود.
- عملکرد ترکیب همزمان صفحه و سیلندر کنترلی در کاهش نیروی پسای وارد بر سیلندر از هر کدام به تنهایی بهتر و مؤثرتر است.



شکل ۱۵. توزیع ضریب فشار روی سیلندر برای سیلندر به همراه صفحه‌ی جداکننده متصل پایین دست و سیلندر کنترلی بالادست.

پانویس‌ها

1. bluff body
2. wake
3. sub critical
4. based cell Green-Gauss

منابع (References)

1. Ogunremi, A.R. and Sumner, D. "The effect of a splitter plate on the flow around a finite prism", *J. Fluids Struct.*, **59**, October, pp. 1-21 (2015).
2. Tritton, D.J. "Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers", *J. Fluid Mech.*, **6**(1936), pp. 547-567 (1959).
3. Igbalajobi, A. "The effect of a splitter plate on the flow around a surface-mounted finite circular cylinder", *J. Fluids Struct.*, **59**, October pp. 1-21 (2015).
4. Rahman, M.M., Karim, M.M. and Aim, M.A. "Numerical investigation of unsteady flow past a circular cylinder using 2-D finite volume method", *J. Nav. Archit. Mar. Eng.*, **4**(1), pp.27-42 (2008).
5. Parnaudeau, P., Carlier, J., Heitz, D. and et al. "Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at reynolds number 3900", *Phys. Fluids*, **20**(8), pp. 1-14 (2008).
6. Liu, K., Deng, J. and Mei, M. "Experimental study on the confined flow over a circular cylinder with a splitter plate", *Flow Meas. Instrum.*, **51**, pp. 95-104 (2016).
7. Soumya, S. and Prakash, K.A. "Effect of splitter plate on passive control and drag reduction for fluid flow past an elliptic cylinder", *Ocean Eng.*, **141**, pp. 351-374 (2017).
8. Wang, X.K., Zhang, J.X., Hao, Z. and et al. "Influence of wall proximity on flow around two tandem circular cylinders", *Ocean Eng.*, **94**, pp. 36-50 (2015).
9. Wang, Y., Yan, Z. and Wang, H. "Numerical simulation of low-reynolds number flows past two tandem cylinders of different diameters", *Water Sci. Eng.*, **6**(40871050), pp. 433-445 (2013).
10. Braza, M., Chassaing, P. and Ha Minh, H. "Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder", *J. Fluid Mech.*, **165**(1986), pp. 79-130 (1986).
11. Akilli, H., Karakus, C., Akar, A. and et al. "Control of vortex shedding of circular cylinder in shallow water flow using an attached splitter plate", *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, **130**(4), pp. 414011-414011 (2008).
12. Alam, M.M., Moriya, M., Takai, K. and et al. "Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **91**(1-2), pp. 139-154 (2003).
13. Ansys and A. I. (US), "ANSYS fluent theory guide", ANSYS Inc., USA, vol. 15317, no. August, pp. 724-746 (2016).
14. Vu, H.C., Ahn, J. and Hwang, J.H. "Numerical investigation of flow around circular cylinder with splitter plate", *KSCE J. Civ. Eng.*, **20**, pp.2559-2568 (2016).
15. Bardina, J.E., Huang, P.G. and et al., *Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development*, NASA-TM-110446 (1997).
16. Young, M. and Ooi, A. "Comparative assessment of LES and URANS for flow over a cylinder at a reynolds number of 3900", *Proc. 16th Australas. Fluid Mech. Conf.*, December 2007, pp. 1063-1070, (2007).
17. Rajani, B.N., Kandasamy, A. and Majumdar, S. "LES of flow past circular cylinder at Re = 3900 JAFM", **9**(3), pp.1421-1435, (May 2016).
18. Ong, L. and Wallace, J. "The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder", *Exp. Fluids*, **20**(6), pp. 441-453 (1996).

19. Kravchenko, A.G. and Moin, P. "Numerical studies of flow over a circular cylinder at $\text{Re} = 3900$ ", *Phys. Fluids*, **12**(3900), pp. 403-417 (2000).
20. Abrahamsen Prsic, M., Ong, M.C., Pettersen, B. and et al. "Large eddy simulations of flow around a smooth circular cylinder in a uniform current in the subcritical flow regime", *Ocean Eng*, **77**, pp.61-73 (2014).
21. Gerrard, J.H. "The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies", *J. Fluid Mech*, **25**(2), pp.401-413 (1966).
22. Prasad, A. and Williamson, C.H.K. "A method for the reduction of bluff body drag", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, **69**, pp. 155-167 (1997).
23. Norberg, C. "Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift", *J. Fluids Struct*, **15**, pp. 1031-1060 (2001).
24. Wang, J.J., Zhang, P.F., Lu, S.F. and et al. "Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod", *Flow, Turbul. Combust*, **76**(1), pp. 83-101 (2006).