



مطالعه عددی جریان آرام عبوری از روی استوانه و کنترل‌کننده‌های چرخان مجاور آن جهت توقف پدیده ریزش گردابه‌ها

محسن گودرزی^{*}، احسان خلیلی دهکردی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ مرداد ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۲ مهر ۱۳۹۵
پذیرش: ۷ آذر ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۳ آذر ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

تحلیل عددی
استوانه
توقف ریزش گردابه
کنترل‌کننده‌های چرخان

چکیده: ریزش گردابه عامل مهمی در ایجاد نیروهای دینامیکی نوسانی روی سازه‌های استوانه‌ای و افزایش یا حتی تشدید ارتعاشات القاشده توسط سیال است. کنترل جریان روی استوانه و به تعویق انداختن جدایش، باعث کوچک شدن ناحیه دنباله و کاهش ریزش گردابه‌ها شده و عمر سازه را افزایش می‌دهد. در بین روش‌های مختلف کنترل فعال و غیرفعال ریزش گردابه، استفاده از کنترل‌کننده‌های جریان روشی پرکاربرد است. دو استوانه کنترل‌کننده کوچک در اطراف یک سازه استوانه‌ای بزرگ می‌تواند به عنوان کنترل‌کننده‌های فعال جریان استفاده شوند. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای هندسی روی پاسخ‌های نوسانی برای جریان آرام روی یک استوانه دایره‌ای همراه با دو استوانه کنترل‌کننده کوچک به کمک تحلیل عددی مطالعه شده است. روش حجم محدود بر اساس الگوریتم سیمپل برای شبیه‌سازی میدان جریان ناپایا استفاده شده است. موقعیت مناسب کنترل‌کننده‌ها تعیین شده است. شاخص‌های کاهشی مناسبی برای محاسبه میزان اثربخشی کنترل‌کننده‌ها تعریف و به کار گرفته شده‌اند. نتایج عددی حاصل شده نشان داد که نوسانات نیروهای برآ و پسای وارد شده بر استوانه اصلی و کنترل‌کننده‌های جریان از بین رفته‌اند. مقدار ضریب پسای استوانه اصلی کاهش یافته است. همچنین با نصب کنترل‌کننده‌های جریان در موقعیت مناسب، خطوط جریان در پشت استوانه بدون نوسان شده و ریزش گردابه متوقف شده است.

۱- مقدمه

جریان روی استوانه به دلیل کاربردهای فراوان مهندسی مورد توجه بسیاری از محققین آیرودینامیک و هیدرودینامیک بوده است. این مسأله با پدیده جدایش جریان و ریزش گردابه‌ها همراه است. در مراجع [۵-۱] جریان روی استوانه، کاربردهای آن و بررسی جدایش جریان مورد بحث قرار گرفته‌اند.

برای مطالعه فیزیک جریان آرام روی استوانه، شناخت عوامل ایجاد نیروهای برآ و پسای، ناپایداری‌های جریان و نوسانات آن‌ها ضروری هستند. ویلیامسون [۶] در اعداد رینولدز کوچک الگوهای مختلف ریزش گردابه در ناحیه دنباله را استخراج کرد. بدر و همکاران [۷] به روش تجربی، جریان ناپایای آرام روی استوانه را مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که ریزش گردابه دائماً در بازه‌های زمانی بزرگ به صورت نوسانی رخ می‌دهد. دینامیک ریزش گردابه‌ها توسط مورل و پیتیجینس [۸] و بروچینی و تریولاتو [۹] بررسی شد. درازین [۱۰] و نیومن [۱۱] پایداری و ناپایداری جریان را مطالعه کردند. در این مطالعه آن‌ها انواع ناپایداری‌ها را دسته‌بندی کردند.

ناپایداری‌های اعمال شده به دلیل ریزش گردابه باعث تغییر زیادی در ارتعاشات سازه می‌شوند و می‌توانند یکی از عوامل اصلی تخریب سازه‌ها نیز باشند. اثر متقابل سیال و استوانه و انواع سازوکارهای مؤثر در تخریب ناشی از ریزش گردابه، توسط بلوینز [۱۲] و پایدوسیس [۱۳ و ۱۴] انجام شد.

کاهش عمر مفید و حتی تخریب در اثر ارتعاشات القاء شده سیال، هزینه‌های بسیار بالایی را برای صنایع مختلف در پی خواهد داشت. در مورد مبدل‌های حرارتی، دودکش‌ها، مبدل‌های هسته‌ای، پایه پل‌ها، اسکله‌ها و تجهیزات ساحلی، سکوها نفتی، دکل‌های حفاری و برج‌های خنک‌کن، این امر اهمیت بسیار بالایی دارد. از آن‌جا که کاهش نیروهای نوسانی و توقف ریزش گردابه عمر مفید و پایداری سازه‌ها را افزایش می‌دهد، این موضوع از نظر مهندسی بسیار کاربردی است.

اخیراً برخی محققین بر روی استحصال انرژی از ریزش گردابه‌ها به منظور کاهش قدرت آن‌ها و به صورت همزمان تولید انرژی الکتریکی پاک تحقیق کرده‌اند. فرشیدیان فر و نارنجانی [۱۵] مروری بر روش‌های جدید استحصال انرژی از گردابه‌ها انجام دادند. لی و برنیتساس [۱۶] و همچنین دانگ و همکاران [۱۷] بر استحصال انرژی‌های القاشده از خیابان گردابه‌ای ون کارمن و ابداع مبدل‌های انرژی گردابه تحقیق کرده‌اند.

رشیدی و همکاران [۱۸] مرور کاملی بر روش‌های کنترل ناحیه دنباله و توقف ریزش گردابه انجام دادند. آن‌ها روش‌های مختلف کنترل جریان را دسته‌بندی کردند. نصب کنترل‌کننده‌های جریان یکی از روش‌های مؤثر و بسیار کاربردی برای کنترل مؤثر جریان، تأخیر در جدایش و کاهش ریزش گردابه است. کنترل‌کننده‌های جریان اجسامی کوچک هستند که باعث تغییر الگوی جریان حول جسم پهن می‌شوند. در اثر تغییر الگوی جریان نیروهای وارد بر جسم تغییر نموده و این اثر به صورت کاهش نوسانات ضرایب برآ و

پسا دیده می‌شود.

از دیگر محاسن کنترل جریان، کاهش ضریب پسی و وسایل نقلیه است. این موضوع صرفه‌جویی زیادی در میزان مصرف سوخت، به دنبال خواهد داشت. مودی و همکاران [۱۹] با نصب اشیایی کوچک در اطراف اجسام پهن، مانند یک کامیون، نحوه تشکیل لایه مرزی در اطراف جسم را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ضریب پسی کامیون به دلیل به تعویق افتادن جدایش جریان، کاهش یافت.

مورتون و یاروسویچ [۲۰] جریان عبوری از روی یک پله دو مرحله‌ای را با نصب یک جسم کنترل‌کننده، بررسی کردند. وو و همکاران [۲۱] کنترل جریان را به کمک یک صفحه انعطاف‌پذیر در پشت استوانه اصلی مطالعه کردند. ملک‌زاده و سوهان‌کار [۲۲] به صورت عددی کنترل جریان در پشت یک استوانه مکعبی را با استفاده از یک تیغه کنترلی در سمت بالادست جریان مطالعه کردند. مایتی و بهات [۲۳] جریان عبوری از روی یک استوانه با مقطع مربعی را که در بالادست آن یک استوانه مستطیلی به عنوان کنترل‌کننده جریان نصب شده بود، بررسی کردند. چن و چوان [۲۴] به صورت تجربی تأثیر حضور یک جسم کوچک‌تر در پشت استوانه اصلی را به عنوان کنترل‌کننده جریان، مطالعه کردند. پسندیده‌فرد و هاشم‌پور [۲۵] به مطالعه کاهش نیروی پسا روی استوانه به وسیله‌ی قرارگیری یک میله در بالادست جریان پرداختند. آن‌ها تأثیر قطر و جهت قرارگیری میله کنترل‌کننده را بررسی کردند. تحقیقات فوق حضور کنترل‌کننده را باعث کاهش پدیده ریزش گردابه‌ها گزارش کرده‌اند.

با توسعه روش‌های کنترل جریان، محققین پیشنهاد دادند که از یک استوانه ثابت و یا چرخان به عنوان کنترل‌کننده جریان روی استوانه استفاده شود. میتال و راگوانشی [۲۶] با استفاده از یک استوانه چرخان سازوکار کنترل ریزش گردابه را در ناحیه دنباله استوانه اصلی بررسی کردند. دیپانکار و همکاران [۲۷] ناپایداری ناشی از ریزش گردابه را در حالتی که یک استوانه کنترل‌کننده نزدیک به استوانه اصلی نصب شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ناحیه دنباله با حضور کنترل‌کننده جریان بسیار باریک‌تر شد. پرالیس و همکاران [۲۸] جریان پشت استوانه را همراه با حضور یک استوانه کوچک چرخان مطالعه کردند. آن‌ها توانایی روش عددی را در محاسبه صحیح پاسخ‌های نوسانی سازه مطالعه و نحوه نوسان سازه را در محدوده‌های مختلف سرعت دورانی کنترل‌کننده جریان بررسی کردند.

میتال [۲۹] نشان داد که با دو استوانه چرخان می‌توان نیروهای آیرودینامیکی و نیروی پسی کل روی استوانه اصلی را کاهش دهد. وی تأثیر نرخ چرخش بر روی کاهش ضریب پسا را مطالعه کرد و نشان داد که افزایش نرخ چرخش می‌تواند باعث کاهش ضریب پسی استوانه‌های چرخان شود. اما این امر از نظر کاربردی محدودیت دارد. چرا که افزایش بیش از حد سرعت کنترل‌کننده‌های جریان باعث افزایش نیروی الکتریکی مورد نیاز برای کنترل جریان و همچنین کاهش عمر استوانه‌های کنترل‌کننده خواهد شد. کورکیشکو و مینینگینی [۳۰] نشان دادند که کنترل‌کننده‌های چرخان با

تزیق مومنتوم به داخل ناحیه دنباله سرعت‌های نوسانی عرضی در این ناحیه از جریان کاهش می‌دهند. جیانگ‌سنگ و همکاران [۳۱] جریان عبوری از روی استوانه با بهره‌مندی از دو استوانه چرخان را به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که حضور دو استوانه چرخان، علاوه بر کنترل نوسانات نیروهای برآ و پسا، نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشید.

جهت چرخش استوانه‌های کنترلی یکی از عوامل مؤثر بر تغییر ساختار جریان کنترل شونده و میزان موفقیت در توقف ارتعاشات القا شده است. ژو و همکاران [۳۲] اثر جهت چرخش کنترل‌کننده‌ها بر میزان کاهش ریزش گردابه‌ها را مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که اثر مطلوب کاهش قدرت ریزش گردابه‌ها در دو وضعیت قرینه از چرخش کنترل‌کننده‌ها با هم متفاوت است. مودادا و پتتایک [۳۳] به صورت آزمایشگاهی تأثیر حضور دو استوانه چرخان را بر توقف ریزش گردابه مطالعه کردند. آن‌ها به بررسی تأثیر نرخ چرخش کنترل‌کننده‌های جریان که در یک موقعیت ثابت نصب بودند، پرداختند.

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در بین روش‌های مختلف کنترل جریان پایین‌دست، استفاده از کنترل‌کننده‌های چرخان روشی مناسب و کاربردی است. در تحقیقات گذشته کنترل‌کننده‌های چرخان در یک موقعیت ثابت قرار داشته‌اند و تأثیر آن‌ها بر تغییر نیروهای نوسانی وارد بر استوانه اصلی مطالعه شده است. هدف تحقیق حاضر یافتن موقعیت مکانی مناسبی برای نصب دو کنترل‌کننده چرخان در مجاورت یک استوانه اصلی است که بتواند باعث کاهش قابل توجه و یا حتی حذف کامل پدیده ریزش گردابه‌ها در ناحیه دنباله شود. علاوه بر این تأثیر نیروهای وارد بر خود کنترل‌کننده‌ها نیز از اهمیت زیادی برخوردار است که در تحقیق حاضر به این مهم نیز پرداخته شده است.

۲- معرفی مسأله و فرمول‌بندی

۲-۱- تعریف مسأله

شکل ۱ یک طرح‌واره از مسأله حاضر را نشان می‌دهد. جریان به صورت یکنواخت وارد میدان جریان شده و از روی استوانه اصلی و دو استوانه چرخان عبور می‌کند. استوانه‌ای که در بالا نصب شده است به صورت ساعت‌گرد و استوانه‌ای که در پایین نصب شده است، پادساعت‌گرد می‌چرخند. موقعیت استوانه‌های چرخان به کمک فاصله شعاعی بی‌بعد $r_D = r/D$ و موقعیت زاویه‌ای θ مشخص می‌شوند.

۲-۲- قوانین حاکم و فرمول‌بندی مسأله

میدان جریان دوبعدی و سیال آن نیوتنی هستند. رژیم جریان آرام و تراکم ناپذیر است. هیچ نیروی خارجی مانند نیروهای الکتریکی و مغناطیسی وجود ندارد. معادلات حاکم بر میدان جریان، معادله‌های پیوستگی و بقاء اندازه حرکت هستند که با عملگرهای برداری زیر نشان داده می‌شوند:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{V} = 0 \quad (1)$$

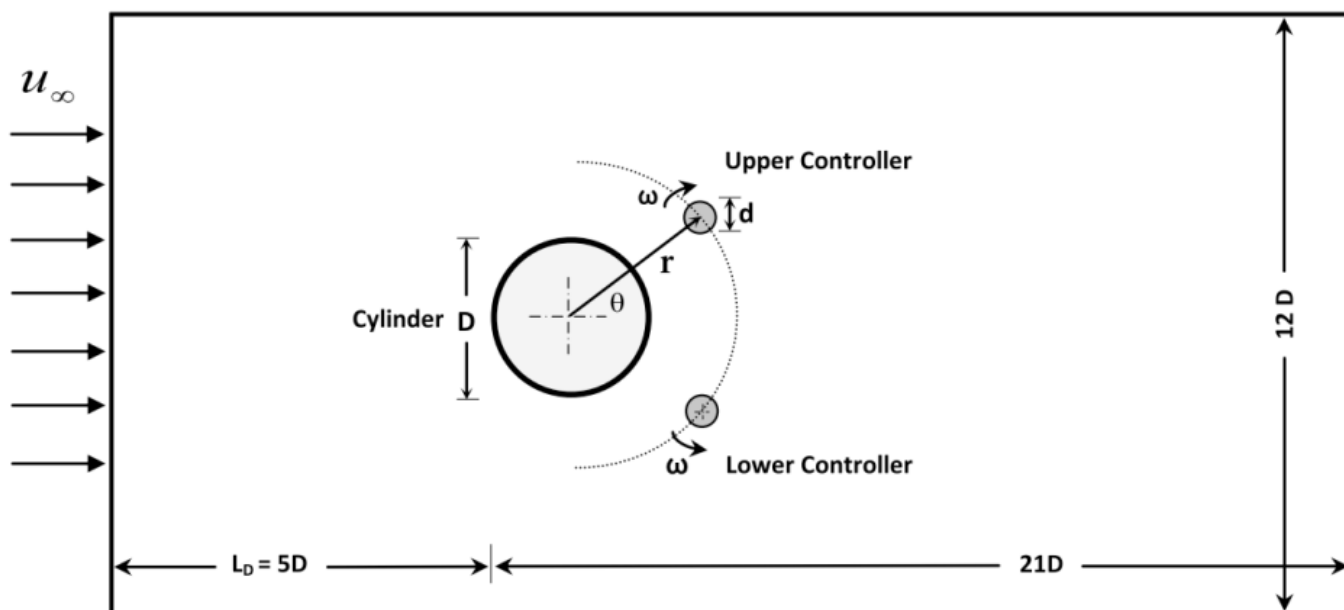


Fig. 1. Schematic description of the flow over a 2D circular cylinder at the presence of two rotating cylindrical controllers

شکل ۱: طرح‌واره جریان دوبعدی روی استوانه همراه با کنترل‌کننده‌های چرخان

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 D} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 D} \quad (6)$$

که در آن‌ها F_L و F_D به ترتیب نیروهای پسا و برآی وارد بر استوانه هستند. ضرایب نیروهای برآ و پسا روی استوانه اصلی بر اساس قطر استوانه اصلی تعریف می‌شوند. ولی هنگام استفاده برای استوانه کنترلی باید دقت کرد که قطر استوانه کنترلی d باید استفاده شود

در این تحقیق از چهار شاخص برای بررسی میزان اثربخشی کنترل‌کننده‌های چرخان در جهت کاهش دامنه نوسانات نیروهای وارد بر استوانه‌ها استفاده شده است. شاخص کاهش دامنه نیروی برآی وارد بر استوانه اصلی به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$I_{A_L} = \frac{A_L - A_{L,c}}{A_L} \quad (7)$$

که در آن A_L دامنه نوسانات ضریب برآ بدون حضور کنترل‌کننده، و $A_{L,c}$ همین کمیت با حضور کنترل‌کننده‌های جریان هستند. به طور مشابه سایر شاخص‌های کاهش نیروی برآی وارد بر استوانه اصلی به صورت زیر معرفی می‌شوند که عبارتند از:

$$I_{A_D} = \frac{A_D - A_{D,c}}{A_D} \quad (8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

در این روابط ρ و μ به ترتیب چگالی و لزجت سیال، و V سرعت جریان هستند. در ضمن D قطر استوانه است که به عنوان طول مشخصه جریان برای کمیت‌های بی‌بعد به کار می‌رود. عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن u_∞ سرعت جریان در دوردست است. برای هر استوانه چرخان عدد چرخشی بدون بعد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{\omega D}{2u_\infty} \quad (4)$$

که ω سرعت زاویه‌ای است.

حضور استوانه‌ها در مسیر جریان یکنواخت دوردست باعث به وجود آمدن میدان‌های سرعت و فشار توزیع شده در محدوده میدان جریان می‌شود. توزیع سرعت در مجاورت سطح استوانه‌ها باعث توزیع فشار و تنش برشی روی بدنه آن‌ها می‌شود. با انتگرال‌گیری نیروهای تنشی و فشاری توزیع شده روی سطح استوانه‌ها در هر لحظه می‌توان نیروی وارد شده از طرف سیال به آن‌ها را محاسبه کرد. این نیرو دارای مؤلفه‌هایی در امتداد جریان دوردست و عمود بر آن است که به ترتیب نیروهای پسا و برآ نامیده می‌شوند. متناظر با این مؤلفه‌های نیرو ضرایب بی‌بعد پسا و برآ به ترتیب زیر تعریف می‌شوند:

شاخص کاهش ضریب برآی متوسط:

$$I_{C_L} = \frac{\bar{C}_L - \bar{C}_{L,c}}{\bar{C}_L} \quad (9)$$

شاخص کاهش ضریب پسای متوسط:

$$I_{C_D} = \frac{\bar{C}_D - \bar{C}_{D,c}}{\bar{C}_D} \quad (10)$$

باشند. با چندین بار شبیه‌سازی عددی می‌توان فاصله لازم برای تعیین مرزهای دوردست را مشخص کرد. حداقل فاصله بین مرز ورودی تا استوانه اصلی باید $5D$ باشد. دو صفحه متقارن در فاصله $6D$ از استوانه اصلی به عنوان مرزهای کناری در نظر گرفته شده‌اند. تمامی گرادیان‌های متغیرهای وابسته عمود بر این دو مرز دوردست برابر با صفر در نظر گرفته شده‌اند. مرز خروجی حداقل به اندازه $20D$ در پایین‌دست استوانه اصلی فرض شد تا بررسی ناحیه دنباله و ریزش گردابه به خوبی امکان‌پذیر باشد. از شرط عدم لغزش برای سرعت به همراه صفر بودن گرادیان عمودی فشار روی سطوح استوانه‌ها استفاده شده است.

۳- روش عددی

معادله‌های حاکم به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود حل شده‌اند. از طرح بالاوزش مرتبه دوم برای درون‌یابی جملات شار روی سطوح سلول‌ها استفاده شده است. طرح بالاوزش مرتبه دوم دارای دقت کافی برای پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده در ناحیه جدایش جریان و دنباله استوانه است. از روش میان‌یابی مرکزی نیز برای تخمین شارهای پخش روی سطح سلول‌ها استفاده شده است. از الگوریتم سیمپل^۱ [۳۴] برای درگیر کردن میادین سرعت و فشار استفاده شده است. سیستم شبکه بدون سازمان با المان‌های مثلثی در تحقیق حاضر استفاده شده است. سلول‌های شبکه نزدیک به دیواره‌ها و در ناحیه پشت استوانه بسیار ریز شده‌اند تا متغیرهای وابسته که گرادیان شدید در این نواحی دارند، با دقت خوبی پیش‌بینی شوند. حل عددی به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت^۲ انجام شده است. شکل ۳ دو تصویر از شبکه‌های مورد استفاده را در یک موقعیت خاص

در روابط فوق A_D دامنه نوسانات ضریب پسا بدون حضور کنترل‌کننده، و $A_{D,c}$ همین کمیت با حضور کنترل‌کننده‌های جریان هستند. در واقع شاخصهای فوق به درصد موفقیت حضور کنترلرها در مقایسه با وضعیتی که آن‌ها در جریان حضور ندارند، اشاره دارند. دقت شود که این شاخص‌ها می‌توانند برای محاسبه مقدار کاهش کمیت‌های مربوطه روی استوانه کنترل‌کننده نیز استفاده شوند. برای استوانه چرخان نیز در دو حالت، یکی بدون تأثیر از استوانه اصلی و دیگری زمانی که از حضور استوانه اصلی تأثیر می‌پذیرد، مقایسه انجام شده است.

۲-۳- شرایط مرزی

برای تحلیل عددی باید ابتدا شرایط مرزی بر روی مرزهای شبکه عددی مشخص شوند. شکل ۲ طرح‌واره‌ای از میدان حل جریان را با شرایط مرزی حاکم نشان می‌دهد. میدان جریان یک فضای مستطیلی شکل است که استوانه اصلی و دو استوانه کنترل‌کننده چرخان را شامل می‌شود. مرزهای دوردست در محدوده عددی باید به اندازه کافی از سه استوانه فاصله داشته باشند تا تأثیر محسوسی بر پارامترهای جریان در نزدیکی استوانه‌ها نداشته

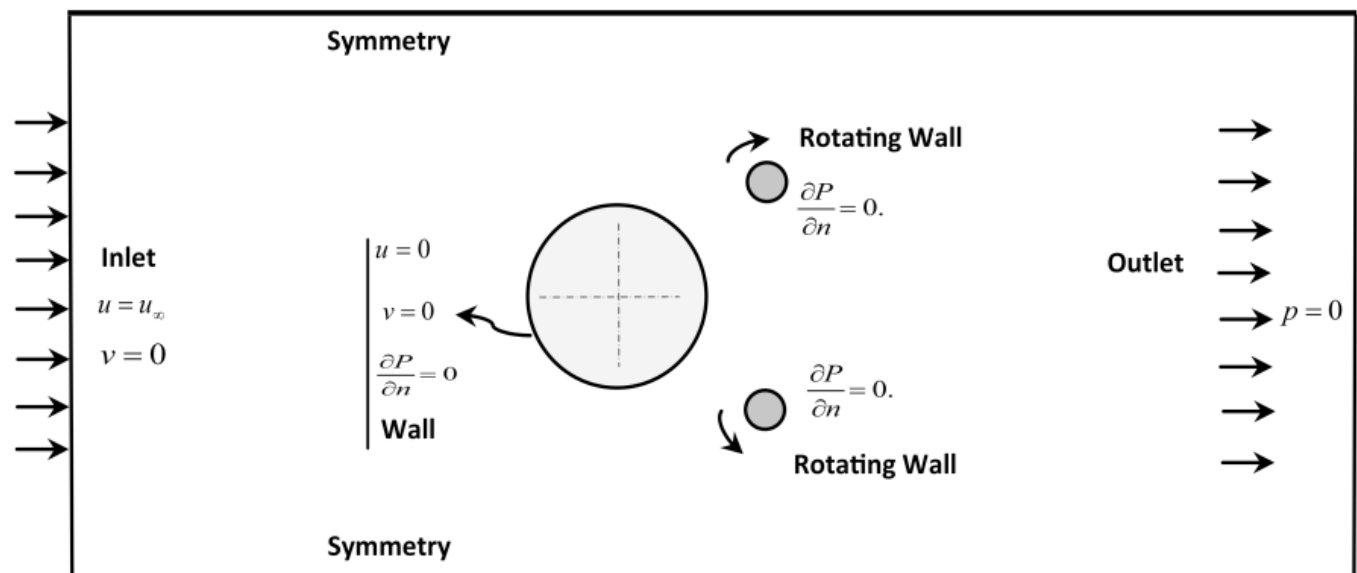
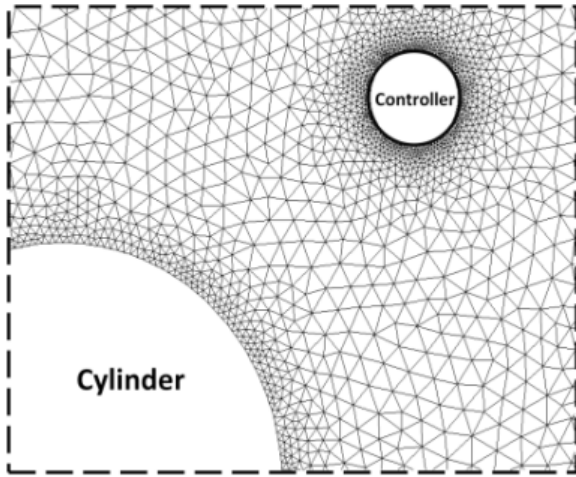


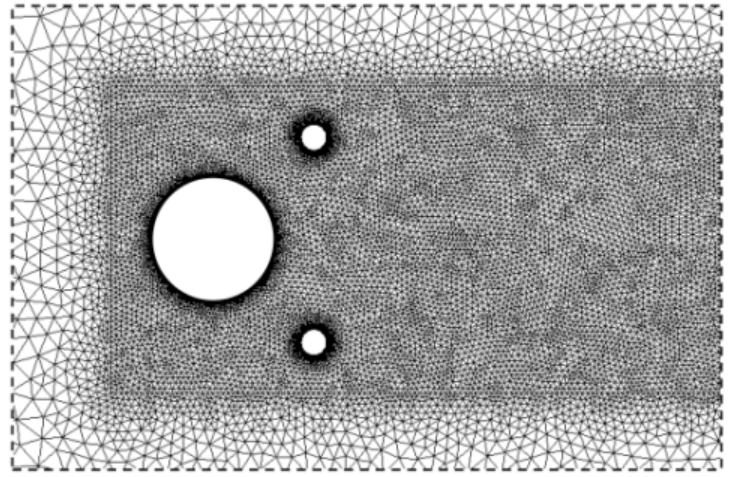
Fig. 2. Flow field with associated boundary conditions

شکل ۲: میدان حل و شرایط مرزی

- 1 SIMPLE
- 2 ANSYS-FLUENT



(ب) قسمتی از شبکه بسیار نزدیک به استوانه‌ها



(الف) قسمتی از شبکه محاسباتی

Fig. 3. Grid system for numerical simulation

شکل ۳: شبکه حل عددی

انتخاب گام زمانی بهینه، سرعت عملیات و هزینه محاسبات را کاهش می‌دهد. شکل ۵ به خوبی اختلاف نتایج حاصل از انتخاب گام‌های زمانی مختلف را برای مسئله جریان روی استوانه چرخان نشان می‌دهد. زمانی که منحنی‌های حاصل از دو گام زمانی بر یکدیگر کاملاً منطبق می‌شوند، کوچک شدن گام زمانی سودمند نخواهد بود.

نتایج عددی باید مستقل از اندازه سلول‌های شبکه باشند. بنابراین برای هر مسأله خاص باید شبکه بهینه‌ای انتخاب شود. شکل‌های ۶ و ۷ نتایج مطالعه شبکه برای یک آرایش خاص از کنترل‌کننده‌ها را نشان می‌دهند. شکل ۶ توزیع متوسط مؤلفه سرعت افقی بین استوانه اصلی و استوانه کنترل‌کننده بالایی را برای سه شبکه مختلف نشان می‌دهد. علی‌رغم تفاوت

از کنترل‌کننده‌های جریان نشان می‌دهد. بدون توجه به شرایط اولیه، میدان جریان در این مسأله پس از گذشت زمان نسبتاً کافی به حالت پریودیک دائمی می‌رسد. در تحقیق حاضر برای مقایسه لحظه به لحظه تمام حالت‌های هندسی مختلف شرط اولیه یکسانی استفاده شده است. به این منظور میدان جریان در ابتدای هر حل عددی ساکن در نظر گرفته شد.

محاسبات در هر گام زمانی باید آن قدر تکرار شود تا تغییرات تمامی مانده‌های متغیرهای وابسته ناچیز شوند. در حل عددی اگر مانده‌ها طی تکرارهای عددی تغییر نکنند، همگرایی عددی کامل حاصل شده است. شکل ۴ نمونه‌ای از نمودارهای تغییرات مانده‌ها را در مقابل تعداد تکرارهای یکی از حل‌های عددی نشان می‌دهد.

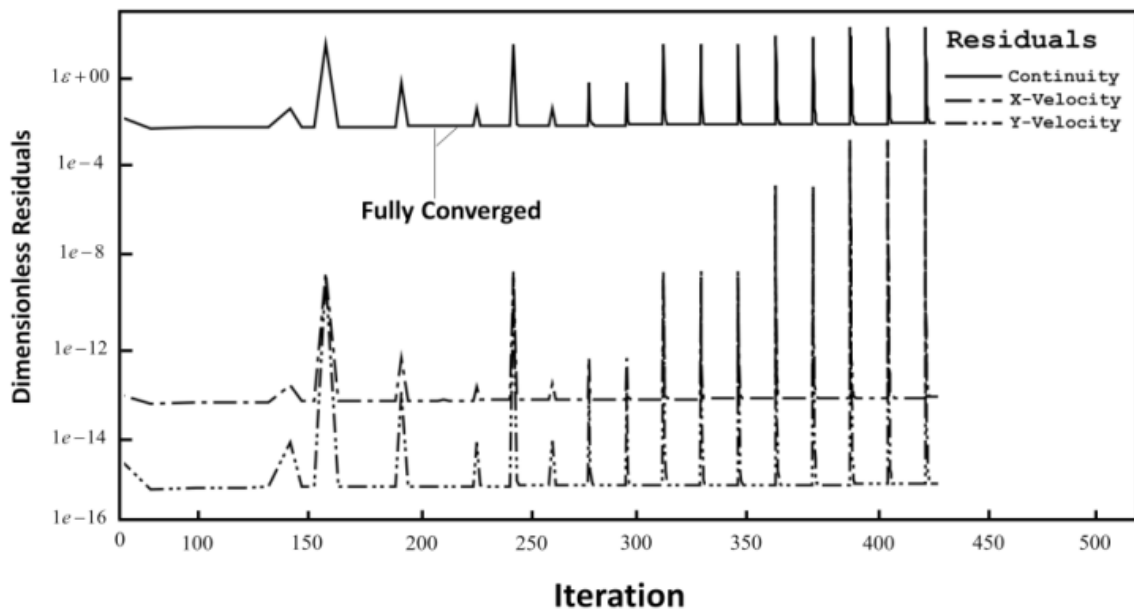


Fig. 4. Residual variation during each time step

شکل ۴: تغییرات مانده‌ها در هر گام زمانی

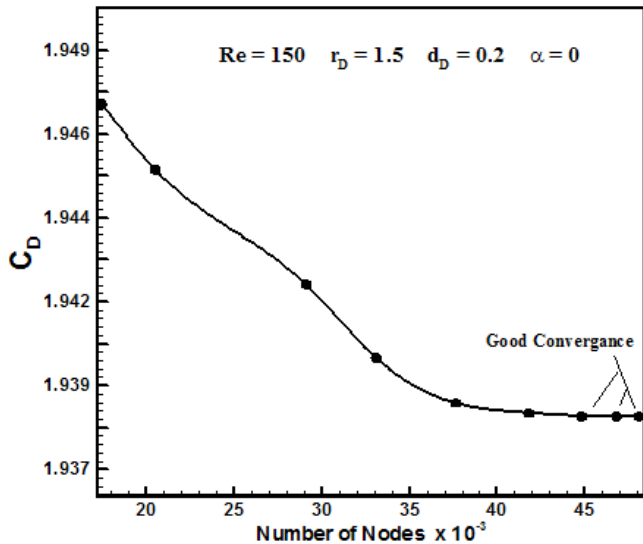


Fig. 7. Grid study, instantaneous drag coefficient of the main cylinder at $t=100s$

شکل ۷: مطالعه شبکه، ضریب پسای لحظه‌ای استوانه اصلی در مقابل تعداد المان‌های شبکه $t=100s$

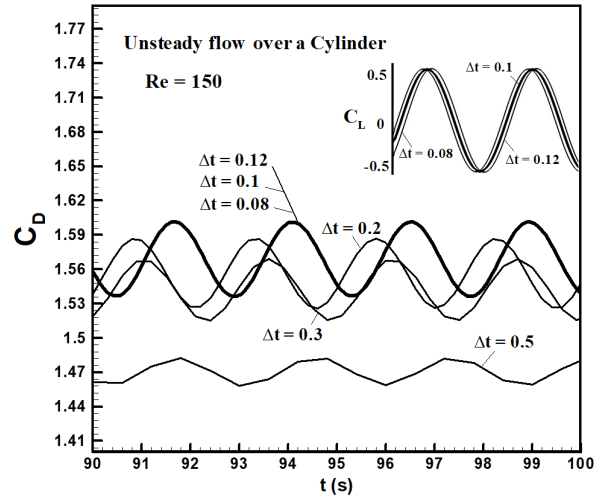


Fig. 5. Time step optimization by considering lift and drag coefficients in transient flow over cylinder at steady periodic regime

شکل ۵: بررسی گام زمانی بهینه به کمک ارزیابی ضرایب برآ و پسای جریان ناپایا روی استوانه در بازه زمانی نوسانی پایا

بدر و همکاران [۳۵] در شکل ۸ مقایسه شده‌اند. عدد رینولدز این جریان ۱۰۰۰ بوده است. همچنین مقدار ضریب لیفت متوسط پیش‌بینی شده روی این استوانه چرخان در اعداد چرخشی مختلف و عدد رینولدز جریان دوردست ۲۰۰ در شکل ۹ با نتایج میتال و کومار [۳۶] مقایسه شده است.

۴-۲- موقعیت مناسب کنترل‌کننده‌ها

از نظر کاربردی برخی از کمیت‌های هندسی، سینماتیکی و دینامیکی دخیل در پدیده نمی‌توانند متغیر باشند. از طرفی برای معنادار شدن نتایج حاصل و همچنین کاربردی بودن آن لازم است برخی کمیت‌ها با توجه به جنبه کاربردی آن‌ها ثابت فرض شوند. بر این اساس در تحقیق حاضر جریان روی استوانه در $Re=150$ همراه با حضور دو کنترل‌کننده چرخان با عدد چرخش $\alpha=6$ و نسبت قطر بی‌بعد $d_D=0.2$ بررسی شده است.

موقعیت کنترل‌کننده‌های چرخان تا حد زیادی بر توقف ریزش گردابه مؤثر است. بدون توجه به موقعیت زاویه‌ای کنترل‌کننده، واضح است که اگر استوانه‌های کنترلی بسیار دور از استوانه اصلی نصب شوند، نمی‌توانند ریزش گردابه را متوقف کنند و به طور همزمان استوانه اصلی نمی‌تواند بر نیروهای برآ و پسای وارد بر استوانه‌های چرخان تأثیر محسوس بگذارد. از طرف دیگر، هنگامی که استوانه‌های کنترل‌کننده به استوانه اصلی بچسبند، جسم یک‌پارچه جدیدی را در مقابل جریان ایجاد می‌کنند که مسلماً پدیده ریزش گردابه روی جسم جدید هم کم و بیش با کیفیتی شبیه با استوانه اولیه اتفاق خواهد افتاد. بنابراین، به نظر می‌رسد که در هر موقعیت زاویه‌ای خاص، یک فاصله شعاعی مناسب را بتوان یافت که اثر بخشی کنترل‌کننده‌ها را در کاهش یا توقف ریزش گردابه‌ها افزایش دهد. از سوی دیگر در هر فاصله شعاعی خاص هم می‌توان یک زاویه مناسب یافت که در آن زاویه،

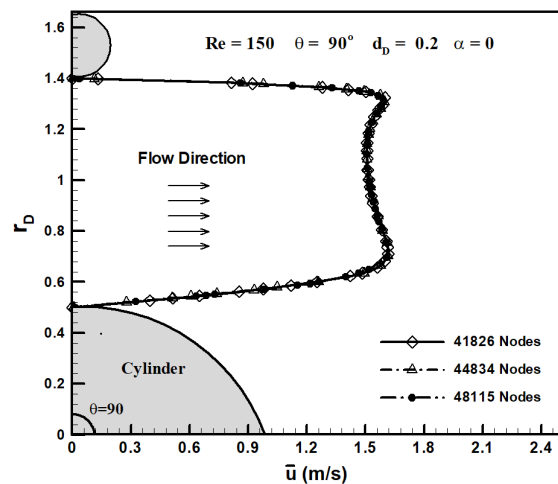


Fig. 6. Grid study by considering the profile of the averaged velocity between the main cylinder and controller for different grid system

شکل ۶: مطالعه شبکه، توزیع سرعت متوسط در ناحیه بین استوانه اصلی و کنترل‌کننده در شبکه‌های مختلف

تعداد نقاط شبکه‌ها، کیفیت این سه شبکه به صورتی بوده که توزیع‌های پیش‌بینی شده توسط آن‌ها تقریباً بر هم منطبق شده‌اند. برای نمایش بهتر اختلاف نتایج این سه شبکه، در شکل ۷ تغییرات متوسط ضریب پسای لحظه‌ای استوانه اصلی به عنوان یک کمیت تجمعی به ازای تعداد سلول‌های شبکه در مقایسه با چند شبکه با تعداد سلول‌های کمتر، ترسیم شده است.

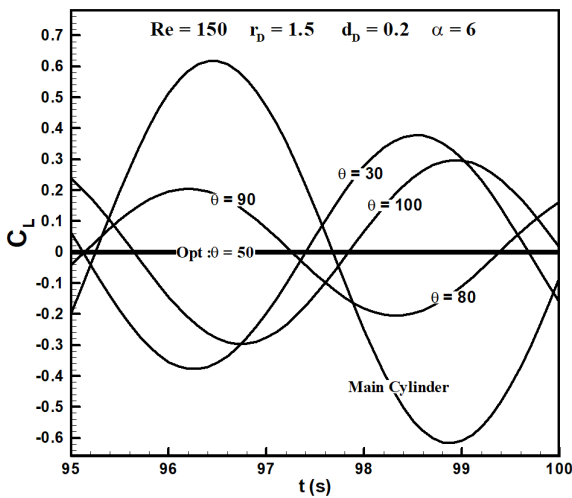
۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبارسنجی

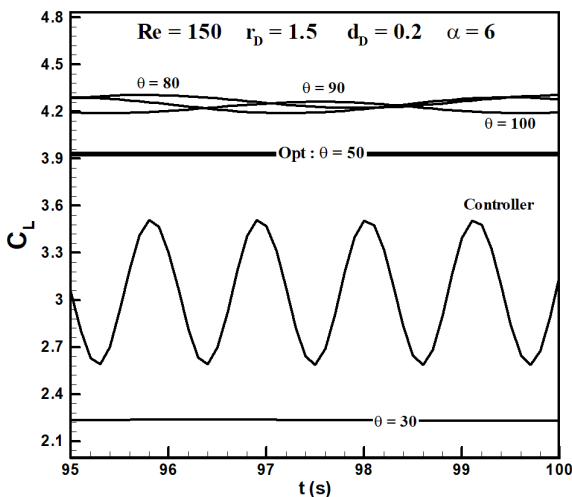
برای بررسی اعتبار روش عددی به کار گرفته شده، خطوط جریان لحظه‌ای پیش‌بینی شده از روش حاضر روی استوانه چرخان با نتایج تجربی

برای استوانه‌های چرخان صفر نیست. بنابراین متوسط ضریب برآ فقط برای استوانه‌های چرخان محاسبه شده است.

ابتدا استوانه‌های کنترلی در یک فاصله شعاعی نسبتاً دور و ثابت برابر با $r_D = 1/5$ و البته در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف قرار داده شدند. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی مختلف در بازه زمانی که نیروها به حالت نوسانی پایا رسیده‌اند ارائه شده‌اند. شکل ۱۰ (الف) نوسانات ضریب برآ روی استوانه اصلی را در حضور کنترل کننده و بدون حضور آن نشان می‌دهد. شکل ۱۰ (ب) نیز همین ضریب را روی استوانه چرخان در حضور استوانه اصلی و بدون حضور آن نشان می‌دهد. به صورت متناظر شکل ۱۱ نوسانات ضرایب پسای روی دو استوانه را در شرایط فوق نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۰ (الف) و ۱۱



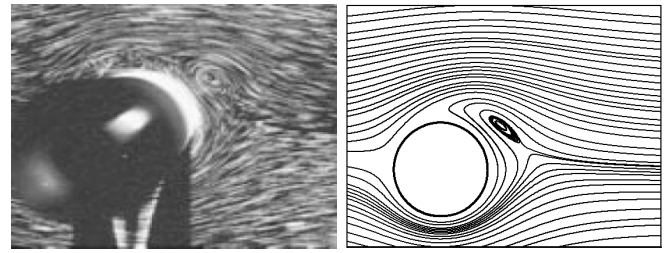
(الف) ضریب برآ استوانه اصلی



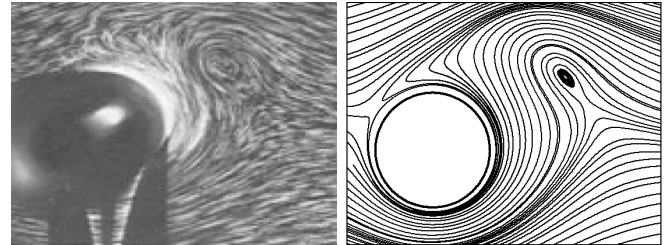
(ب) ضریب برآی استوانه کنترل کننده

Fig. 10. Oscillations of the lift coefficients of the main and rotating cylinders at a fixed radial distance and variable angular positions of the controllers

شکل ۱۰: نوسانات ضرایب برآی استوانه‌های اصلی و چرخان در یک موقعیت ثابت شعاعی و در زوایای مختلف استوانه‌های کنترل کننده



$t = 4 \text{ s}$



$t = 6 \text{ s}$

(الف) نتایج عددی (ب) نتایج بدر و همکاران [۳۵]

Fig. 8. Validation, predicted instantaneous streamlines over a rotating cylinder compared to the experimental results [35]
شکل ۸: اعتبار سنجی، خطوط جریان لحظه‌ای روی استوانه چرخان حاصل از کار عددی حاضر و مقایسه با نتایج تجربی [۳۵]

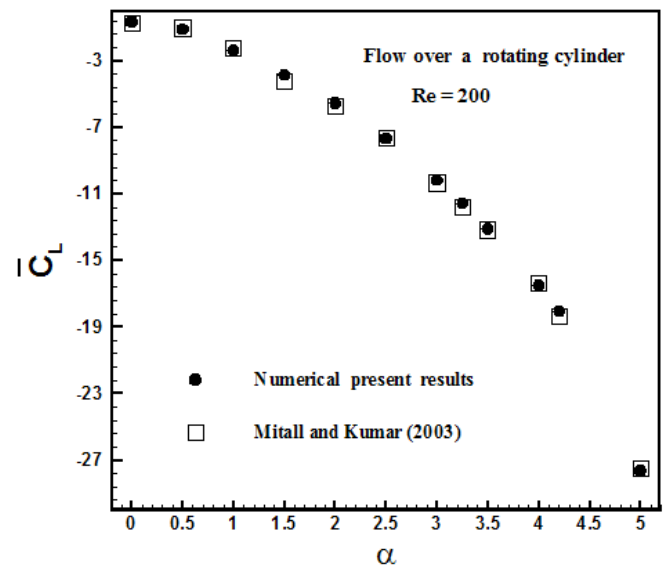


Fig. 9. Validation, predicted lift coefficient of a rotating cylinder at different rotating speeds compared to the experimental results of Mittal and Kumar [36]

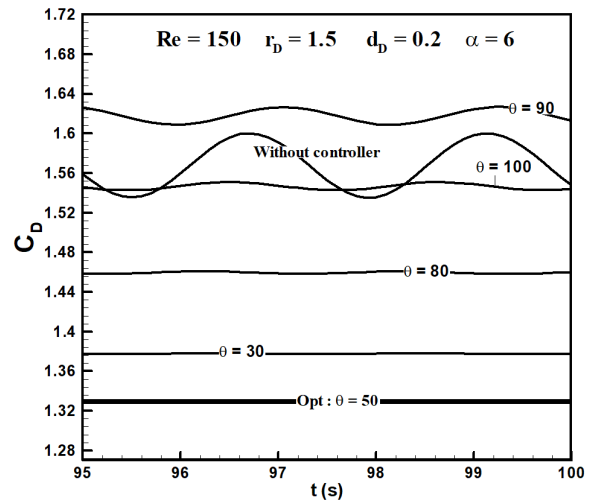
شکل ۹: اعتبار سنجی، ضریب برآی استوانه چرخان در نرخ چرخش‌های مختلف حاصل از کار عددی حاضر و مقایسه با نتایج میتال و کومار [۳۶]

کنترل کننده‌های جریان بیشترین اثربخشی را در این خصوص داشته باشند. برای بررسی اثربخشی کنترل کننده‌ها بر توقف ریزش گردابه و یافتن موقعیت مناسب آن‌ها، باید دامنه‌های نوسانات ضرایب برآ و پسا و همچنین متوسط ضریب پسا در شرایط مختلف هندسی کنترل کننده‌ها با هم مقایسه شوند. متوسط ضریب برآی استوانه اصلی صفر است، درحالی‌که

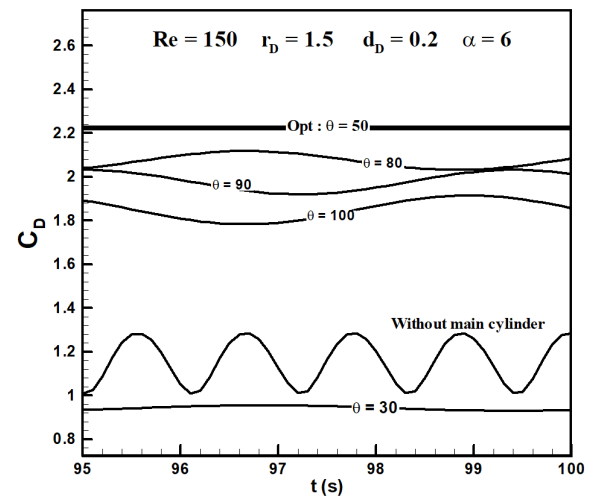
برآ و پسای استوانه چرخان شده است، در حالی که موقعیت زاویه‌ای $\theta=50^\circ$ تقریباً باعث حذف کامل نوسانات این نیروها روی استوانه چرخان شده است. در شکل ۱۲ خطوط جریان در اطراف استوانه همراه با حضور دو کنترل کننده چرخان در یک لحظه خاص برای موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف ترسیم شده‌اند. زمانی که کنترل کننده در موقعیت زاویه‌ای $\theta=30^\circ$ قرار دارد، جریان حول استوانه از حضور کنترل کننده‌های چرخان تأثیر زیادی نمی‌پذیرد. در ضمن وقتی کنترل کننده‌ها در موقعیت‌های زاویه‌ای $\theta=90^\circ$ و $\theta=100^\circ$ قرار دارند نمی‌توانند تأثیر محسوسی روی جریان اطراف استوانه و ناحیه دنباله داشته باشد. اما در موقعیت زاویه‌ای $\theta=50^\circ$ استوانه چرخان به خوبی توانسته خطوط جریان را به سمت داخل ناحیه دنباله منحرف نماید. به عبارت دیگر، در این حالت نقش تزریق مومنوم توسط کنترل کننده چرخان در ناحیه دنباله به خوبی انجام شده است. همین امر باعث شده که بلافاصله کمی بعد از استوانه اصلی بدون نوسان وجود داشته باشد.

نتایج نشان می‌دهند که یک موقعیت زاویه‌ای مناسب θ_{opt} به ازای هر فاصله شعاعی r_D از قرار گیری کنترل کننده‌ها وجود دارد. به این ترتیب، باید شبیه‌سازی‌های مشابهی برای محدوده‌ای از فواصل شعاعی انجام داد و با مقایسه نتایج حاصل موقعیت‌های زاویه‌ای مناسب کنترل کننده‌ها را در هر فاصله شعاعی تعیین کرد. در نهایت نیز مقایسه و تحلیل لازم بین موقعیت‌های زاویه‌ای مناسب در فواصل شعاعی مختلف انجام شود.

شکل ۱۳ مقادیر متوسط ضرایب برآ و پسا را برای کنترل کننده‌های چرخان نصب شده در موقعیت‌های مکانی مختلف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که حضور استوانه اصلی در کنار استوانه‌های چرخان باعث



الف) ضریب پسای استوانه اصلی



ب) ضریب پسای استوانه کنترل کننده

Fig. 11. Oscillations of the drag coefficients of the main and rotating cylinders at a fixed radial distance and variable angular positions of the controllers

شکل ۱۱: نوسانات ضرایب پسای استوانه‌های اصلی و چرخان در یک موقعیت ثابت شعاعی و در زوایای مختلف استوانه‌های کنترل کننده

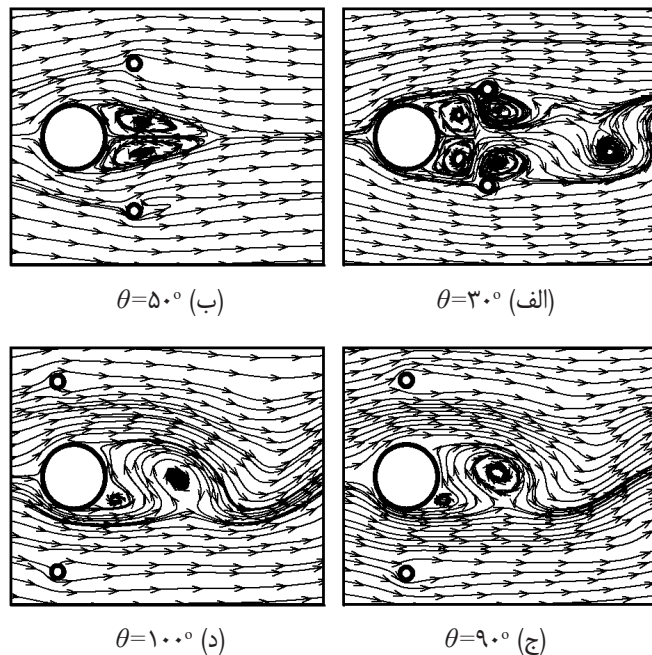


Fig. 12. Near-field streamlines for different angular positions of the controllers when $r_D=1.5$

شکل ۱۲: مقایسه خطوط جریان در ناحیه نزدیک به استوانه اصلی در زوایای مختلف حضور کنترل کننده در $r_D=1/5$

الف) نشان می‌دهند که هرچند وقتی کنترل کننده‌ها در موقعیت زاویه‌ای $\theta=90^\circ$ قرار گرفته‌اند ضریب پسای استوانه اصلی افزایش یافته است، معمولاً دامنه نوسانات ضرایب برآ و پسا استوانه اصلی در حضور کنترل کننده‌ها به صورت قابل توجهی کاهش یافته‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در این فاصله شعاعی خاص، موقعیت زاویه‌ای $\theta=50^\circ$ بیشترین اثربخشی را در کاهش دامنه نوسانات نیروهای برآ و پسا محقق کرده است. در این موقعیت زاویه‌ای علاوه بر کاهش قابل توجه دامنه نوسانات مقدار متوسط ضریب پسا هم در مقایسه با سایر موقعیت‌های زاویه‌ای کمتر شده است. شکل ۱۰ (ب) و شکل ۱۱ (ب) نشان می‌دهند که در حضور استوانه اصلی، قرارگیری کنترل کننده‌ها در موقعیت زاویه‌ای $\theta=30^\circ$ باعث افزایش مقادیر ضرایب

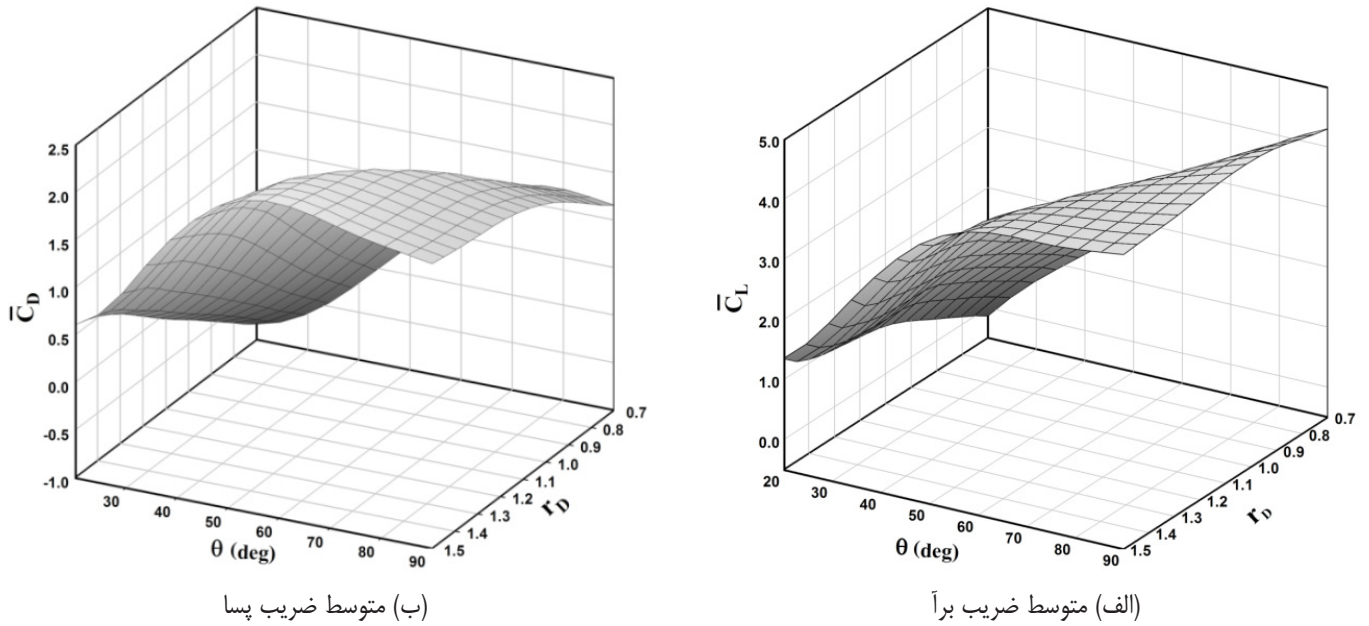


Fig. 13. Averaged lift and drag coefficients of the rotating controller at its different angular and radial positions

شکل ۱۳: متوسط ضرایب برآ و پسای استوانه چرخان در موقعیت‌های مختلف شعاعی و زاویه‌ای کنترل کننده

اصلی و استوانه چرخان کمترین مقدار هستند. شکل ۱۵ دامنه نوسانات ضرایب پسای استوانه اصلی و کنترل کننده جریان را در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد. هنگامی که موقعیت کنترل کننده در $(r_D=1/1, \theta=45^\circ)$ قرار دارد، دامنه نوسانات ضرایب پسای هر دو استوانه ناچیز هستند. نتایج نشان می‌دهند که در این موقعیت خاص استوانه‌های کنترل کننده می‌توانند میدان جریان اطراف استوانه اصلی و کنترل کننده‌های چرخان را همزمان پایدار کنند.

کاهش مقدار متوسط این ضرایب روی استوانه چرخان شده است. این اثر کاهشی در فواصل کمتر بیشتر است. البته تماس کامل دو استوانه از دیدگاه کاربردی همیشه امکان پذیر نیست و وجود یک فاصله حداقل بین آن‌ها از اعتبار عملیاتی بیشتری برخوردار است.

شکل ۱۴ دامنه نوسانات ضرایب برآی استوانه اصلی و کنترل کننده چرخان را به ازای موقعیت‌های مختلف زاویه‌ای و شعاعی کنترل کننده نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که یک موقعیت مناسب، $r_D=1/1, \theta=50^\circ$ وجود دارد که در آن نوسانات ضرایب برآ برای استوانه

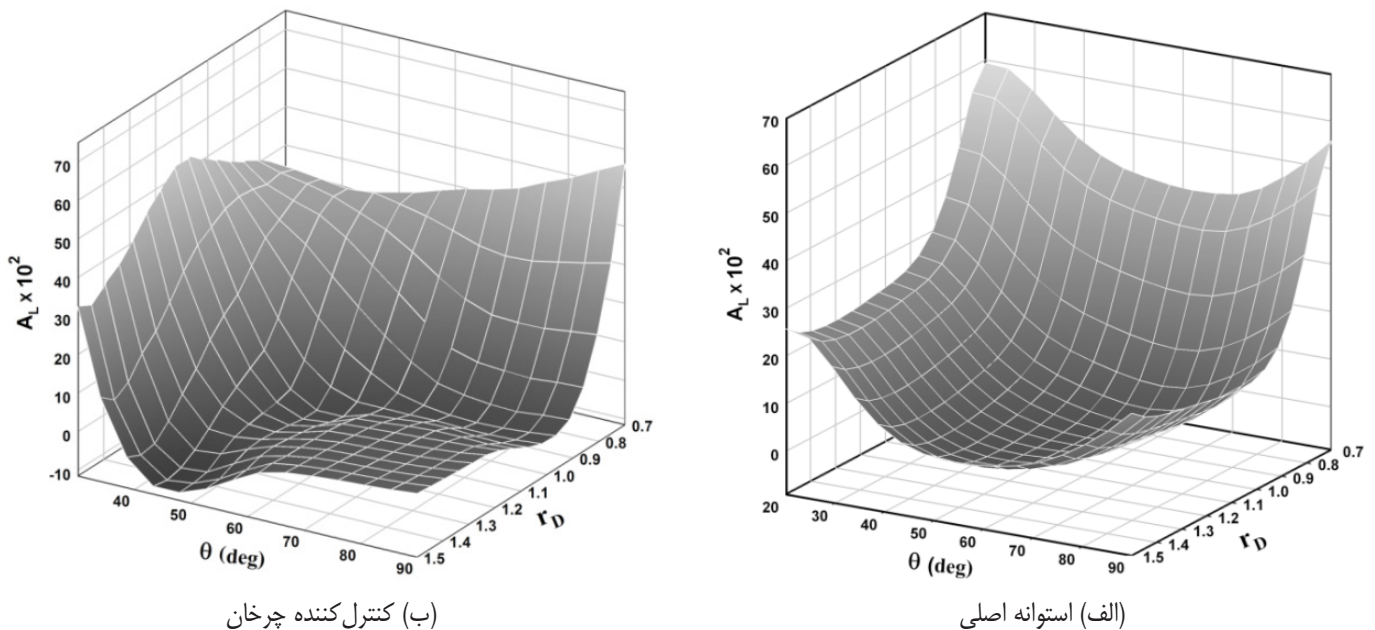


Fig. 14. Oscillation amplitudes of the lift coefficients of the main and rotating cylinders at different angular and radial positions of the controller

شکل ۱۴: دامنه نوسانات ضرایب برآی استوانه اصلی و استوانه چرخان در موقعیت‌های مختلف زاویه‌ای و شعاعی

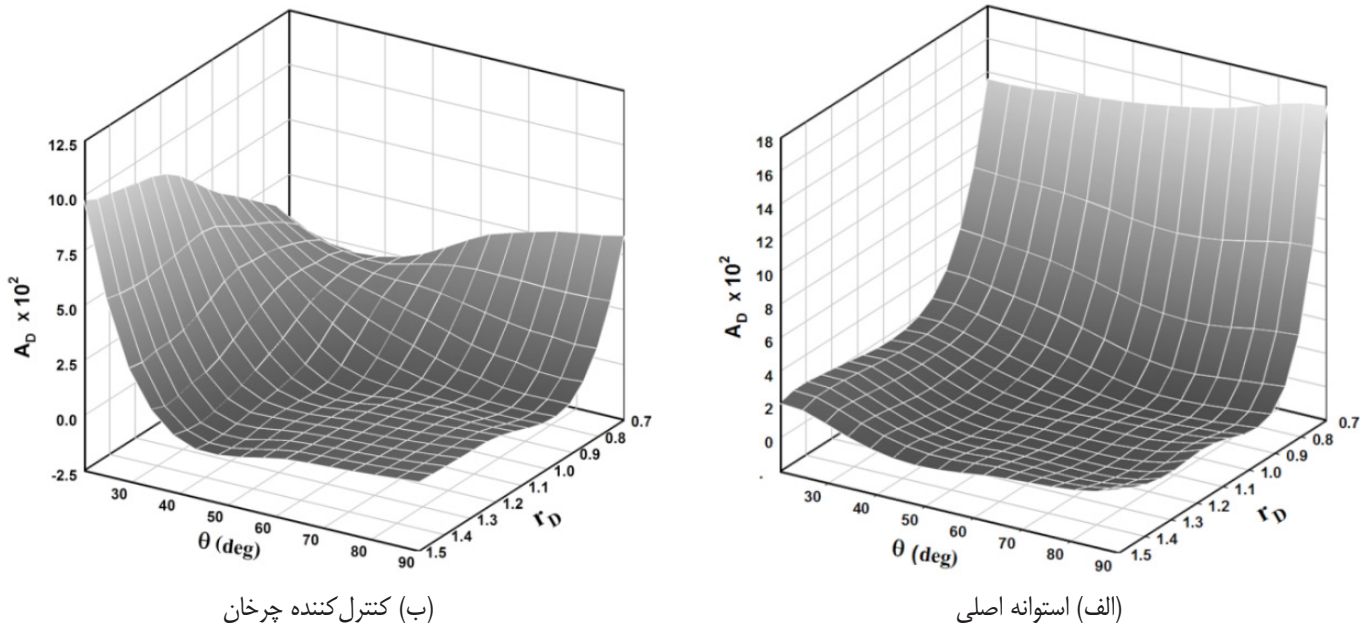


Fig. 15. Oscillation amplitudes of the drag coefficients of the main and rotating cylinders at different angular and radial positions of the controller

شکل ۱۵: دامنه نوسانات ضرایب پسای استوانه اصلی و استوانه چرخان در موقعیت‌های مختلف زاویه‌ای و شعاعی

شکل ۱۷ (الف) خطوط جریان عبوری از روی استوانه اصلی را در غیاب کنترل‌کننده‌ها و در یک لحظه نشان می‌دهد. نوسانات خطوط جریان در ناحیه دنباله استوانه حکایت از پدیده ریزش گردابه دارد. شکل ۱۷ (ب) همین خطوط را هنگامی که کنترل‌کننده‌ها در موقعیت مکانی $(r_D=1/1, \theta=45^\circ)$ حضور دارند نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تقارن کاملی در خطوط جریان که حکایت از پایدار شدن جریان و توقف پدیده ریزش گردابه‌ها دارد، حاصل شده است. در شکل ۱۸ کانتورهای لحظه‌ای ورتیسیته متناظر با شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. حضور یک خیابان گردابه‌ای کارمن پشت استوانه اصلی و در غیاب کنترل‌کننده‌ها کاملاً مشهود است. اما با قرار دادن کنترل‌کننده‌ها در موقعیت مورد نظر این خیابان گردابه به طور کامل از بین رفته است.

۴-۳- اثربخشی کنترل‌کننده‌های جریان

اثربخشی کنترل‌کننده‌های جریان را می‌توان به صورت کمی و به کمک شاخص‌های تعریف شده (روابط (۷) تا (۱۰)) مطالعه کرد. پارامترهای نوسانی استوانه اصلی در عدم حضور کنترل‌کننده‌های جریان و زمانی که آن‌ها در موقعیت مناسب $(r_D=1/1, \theta=45^\circ)$ نصب شده‌اند در جداول ۱ و ۲ آورده شده‌اند. نتایج این جدول‌ها نشان می‌دهد که در حضور کنترل‌کننده‌ها دامنه نوسانات ضرایب برآ و پسای استوانه اصلی به ترتیب در حدود ۹۹/۸۲۸٪ و ۹۹/۰۸۴٪ کاهش می‌یابند. همچنین، متوسط ضریب پسای استوانه اصلی به مقدار ۲۳/۲۴۳٪ کاهش یافته است.

جدول ۳ و ۴ مقادیر و شاخصهای مشابه را برای کنترل‌کننده چرخان در عدم حضور و حضور استوانه اصلی نشان می‌دهند. نتایج محاسبه شده نشان می‌دهند که در حضور استوانه اصلی دامنه نوسانات ضرایب برآ و پسای

شکل ۱۶ متوسط ضریب پسای استوانه اصلی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل هم وقتی که استوانه‌های کنترل‌کننده در موقعیت $(r_D=1/1, \theta=45^\circ)$ قرار دارند، متوسط ضریب پسای استوانه اصلی به کمترین مقدار رسیده است. در ضمن هنگامی که کنترل‌کننده‌ها در موقعیت $(r_D=0/7, \theta=90^\circ)$ قرار دارند، متوسط ضریب پسای استوانه اصلی به بیشترین مقدار رسیده است. دلیل این افزایش آن است که در این وضعیت، سیال حضور یک جسم پهن‌تر را احساس می‌کند که پهنای تقریبی $(D+2d)$ دارد.

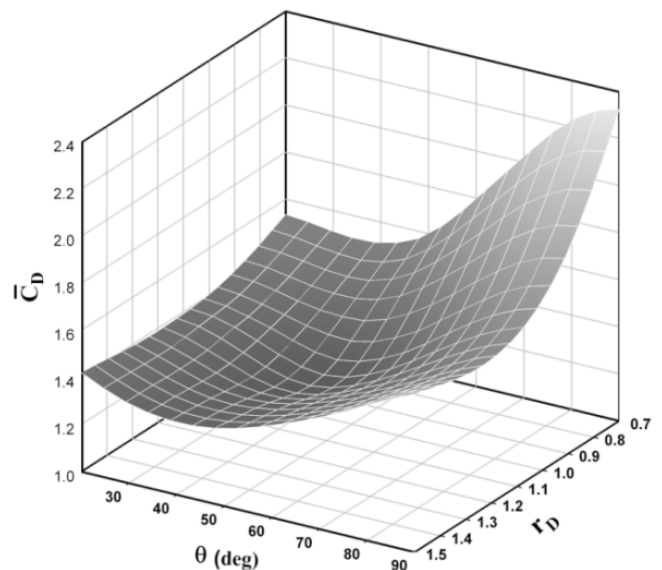
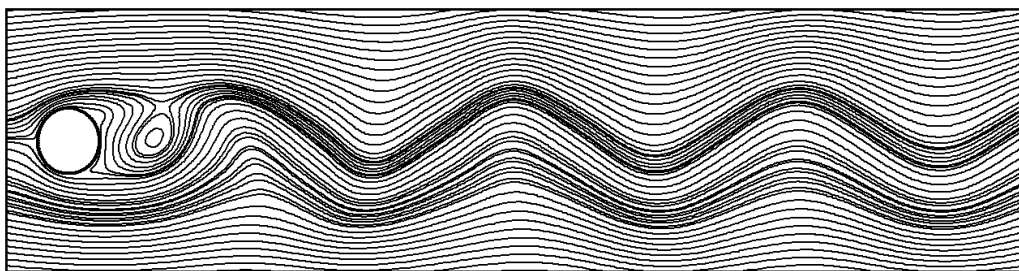
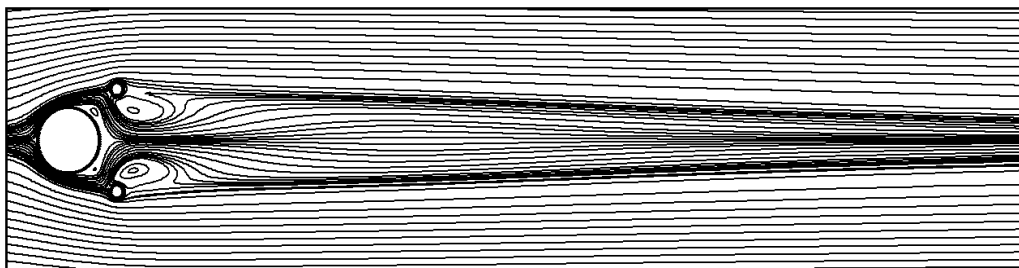


Fig. 16. Averaged drag coefficient of the main cylinder at different angular and radial positions of the controller

شکل ۱۶: متوسط ضریب پسای استوانه اصلی در موقعیت‌های مختلف زاویه‌ای و شعاعی کنترل‌کننده



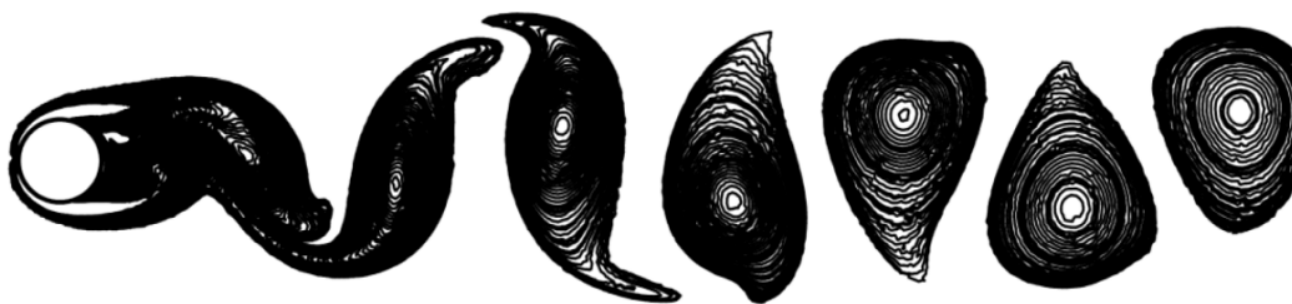
(الف) استوانه (بدون کنترل کننده)



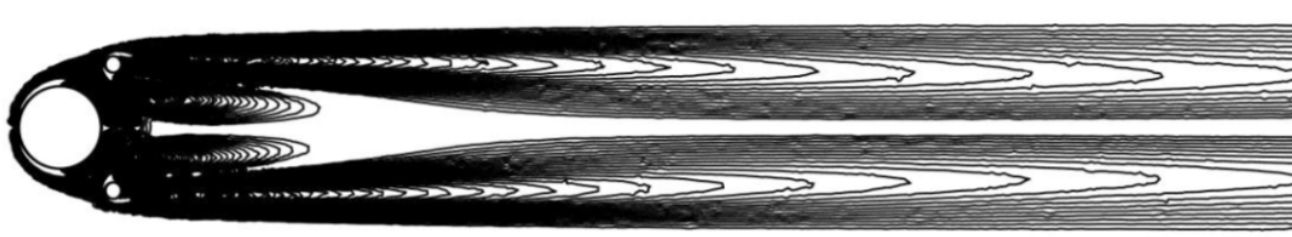
(ب) کنترل کننده جریان در $(r_D=1/1, \theta=45^\circ)$

Fig. 17. Comparison of the streamlines over the main cylinder for the research problem

شکل ۱۷: مقایسه خطوط جریان لحظه‌ای اطراف استوانه اصلی برای مسأله تحقیق



(الف) استوانه (بدون کنترل کننده)



(ب) کنترل کننده جریان در $(r_D=1/1, \theta=45^\circ)$

Fig. 18. Instantaneous vorticity contours behind the main cylinder for the research problem

شکل ۱۸: کانتورهای لحظه‌ای ورتیسیته‌ی در پشت استوانه اصلی برای مسأله تحقیق

۵- نتیجه‌گیری

جریان آرام ناپایا روی یک استوانه با حضور یک جفت استوانه‌های کنترل کننده چرخان به صورت عددی مطالعه شد. تأثیر موقعیت زاویه‌ای و شعاعی کنترل کننده‌های چرخان روی توقف ریزش گردابه بررسی شد. نتایج

استوانه‌های چرخان به ترتیب ۹۹/۷۸۴٪ و ۹۹/۹۲۶٪ کاهش می‌یابند. به علاوه، مقادیر ضرایب برآ و پسای استوانه کنترل کننده به ترتیب به مقدار ۱۰/۳۶٪ و ۱۰/۷۴۱٪ کاهش می‌یابند.

چرخان در موقعیتی مناسب وجود دارد. پاسخ به این سؤال که آیا در تمام رژیمهای جریان و شرایط سینماتیکی و دینامیکی آن این امکان فراهم است، می‌تواند به عنوان موضوع تحقیقاتی در تحقیقات آینده نویسندگان و سایر محققین مد نظر قرار گیرد. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در این راستا مورد استفاده محققین قرار گیرد.

فهرست علائم

A	دامنه نوسانات ضریب برآ/پسا، m
C	ضریب برآ/پسا
d	قطر کنترل کننده چرخان، m
d_D	قطر بی بعد شده کنترل کننده جریان
D	قطر استوانه، m
f	فرکانس، Hz
F	نیرو، N
I	شاخص کاهش
L	طول، m
p	فشار، N/m ²
r	مختصات شعاعی، m
r_D	مختصات شعاعی بی بعد شده
Re	عدد رینولدز
t	زمان، s
u_∞	سرعت جریان آزاد، m/s
V	بردار سرعت، m/s

علامت یونانی

α	سرعت زاویه‌ای بی بعد شده
θ	مختصات زاویه‌ای، degree
μ	چسبندگی دینامیکی، kg/m.s
ρ	دانسیته، kg/m ³
ω	سرعت زاویه‌ای، rad/s
∇	اپراتور مشتق گیرنده مکانی، 1/m

زیرنویس

c	کنترل کننده
D	پسا
L	برآ

جدول ۱: دامنه نوسانات ضریب برآی استوانه اصلی و شاخص کنترل نوسانات آن

Table 1. Oscillation amplitude of the lift coefficient of the main cylinder and its reduction index

$I_{A_L} \%$	$A_L \times 10^2$	
-	۶۱/۸	عدم حضور کنترل کننده جریان
۹۹/۸۲۸	۰/۱۰۷	با حضور کنترل کننده جریان

جدول ۲: متوسط و دامنه نوسانات ضریب پسای استوانه اصلی همراه با شاخص‌های کنترلی آن

Table 2. Averaged and oscillation amplitude of the drag coefficient of the main cylinder and its reduction indices

$I_{A_D} \%$	$A_D \times 10^2$	$I_{C_D} \%$	\bar{C}_D	
-	۳/۲۷	-	۱/۵۶۵	عدم حضور کنترل کننده جریان
۹۹/۰۸۴	۰/۰۳۰	۲۳/۲۴۳	۱/۲۰۱	با حضور کنترل کننده جریان

جدول ۳: متوسط و دامنه نوسانات ضریب برآی کنترل کننده همراه با شاخص‌های کنترلی آن

Table 3. Averaged and oscillation amplitude of the lift coefficient of the controller and its reduction index

$I_{A_L} \%$	$A_L \times 10^2$	$I_{C_L} \%$	\bar{C}_L	
-	۰/۴۶۲	-	۳/۰۵	عدم حضور استوانه اصلی
۹۹/۷۸۴	۰/۰۰۱	۱۰/۳۶	۲/۷۳۸	با حضور استوانه اصلی

جدول ۴: متوسط و دامنه نوسانات ضریب پسای کنترل کننده چرخان با شاخص‌های کنترلی آن

Table 4. Averaged and oscillation amplitude of the drag coefficient of the controller and its reduction indices

$I_{A_D} \%$	$A_D \times 10^2$	$I_{C_D} \%$	\bar{C}_D	
-	۰/۱۳۵	-	۱/۱۴۸	عدم حضور استوانه اصلی
۹۹/۹۲۶	۰/۰۰۱	۱۰/۷۴۱	۱/۰۲	با حضور استوانه اصلی

عددی نشان می‌دهد که یک موقعیت مناسب برای استوانه‌های کنترل کننده وجود دارد که در آن ریزش گردابه به صورت کامل متوقف می‌شود. در این وضعیت ناپایداری جریان و نوسانات نیروهای هیدرودینامیکی روی مجموعه استوانه‌ها همزمان از بین می‌رود. در ضمن نیروی پسای وارد بر مجموعه استوانه‌ها هم کاهش می‌یابد. مسلماً موقعیت مناسب قرارگیری کنترل کننده‌های چرخان متأثر از رژیم جریان، قطر استوانه کنترل کننده چرخان و همچنین سرعت دورانی آن خواهد بود. لذا با تغییر کمیت‌های هندسی، دینامیکی و سینماتیکی مذکور باید فرآیندی که در این تحقیق برای یک رژیم جریان خاص با پارامترهای هندسی مفروض انجام شد، مجدداً تکرار شود تا موقعیت مناسب ممکنه برای نصب کنترلر پیدا شود. در این تحقیق مشخص شد که توقف کامل پدیده ریزش گردابه با نصب کنترلر

- [16] J.H. Lee, M.M. Bernitsas, High-damping high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter, *Journal of Ocean Engineering*, 38 (2011) 1697-1712.
- [17] W. Dung-An, C. Chun-Yuan, H. Huy-Tuan, Electromagnetic energy harvesting from vibrations induced by Karman Vortex Street, *Journal of Mechatronics*, 22(6) (2012) 746-75.
- [18] S. Rashidi, M. Hayadavoodi, J.A. Esfahani, Vortex shedding suppression and wake control: A review, *Journal of Ocean Engineering*, 126 (2016) 57-80.
- [19] V.J. Modi, S. Hill, T. Yokomizo, Drag reduction of truck through boundary-layer control, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54/55 (1995) 583-594.
- [20] C. Morton, S. Yarusevych, On vortex shedding from low aspect ratio dual step cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, 44 (2014) 251-269.
- [21] J. Wu, C. Shu, N. Zhao, Numerical study of flow control via the interaction between a circular cylinder and a flexible plate, *Journal of Fluids and Structures*, 49 (2014) 594-613.
- [22] S. Malekzadeh, A. Sohankar, Reduction of fluid forces and heat transfer on a square cylinder in a laminar flow regime using a control plate, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 34 (2012) 15-27.
- [23] D.K. Maiti, R. Bhatt, Vortex shedding suppression and aerodynamic characteristics of square cylinder due to offsetting of rectangular cylinders towards a plane, *Journal of Ocean Engineering*, 82 (2014) 91-104.
- [24] J.C. Chen, P.S. Chuan, Suppression of vortex shedding from a rectangular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluids and Structures*, 43 (2013) 15-27.
- [25] M. Pasandidefard, A.A. Hashempour, Drag reduction on a cylinder by installing a rod at the upstream, in: 10th congress of Iranian aerospace society, Tehran, Tarbiat-Moddares University, (2011) (In Persian).
- [26] S. Mittal, A. Raghuvanshi, Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 35 (2001) 421-447.
- [27] A. Dipankar, T.K. Sengupta, S.B. Talla, Suppression of vortex shedding behind a circular cylinder by another control cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, (2006) 1-20.
- [28] J.O. Pralits, L. Brandt, F. Giannetti, Instability and sensitivity of the flow around a rotating circular cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, (2010) 1-24.
- [29] S. Mittal, Control of flow past bluff bodies using rotating
- [1] M.M. Zdravkovich, *Flow around circular cylinders: Fundamentals*, Vol.1, Oxford University Press, New York, 1997.
- [2] M.M. Zdravkovich, M.M., 2003. *Flow around circular cylinders: Applications*, Vol. 2, Oxford University Press, New York, 2003.
- [3] B.M. Sumer, J. Fredsoe, J., Hydrodynamics around cylindrical structures, Revised Ed. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 26, World Scientific Publishing Co., 2006.
- [4] C. Tropea, A.L. Yarin, J.F. Foss, *Handbook of experimental fluid Mechanics*, Springer Printing and binding: Sturtz GmbH, ISBN: 978-3-540-25141-5, 2007.
- [5] P.R.N. Childs, *Rotating Flow*, Elsevier, Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0-12-382098-3, 2011.
- [6] C. H. K. Williamson, Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *J. Journal of Fluid Mechanics*, 206 (1989) 579-627.
- [7] H.M. Badr, M. Coutanceau, S.C.R. Dennis, C. Menard, Unsteady flow past a rotating cylinder at Reynolds numbers 103 and 104, *Journal of Fluid Mechanics*, 220 (1990) 459-484.
- [8] A. Maurel, P. Petitjeans, *Vortex Structure and Dynamics, Lectures of a Workshop Held in Rouen, France, April 27-28*, Springer, 1999.
- [9] M. Brocchini, F. Trivellato, *Vorticity and turbulence effects in fluid structure interaction, An application to hydraulic structure design*, WIT press, ISBN: 1-84564-052-7, 2006.
- [10] P.G. Drazin, *Introduction to Hydrodynamic Stability*, Cambridge University Press, ISBN: 0-521-80427-2, 2002.
- [11] J.N. Newman, *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press Cambridge and Massachusetts. ISBN: 0-262-14026-8, 1999.
- [12] R.D. Blevins, *Flow Induced Vibration*. Krieger, 2001.
- [13] M.P. Paidoussis, *Fluid structure interactions, slender structures and axial flow*, Vol.1, Academic Press, ISBN: 0-12-544360-9, 1999.
- [14] M.P. Paidoussis, *Fluid structure interactions, slender structures and axial flow*, Vol. 2, Elsevier, ISBN: 0-12-544361-7, 2004.
- [15] A. Farshidianfar, Y. Narenjane, clean and infinite energy harvesting from self-exciting vibration caused by vortices, *Mechanical Engineering*, 77 (2012) 73-85 (In Persian).

- (2015) 66-80.
- [33] S. Muddada, B.S.V. Patnaik, An active flow control strategy for the suppression of vortex structures behind a circular cylinder, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 29 (2010) 93–104.
- [34] S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, McGraw Hill Book Co., New York, 1980.
- [35] H.M. Badr, S.C.R. Dennis, P.J.S. Young, Steady and unsteady flow past a rotating circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Computers & Fluids*, 17(4) (1989) 579-609.
- [36] S. Mittal, B. Kumar, Flow past a rotating cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, 476 (2003) 303-334.
- control cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, 15 (2001) 291-326.
- [30] I. Korkischko, J.R. Meneghini, Suppression of vortex-induced vibration using moving surface boundary-layer control, *Journal of Fluids and Structures*, 34 (2012) 259–270.
- [31] W. Jian Sheng, X. Yuan Xin, T. Young Sheng, Active control of circular cylinder flow by affiliated rotating cylinders, *Science China, Technological Sciences*, 56 (2013) 1187-1197.
- [32] H. Zhu, J. Yao, Y. Ma, H. Zhao, Y. Tang, Simultaneous CFD evaluation of VIV suppression using smaller control cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, 57

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Goodarzi and E. Khalili Dehkordi, Numerical Study on Laminar Flow Over a Cylinder and Its Rotating Controllers for Suppressing the Vortex Shedding, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 849-862.
DOI: 10.22060/mej.2016.861

