

بررسی اثر مکان کنترل کننده‌های جریان بر کاهش گردابه‌های اطراف استوانه

امین جلالیان^۲
دانشکده فنی مهندسی،
دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

مجتبی برزگر رحیمی^۱
دانشکده فنی مهندسی،
دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸)

چکیده

کنترل جریان روی استوانه و به تعویق انداختن ناحیه‌ی جدایش جریان از سطح استوانه، باعث کوچک شدن ناحیه‌ی دنباله و کاهش ریزش گردابه‌ها می‌گردد و عمر سازه را افزایش می‌دهد. پدیده‌ی خستگی که در اثر بارگذاری و تنش‌های نوسانی وارد بر سازه‌ها ایجاد می‌شود، موجب استهلاک و کاهش عمر سازه‌ها می‌گردد. کنترل کننده‌های جریان نقش بازدارنده در ایجاد پدیده‌ی خستگی دارند. در این پژوهش تأثیر دو استوانه‌ی کنترلی برای فواصل مختلف از استوانه اصلی در رینولدز ۱۴۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. یافتن فاصله‌ی خاصی برای جای‌گیری استوانه‌های کنترلی از استوانه‌ی اصلی که در آن فاصله ریزش گردابه‌ها تا حد مطلوبی کاهش یافته و خنثی شود، هدف اصلی این پژوهش است. بدین منظور تحلیل عددی گذرا توسط نرم‌افزار فلونت انجام شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که فاصله‌ی خاصی برای خنثی‌سازی ریزش گردابه‌ها وجود دارد. این فاصله، برای رینولدز ۱۴۰ به اندازه‌ی ۰.۸ قطر استوانه‌ی اصلی است و از آن تحت عنوان فاصله‌ی طلایی می‌توان یاد کرد که مؤلفه‌ی مهمی در طراحی به حساب می‌آید.

واژه‌های کلیدی: کنترل کننده‌های جریان، جریان حول استوانه، ریزش گردابه‌ها، شبیه‌سازی عددی، گردابه‌های فون کارمن

Investigating the effect of the location of flow controllers on the reduction of vortices around the cylinder

Mojtaba Barzegar Rahimi

Faculty of Engineering,
Imam Hossein University, Tehran, Iran

Amin Jalalian

Faculty of Engineering,
Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received 21/ October/2022; Accepted 29/ December/2022)

ABSTRACT

Controlling the flow on the cylinder and postponing the flow separation area from the surface of the cylinder, Shrinking the wake area and reduces the drop of vortices and increases the life of the structure. The phenomenon of fatigue, which is caused by loading and fluctuating stresses on the structures, causes depreciation and reduces the life of the structures. Flow controllers play an inhibitory role in creating the phenomenon of fatigue. In this research, the effect of two control cylinders for different distances from the main cylinder at Reynolds 140 was evaluated. The main goal of this research is to find a certain distance to place the control cylinders from the main cylinder in which the vortex shedding distance is reduced to an optimal level and neutralized. For this purpose, transient numerical analysis was performed by Fluent software. The results of this research indicate that there is a certain distance to neutralize the fall of vortices. This distance, for Reynolds 140, is equal to 0.8 of the diameter of the main cylinder, and it can be referred to as the golden distance, which is considered an important component in the design.

Keywords: Flow controllers, Flow around cylinder, Vortex shedding, Numerical simulation, Von-Karman vortex

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مکانیک: Mojtaba.BarzegarRahimi@ihu.ac.ir

۲- پژوهشگر (دکترای مهندسی مکانیک) (نویسنده پاسخگو): a.jalalian@ihu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

D	قطر استوانه اصلی، m
Re	عدد رینولدز
C_D	ضریب پسا (درگ)

علائم یونانی

ν	لزجت سینماتیکی، $\frac{m^2}{s}$
θ	زاویه روی استوانه
δ	ضخامت لایه مرزی، m

۱- مقدمه

کنترل جریان سیال از دیرباز مورد توجه پژوهشگران حوزه‌ی دینامیک شاره‌ها بوده است. جریان سیال گذرنده از اطراف استوانه، تحت برخی شرایط و عدد رینولدز خاص، منجر به ایجاد پدیده‌ای بنام خیابان گردابه‌های فون کارمن می‌شود. به سبب ارتعاشات طولانی مدت میدان جریان، حین و بعد از شکل‌گیری خیابان گردابه‌های فون کارمن و نوسانات نیروهای برآ و پسا، ترک‌های ریزی در بدنه‌ی سازه ایجاد کرده و در دراز مدت موجب شکل‌گیری پدیده‌ی خستگی و شکست دینامیکی می‌شود. کنترل‌کننده‌های جریان نقش کاهش و خنثی‌ساز در ریزش گردابه‌ها دارند [۱ و ۲]. در حقیقت کنترل‌کننده‌های جریان با کاهش ناحیه‌ی دنباله و تأخیر در جدایش جریان از سطح استوانه، منجر به کاهش و خنثی‌سازی ریزش گردابه‌ها می‌شوند. روش‌های کنترل جریان به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. به عنوان نمونه، تحریک صوتی و دمیدن جت از روش‌های کنترل فعال است. چنین روش‌هایی معمولاً پرهزینه، پیچیده و ناکارآمد هستند. روش کنترل غیرفعال روشی رایج و کاربردی است که هزینه کمتری دارد. در این پژوهش شیوه‌ی کنترل غیرفعال مورد استفاده قرار گرفته است. یافتن فاصله‌ی بهینه برای جای‌گیری استوانه‌های کنترلی به عنوان هدف اصلی این پژوهش مطرح است. در گذشته تحقیقات متعددی پیرامون جریان اطراف استوانه انجام شده است. آسکیین [۳] ادعا کرد که برای جریان اطراف استوانه، در محدوده‌ی $200 < Re < 400$ خیابان گردابه‌ها در حالت آرام قرار دارند. بلوینز [۴] بازه‌ی $150 < Re < 400$ را محدوده‌ی حالت آرام، برای گردابه‌ها مدنظر قرار داد. همان‌طور که قابل ملاحظه است در رابطه با این محدوده، بین محققان اختلاف نظر وجود دارد. برزگر رحیمی و همکاران [۵] تأثیر استوانه‌های کنترلی در پنج رینولدز و در هر رینولدز برای سه مکان مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها متوجه کنترل جریان در هر سه فاصله‌ی معین و کاهش ریزش گردابه‌ها در فرکانس‌های مختلف

با استفاده از تبدیل فوریه‌ی FFT شدند. کیو و همکاران [۶] تأثیر یک و دو استوانه‌ی کنترلی بر الگوی گردابه‌ها را در رینولدزهای پایین مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که به ازای عدد رینولدز ۸۰-۳۰۰، وجود کنترل‌کننده‌ها سبب کاهش نوسان نیروی پسا وارد بر استوانه می‌شود و بسته به مکان کنترل‌کننده‌ها، با افزایش عدد رینولدز مقدار نیروی برآ افزایش می‌یابد. همچنین حضور کنترل‌کننده‌ها، باعث کاهش نفوذ اندازه حرکت جریان در ناحیه‌ی بین کنترل‌کننده‌ها می‌شود و نرخ چرخش سیال را کاهش می‌دهد. گودرزی و دهکردی [۱] پژوهشی پیرامون جریان آرام عبوری از روی استوانه و کنترل‌کننده‌های چرخان مجاور آن، جهت خنثی‌سازی ریزش گردابه‌ها داشتند. آن‌ها دریافتند که در فاصله‌ی $r_D = 1.1$ ، $\theta = 45^\circ$ ، حضور کنترل‌کننده‌های جریان باعث توقف ریزش گردابه‌ها می‌شود (r_D فاصله‌ی بی‌بعد کنترل‌کننده از مرکز استوانه‌ی اصلی و θ ، زاویه‌ی محل قرارگیری کنترل‌کننده نسبت به محور افقی است). شایان ذکر است چرخش کنترل‌کننده‌های جریان پرهزینه است و این رویه از روش‌های کنترل فعال به حساب می‌آید. دارکار و شروین [۷] روش‌های کنترل غیرفعال را با تغییر شکل بدنه یا اتصال دستگاه‌های افزودنی مانند میله‌ی کنترل یا عناصر زبر بر روی بدنه‌ی سازه بررسی کردند. آن‌ها پی بردند که با افزودن کنترل‌کننده‌ها، در حالت پایدار در رینولدز ۱۰۰ مقدار نیروی پسا حدود ۱۶٪ و در رینولدز ۵۰۰ حدود ۳۴٪ کاهش می‌یابد. رشیدی و همکاران [۸] مرور کاملی بر روش‌های کنترل ناحیه‌ی دنباله و توقف ریزش گردابه‌ها انجام دادند. آن‌ها روش‌های مختلف کنترل جریان را دسته‌بندی کردند و بیان کردند که نصب کنترل‌کننده‌های جریان یکی از روش‌های مهم و بسیار کاربردی برای کنترل مؤثر جریان، تأخیر در جدایش و کاهش ریزش گردابه است.

منگینی و همکاران [۹] به‌طور عددی ریزش گردابه‌ها و تداخل جریان بین دو استوانه‌ی دایره‌ای با قطر یکسان و پیکربندی‌های کنار هم در رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در ترتیب پشت سر هم برای $L < 3D$ ، میانگین ضریب پسا استوانه‌ی پایین‌دست، مثبت می‌شود و ریزش گردابه از هر دو استوانه اتفاق می‌افتد. درحالی‌که نیروی پسا منفی برای $L > 3D$ پیدا شد و ریزش گردابه فقط برای استوانه‌ی پایین‌دست مشاهده گردید (L فاصله‌ی دو استوانه از یکدیگر است). وانگ و همکاران [۱۰] جریان دو استوانه‌ی پشت سر هم با قطرهای مختلف را در

کنترل جریان در اطراف یک استوانه‌ی دایره‌ای با نصب یک استوانه‌ی گوه‌ای شکل در بالادست را برای رینولدز ۲۰۰، شبیه‌سازی عددی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که در نسبت فاصله‌ی $L/D=2,8$ و $L_w/D=0,04$ (که L فاصله‌ی بین رأس گوه و مرکز استوانه، L_w طول ضلع گوه و D قطر استوانه است)، دامنه‌ی نوسان ضرایب برآ و پسا بر روی استوانه‌ی اصلی به ترتیب ۷۱,۹٪ و ۶۰,۱٪ کاهش می‌یابد.

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که نوسانات حاصل از گردابه‌های پایین‌دست استوانه می‌تواند باعث صدمه به سازه شود و کنترل‌کننده‌های جریان می‌توانند از این تخریب جلوگیری کنند. در بین روش‌های مختلف کنترل جریان پایین‌دست، استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرفعال ساکن، روشی مناسب و کاربردی است که در کار حاضر به آن پرداخته شده است و قبلاً به این شکل به آن پرداخته نشده است. از نوآوری‌های پژوهش حاضر این است که با استفاده از دو استوانه‌ی کنترلی ساکن، فاصله‌ی طلایی برای توقف ریزش گردابه‌ها، توقف نوسانات ضریب پسا و خنثی‌سازی پدیده‌ی خستگی که ناشی از بارگذاری و تنش‌های نوسانی وارد بر استوانه است، یافته شد. هدف تحقیق حاضر، یافتن موقعیت مکانی مناسبی برای نصب دو کنترل‌کننده غیرفعال در مجاورت یک استوانه‌ی اصلی است که باعث کاهش قابل توجه و یا حتی خنثی‌سازی پدیده‌ی ریزش گردابه‌ها در ناحیه‌ی دنباله شود.

۲- معرفی مسئله و معادلات حاکم

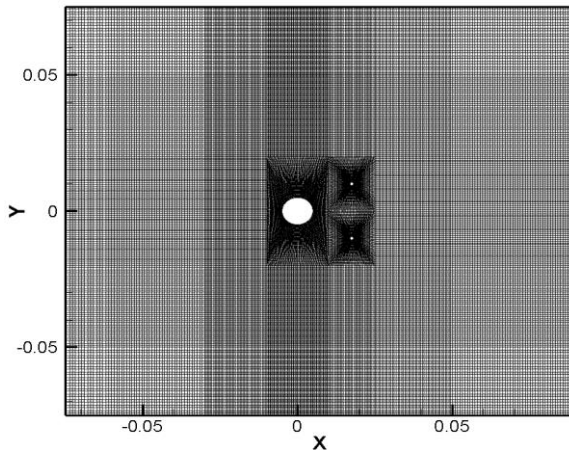
۲-۱- معرفی مسئله

شکل ۱ طرح‌واره‌ی مسئله‌ی حاضر را نشان می‌دهد. با توجه به فرض طویل بودن استوانه و تأثیر اندک بعد سوم، مساله به صورت دوبعدی بررسی شده است. طول کانال یا دامنه‌ی محاسباتی، مقدار $50D$ ، عرض آن نیز $30D$ و قطر استوانه‌ی اصلی D است. فاصله‌ی استوانه‌ی اصلی از ورودی کانال $10D$ و مبدأ مختصات بر مرکز استوانه اصلی منطبق است. استوانه‌های کنترلی یکسان بوده و قطر هر یک $d=0,125D$ است. فاصله‌ی افقی هر دو استوانه‌ی کنترلی از مبدأ برای حالت‌های مختلف، متفاوت و مقدار فاصله‌ی عمودی هر کدام از کنترل‌کننده‌ها از مبدأ، D (بالای مبدأ مختصات و پایین آن) و $D=1$ cm است. شایان ذکر است مطابق با حداقل ابعاد مناسب برای میدان محاسباتی مطرح شده در [۱]، ابعاد مورد نظر در پژوهش حاضر به اندازه‌ی کافی بزرگ بوده و نتایج مستقل از دامنه‌ی میدان حل است. ضمناً در کار حاضر بررسی اثرات زبری مدنظر نیست.

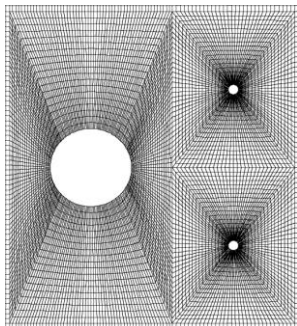
رینولدز ۱۰۰ و ۱۵۰ مورد مطالعه قرار دادند. فاصله‌ی بین استوانه‌ی کنترلی و استوانه‌ی اصلی (G) را از $0,1D$ تا $4D$ در نظر گرفتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نسبت فاصله‌ی دو استوانه به قطر (G/D) و نسبت قطر دو استوانه (d/D)، تأثیرات مهمی بر ضرایب پسا و برآ، توزیع فشار در اطراف استوانه‌ها و فرکانس گردابه‌ها در اطراف دو استوانه دارد. ویلیامسون [۱۱] در اعداد رینولدز کوچک، الگوهای مختلف ریزش گردابه در ناحیه‌ی دنباله را استخراج کرد. پژوهش او بیشتر پیرامون وجود ناپیوستگی‌ها در رابطه‌ی استروهل-رینولدز است. بدر و همکاران [۱۲] 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. هدف از آن تحقیق، بررسی تأثیر افزایش سرعت چرخش استوانه بر ساختار جریان بود. دینامیک ریزش گردابه‌ها توسط مورل و پتیجینس [۱۳] و بروچینی و تریولاتو [۱۴] بررسی شد. آن‌ها از جوانب تجربی، عددی و تحلیلی، گردابه‌های دوبعدی را تحلیل و بررسی کردند. از بحث‌های مهم مطرح شده توسط آن‌ها، تفسیر ارتعاشات ناشی از گردابه برای کنترل جریان و شناخت دینامیک این قبیل مسائل است. درازین [۱۵] و نیومن [۲] پایداری و ناپایداری جریان را مطالعه کردند. در این مطالعه انواع ناپایداری‌ها دسته‌بندی شد. آن‌ها پایداری جریان در هندسه‌های معمول مانند جریان از روی صفحه‌ی صاف، جریان از روی اجسام چرخان و جریان در کانال‌های واگرا را مورد بررسی قرار دادند. 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 [۱۶] و پایدوسیسی [۱۷ و ۱۸] انجام شد.

ژانگ و همکاران [۱۹] کنترل جریان یک استوانه‌ی دایره‌ای با استفاده از محرک‌های پلاسمایی در رینولدز ۱۰۰۰۰ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پی بردند که ساختارهای چرخشی ایجادشده توسط محرک‌های پلازما در اطراف استوانه‌ی دایروی، منجر به کاهش ضریب پسا تا میزان ۲۵٪ می‌شود. ایمرن و همکاران [۲۰] کنترل جریان سیال در اطراف استوانه‌ی دایروی با استفاده از سه کنترل‌کننده‌ی غیرفعال در رینولدز ۵۰۰ را شبیه‌سازی عددی کردند. آن‌ها دریافتند که به ازای پیکربندی خاصی در جای‌گیری کنترل‌کننده‌ها، ضریب پسا به اندازه‌ی ۲۱,۲۱٪ کاهش می‌یابد. هان و همکاران [۲۱]

اکثراً با المان‌های مربعی رسم شده است. از شاخصه‌های مهم شبکه‌بندی، کیفیت، ابعاد و نوع ساختار المان‌ها است. سلول‌های شبکه در اطراف استوانه‌ی اصلی و کنترل‌کننده‌ها، بسیار ریزتر شبکه‌بندی شده تا دقت خوبی در پیش‌بینی تغییرات و گرادیان متغیرهایی از قبیل سرعت و فشار داشته باشد. در شکل ۲، شبکه‌بندی مسئله نشان داده شده است.



الف- نمای دور



ب- نمای نزدیک

شکل (۲): نمایی از شبکه‌بندی مسئله

۳-۱- استقلال از شبکه

از الزامات شبیه‌سازی عددی بررسی مستقل بودن نتایج از تعداد سلول‌ها در شبکه‌بندی است. در شکل ۳ و ۴ برای حالت بدون کنترل‌کننده و با کنترل‌کننده، نمودار مؤلفه‌ی افقی سرعت برحسب فاصله‌ی افقی از استوانه‌ی اصلی، در محدوده‌ی که بیشترین گرادیان سرعت در آن قرار گرفته (محدوده‌ی ۰,۰۰۵ تا ۰,۰۱ متر از مبدأ) ترسیم شده است. مطابق با نمودارها، به ازای تعداد ۱۹۴۰۰۰ سلول برای حالت بدون کنترل‌کننده و تعداد ۱۹۶۳۰۰ سلول برای حالت با کنترل‌کننده، نتایج شبیه‌سازی مستقل از شبکه‌بندی شده است. مطابق جدول ۱ مقدار بیشترین درصد اختلاف نتایج بین

۲-۲- معادلات حاکم و فرمول‌بندی مسئله

معادلات حاکم برای جریان در شرایط گذرا و تراکم‌ناپذیر تعریف می‌شوند. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به صورت زیر است:

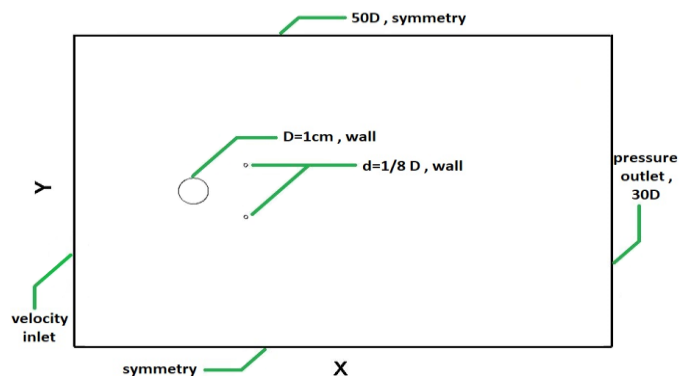
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

که بردار سرعت سیال، p فشار، ρ چگالی و ν لزجت سینماتیکی سیال است. همچنین ضریب پسا مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A V^2} \quad (3)$$

که در این فرمول، F_D نیروی پسا، V سرعت و A سطح مقطع مؤثر است.



شکل (۱): طرح‌واره‌ی ابعاد کانال و شرایط مرزی

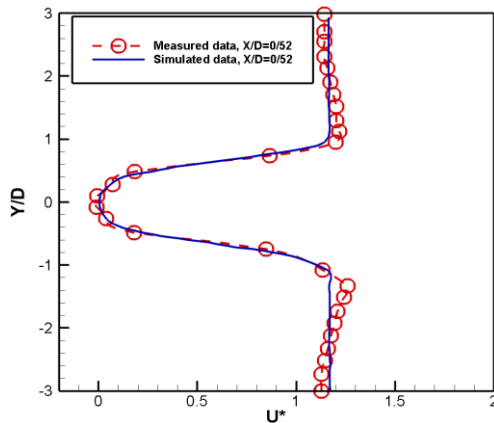
۳- شیوه‌ی حل معادلات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم از طریق شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار فلوئنت حل شده‌اند. مسئله به صورت گذرا با الگوریتم سیمپل و با استفاده از مدل آرام حل شد. برای گسسته‌سازی ترم جابجایی معادلات اندازه حرکت از روش پاورلاو^۱ استفاده شد. به منظور تسریع در گرفتن نتایج متغیر با زمان، ابتدا گام زمانی ۰,۲ تا ثانیه‌ی ۸,۴، انتخاب شد و پس از آن تا ثانیه‌ی ۱۴ که الگوی جریان حالت شبه پایدار یافت، گام زمانی ۰,۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد. دلیل این امر این است که تغییرات در ثانیه‌های انتهایی شبیه‌سازی حائز اهمیت است. حداکثر باقی‌مانده‌ها برای حل معادلات 10^{-6} در نظر گرفته شد. شبکه‌بندی به کمک نرم‌افزار پوینت‌وایز^۲ انجام شد. ساختار شبکه، سازمان‌یافته و

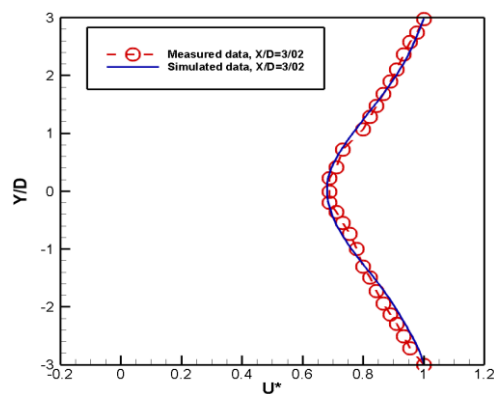
^۱ Power law

^۲ Pointwise

لازم است صحت‌سنجی شبیه‌سازی، بر اساس نمونه‌های آزمایشگاهی انجام گیرد. در کار حاضر صحت‌سنجی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی کار کیو و همکاران [۶] در حالت بدون کنترل‌کننده در رینولدز ۸۰ انجام شده است. در شکل ۵ و ۶ نمودار سرعت بی‌بعد U^* برحسب Y/D در دو مقدار X/D ثابت رسم شده است.



شکل (۵): نمودار U^* برحسب Y/D در $X/D=0,52$



شکل (۶): نمودار U^* برحسب Y/D در $X/D=3,02$

مطابق شکل نتایج دارای دقت بسیار خوبی است. مقادیر خطای بیشینه و متوسط در جدول ۲ ذکر شده است. حتی در قسمت پایین دست و نزدیک به استوانه ($X/D=0,52$)، با وجود اثر گردابه‌ها، خطای متوسط در حد ۳,۷٪ است.

جدول (۲): خطای متوسط و بیشینه‌ی صحت‌سنجی

خطای بیشینه	خطای متوسط	X/D
۷,۲٪	۳,۷٪	۰,۵۲
۳,۰۶٪	۱,۷۸٪	۳,۰۲

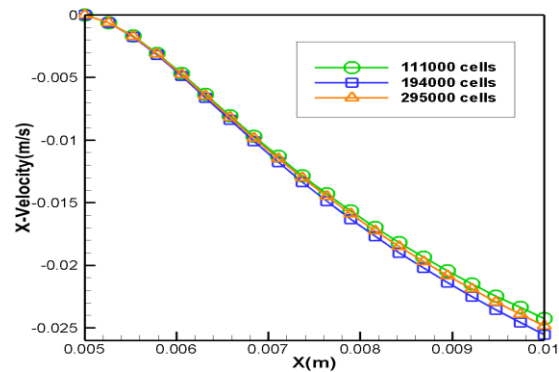
۴-۲- تفسیر نتایج سرعت و فشار

در شکل ۷ و ۸ تصاویر کانتورهای اندازه‌ی سرعت و فشار استاتیکی در حالت بدون کنترل‌کننده و با کنترل‌کننده برای

نمودارهای با تعداد سلول ۱۹۴۰۰۰ و ۲۹۵۰۰۰، در حالت بدون کنترل‌کننده ۲,۱۸٪ و بین نمودارهای با تعداد سلول ۱۹۶۳۰۰ و ۲۹۷۲۰۰، با کنترل‌کننده ۴,۹٪ است.

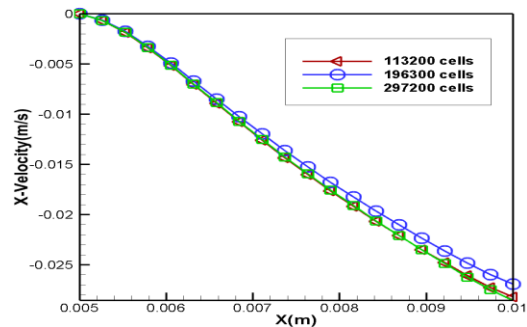
جدول (۱): خطای متوسط و بیشینه به ازای تعداد سلول‌ها

تعداد سلول ۲ شبکه	خطای متوسط	خطای بیشینه
۱۹۴۰۰۰ و ۲۹۵۰۰۰	۱,۳۸٪	۲,۱۸٪
۱۹۶۳۰۰ و ۲۹۷۲۰۰	۳,۰۳٪	۴,۹٪



شکل (۳): نمودار مؤلفه‌ی افقی سرعت برحسب فاصله‌ی افقی

در حالت بدون حضور کنترل‌کننده



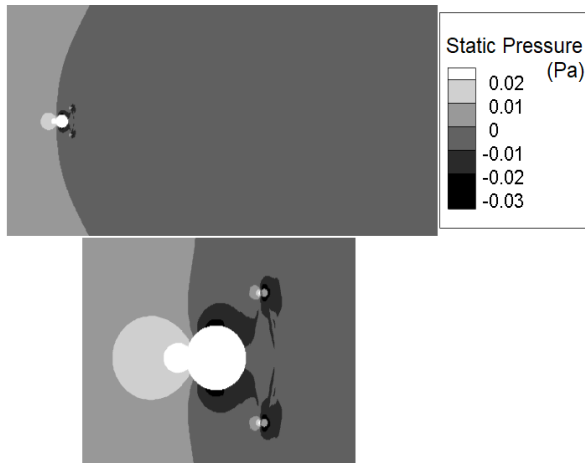
شکل (۴): نمودار مؤلفه‌ی افقی سرعت برحسب فاصله‌ی افقی

در حالت با حضور کنترل‌کننده

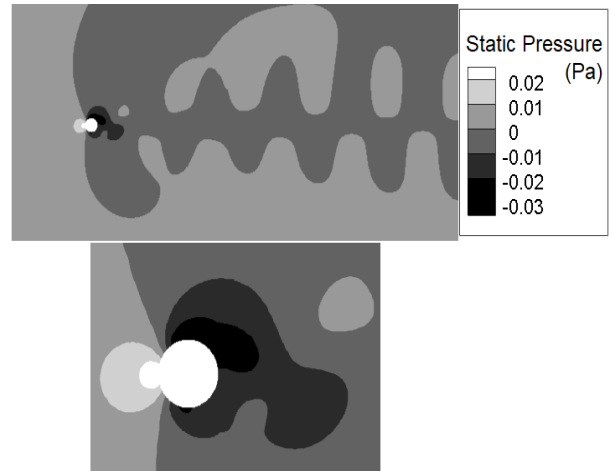
۴- نتایج و بحث

شبیه‌سازی عددی در دو حالت، یکی بدون کنترل‌کننده و دیگری همراه با استوانه‌های کنترلی، در رینولدز ۱۴۰ انجام شده است. دلیل این انتخاب این است که پژوهشی پیرامون این عدد رینولدز انجام نگرفته و طبق نتایج بلوینز [۴]، این مقدار در انتهای محدوده‌ی عدد رینولدز برای جریان آرام است. سیال مورد نظر هوا و سرعت سیال ورودی ۰,۲۰۴۵ m/s است. برای حالتی که استوانه‌های کنترلی لحاظ شده، مکان کنترل‌کننده‌ها تغییر کرده تا موقعیت بهینه در کاهش و خنثی‌سازی ریزش گردابه‌ها پیدا شود.

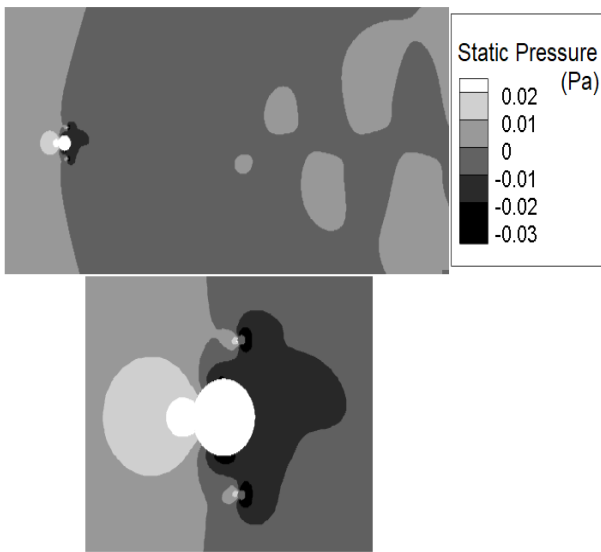
فواصل $X=0,01\text{ m}$ ، $X=0,008\text{ m}$ ، $X=0,0028\text{ m}$ و $X=0,0137\text{ m}$ در ثانیه‌ی ۱۴ام نشان داده شده است.



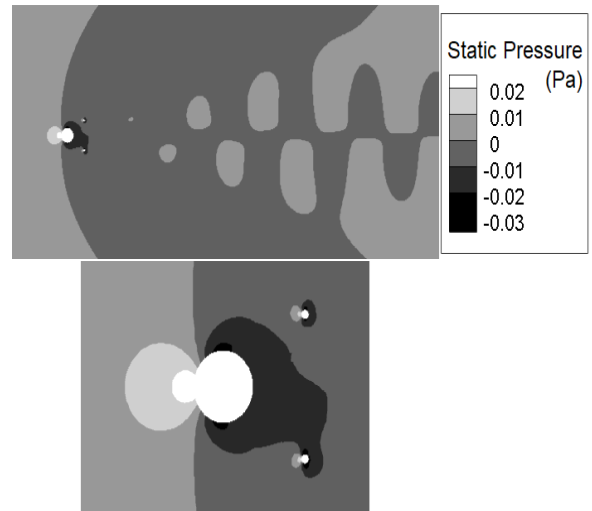
ت) کنترل کننده در $X=0,008\text{ m}$



الف) بدون کنترل کننده

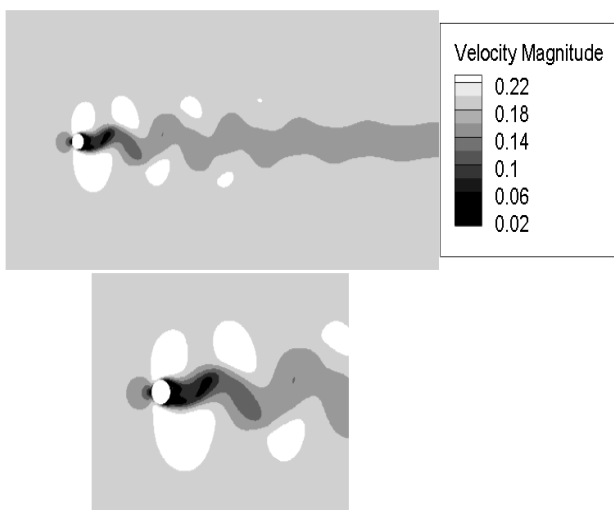


ث) کنترل کننده در $X=0,0028\text{ m}$

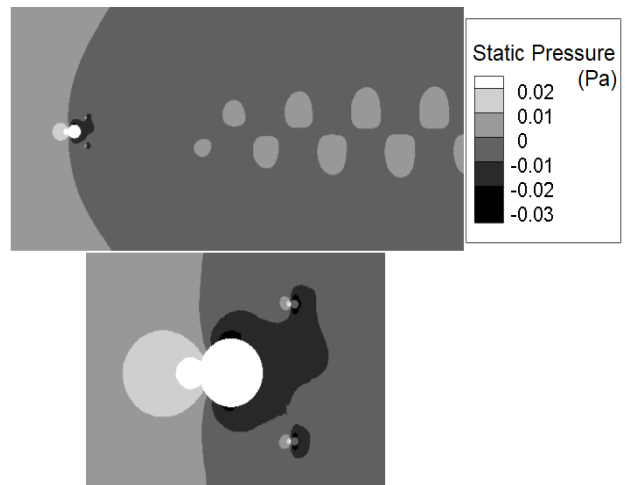


ب) کنترل کننده در $X=0,0137\text{ m}$

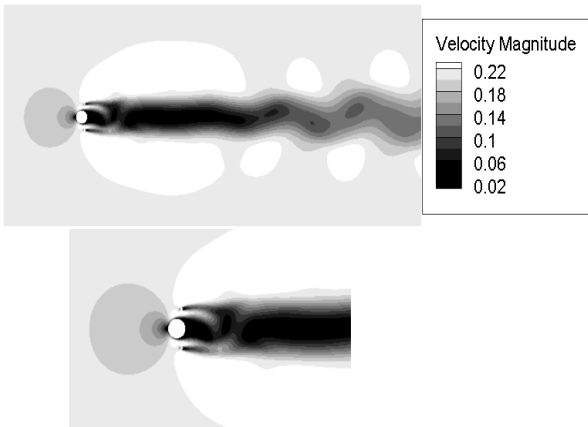
شکل (۷): نمای دور و نزدیک کانتورهای فشار در ثانیه‌ی ۱۴ام در موقعیت‌های مختلف کنترل کننده



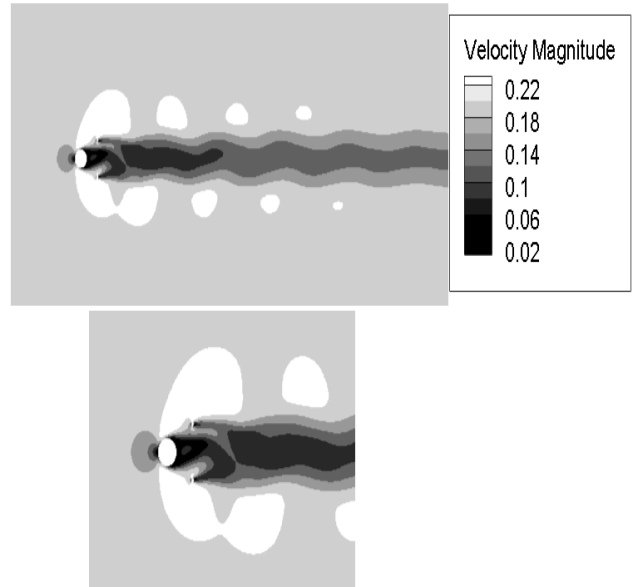
الف) بدون کنترل کننده



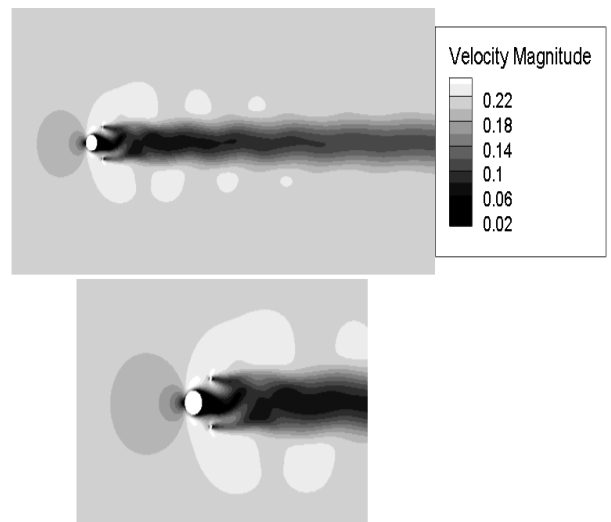
پ) کنترل کننده در $X=0,01\text{ m}$



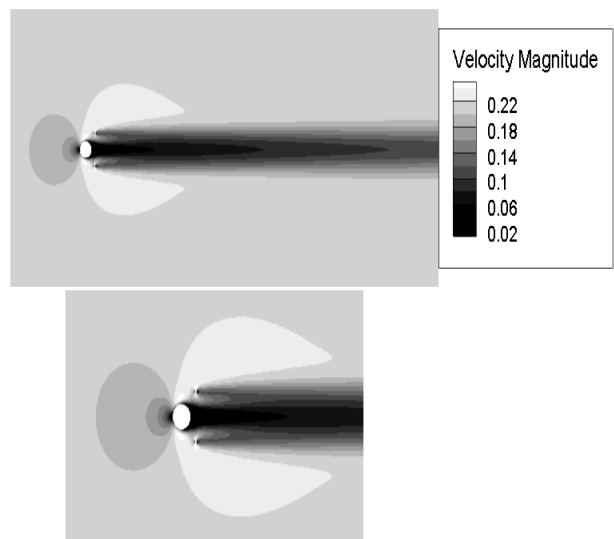
ث) کنترل کننده در $X=0.028$ m



ب) کنترل کننده در $X=0.137$ m



پ) کنترل کننده در $X=0.1$ m



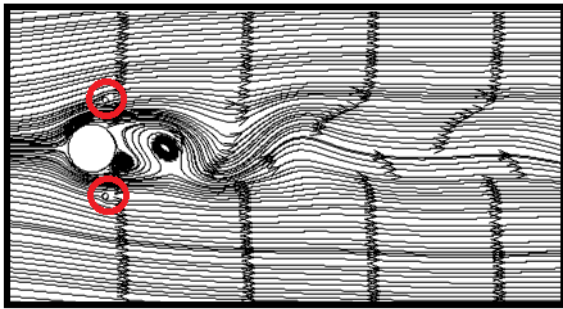
ت) کنترل کننده در $X=0.08$ m

شکل ۸): نمای دور و نزدیک کانتورهای اندازه‌ی سرعت در ثانیه‌ی ۱۴ام در موقعیت‌های مختلف کنترل کننده

همان‌طور که در تصاویر فوق مشاهده می‌شود، خیابان گردابه‌های فون کارمن در حالت بدون کنترل کننده به‌طور کامل شکل گرفته است. در حالت همراه با استوانه‌های کنترلی، تأثیر آن‌ها را به‌وضوح در فواصل مختلف می‌توان دید. بهترین موقعیت استوانه‌های کنترلی، موقعیت $X=0.08$ m است. در این فاصله، کانتور اندازه‌ی سرعت حالت متقارن دارد و توزیع فشار اطراف استوانه در کانتور فشار نیز متقارن بوده که همین امر نشانه‌ی عملکرد مطلوب استوانه‌های کنترلی و خنثی‌سازی ریزش نوسانی گردابه‌ها است. در حالی که اگر کنترل کننده‌ها در فواصل بیشتر از آن و حتی کمتر از آن قرار گیرند، نوسان گردابه‌ها روی استوانه شکل می‌گیرند. شایان ذکر است جهت بررسی اثر کنترل کننده‌ها بر نوسانات حاصل از اثر جریان سیال روی استوانه‌ی اصلی و اثر تخریبی آن‌ها، نوسانات پایین دست جریان دارای اهمیت نیستند بلکه نوساناتی که روی بدنه‌ی استوانه‌ی اصلی رخ می‌دهند دارای اهمیت هستند.

۳-۴- تفسیر نمودارهای خطوط جریان

در شکل ۹ تصاویر خطوط جریان در حالت بدون کنترل کننده و با کنترل کننده، برای فواصل $(X=0.028$ m، $X=0.08$ m، $X=0.1$ m و $X=0.137$ m) در ثانیه‌ی ۱۴ام نشان داده شده است. مطابق شکل در قسمت (ت) متقارن بودن خطوط جریان قابل رؤیت است. دو جفت گردابه‌ی متقارن شکل گرفته و ریزش گردابه‌ها به‌طور کامل خنثی شده است. هرچه فاصله‌ی کنترل کننده‌ها از استوانه‌ی اصلی بیشتر شده، خیابان گردابه‌های فون کارمن کامل‌تر شکل گرفته است. نزدیک‌تر شدن کنترل کننده‌ها از فاصله‌ی $X=0.08$ m، نتیجه‌ای نامطلوب داشته و کش و قوس گردابه‌ها مجدد ایجاد



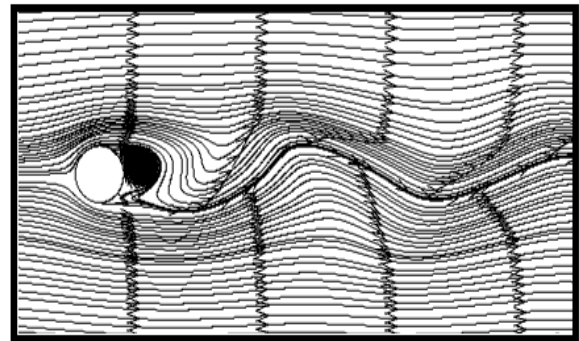
ث) کنترل کننده در $X=0,0028\text{ m}$

شکل (۹): تصاویر خطوط جریان در ثانیه‌ی ۱۴ام در موقعیت‌های مختلف کنترل کننده

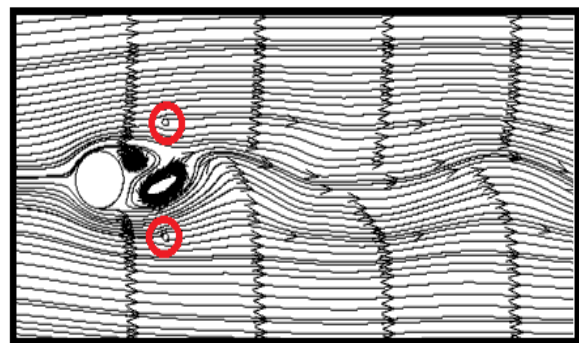
۴-۴- تفسیر نمودار ضریب پسا

در مسائل جریان اطراف استوانه، نیروی پسا تأثیر به سزایی نسبت به نیروی برآ دارد و تنش برشی وارد بر بدنه‌ی استوانه، ناشی از نیروی پسا و گرادیان فشار است. دانستن تأثیر موقعیت استوانه‌های کنترلی در نوسانات ضریب پسا، اهمیت قابل توجهی دارد. شکل ۱۰ نمودار نوسان ضریب پسا بر روی استوانه‌ی اصلی، برحسب زمان برای فواصل مختلف کنترل کننده‌ها است. برای حفظ وضوح خطوط نمودار، در شکل ۱۱ این نمودار برای حالت با کنترل کننده در سه فاصله‌ی بدون کنترل کننده ترسیم شده است. بدین ترتیب، به سهولت می‌توان خطوط نمودار نوسانی ضریب پسا را از یکدیگر تمیز داد. لازم به ذکر است نتایجی که قابلیت تفسیر دارند مربوط به زمان‌هایی است که مقدار ضریب پسا به حالت شبه پایا رسیده است و حول یک مقدار متوسط نوسان می‌کند؛ که در تمام موارد در ثانیه ۱۴ام این حالت رخ داده است.

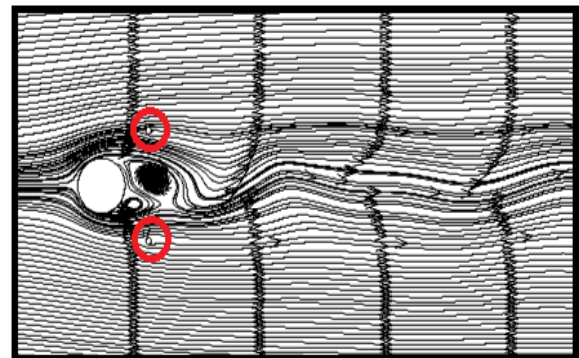
شده و خطوط جریان نامتقارن می‌شود، یعنی فاصله‌ی m حدوداً $0,008$ فاصله‌ای بهینه است.



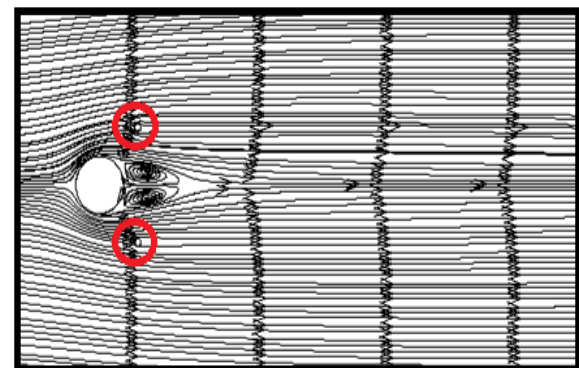
الف) حالت بدون کنترل کننده



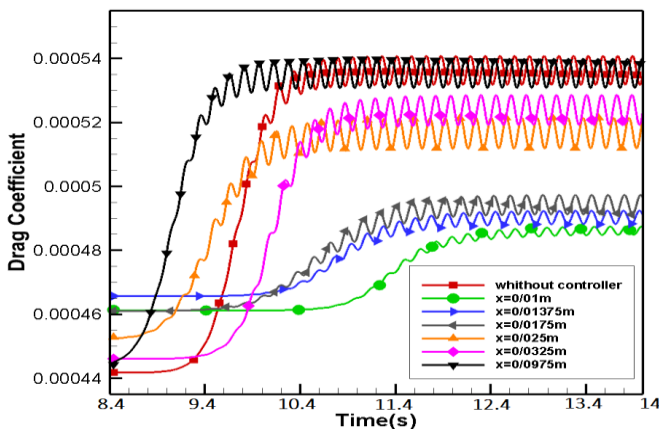
ب) کنترل کننده در $X=0,0137\text{ m}$



پ) کنترل کننده در $X=0,01\text{ m}$



ت) کنترل کننده در $X=0,008\text{ m}$



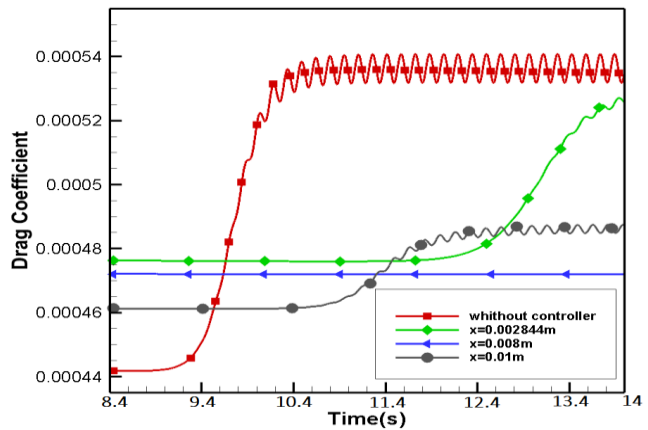
شکل (۱۰): نمودار ضریب پسا از ثانیه‌ی ۸,۴ تا ثانیه‌ی ۱۴ در موقعیت‌های مختلف کنترل کننده

کنترل‌کننده‌ها ثابت بوده و نیازی به استفاده از منبع انرژی ندارد و در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌شود. همچنین میزان ضریب پسا در فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$ نسبت به حالت بدون کنترل‌کننده، به میزان $11,42\%$ کاهش یافته که در مقایسه با کار ایمرن و همکاران [۲۰]، این مقدار کمتر است. البته علت اختلاف این است که آن‌ها از سه کنترل‌کننده‌ی جریان در پژوهش خود استفاده کرده‌اند که به علت هزینه‌بر بودن، به‌صرفه نیست. دامنه‌ی نوسان ضریب پسا در فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$ نسبت به حالت بدون کنترل‌کننده، کاملاً از بین رفته است در حالی که در کار هان و همکاران [۲۱] با استفاده از یک استوانه‌ی گوه‌ای شکل در بالادست برای رینولدز 200 ، هنوز 40% از دامنه نوسانی باقی مانده است. با بررسی نتایج می‌توان عنوان کرد که استفاده از دو استوانه‌ی کنترلی دایروی در فاصله مذکور، نسبت به موارد استفاده‌شده در پژوهش‌های دیگر، ارجحیت داشته و این روش کاملاً مناسب است و توصیه می‌شود.

۴-۵- تفسیر نمودار پروفیل سرعت و لایه مرزی بر روی استوانه نمودار پروفیل‌های سرعت و لایه مرزی ایجادشده بر روی استوانه‌ی اصلی بدون حضور کنترل‌کننده مطابق نتایج شبیه‌سازی کار حاضر در شکل ۱۲ قابل رؤیت است. پروفیل‌های سرعت بر روی قوس استوانه‌ی، در 5 مقطع عمود بر سطح استوانه، با زوایای 30° ، 60° ، 90° ، 131° و 145° ترسیم شده است. زاویه‌ی 131° ، زاویه‌ای است که جدایش جریان آغاز و گردان سرعت در راستای عمود بر سطح استوانه صفر شده است.

نمودار پروفیل‌های سرعت و لایه مرزی در حالت همراه با کنترل‌کننده در فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$ در شکل ۱۳ دیده می‌شود. پروفیل‌های سرعت در 5 مقطع با زوایای 30° ، 60° ، 90° ، 135° و 145° ترسیم شده است. زاویه‌ی 135° ، زاویه‌ای است که جدایش جریان آغاز شده است. لبه لایه مرزی با ضخامت δ ، در راستای عمود بر سطح و با نشانه خط و دونقطه مشخص شده است

با مقایسه‌ی شکل ۱۲ و ۱۳ ملاحظه می‌شود که در زاویه‌ی 145° ، ضخامت لایه مرزی در حالت بدون کنترل‌کننده بیشتر از حالتی است که کنترل‌کننده‌ها در فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$ از استوانه‌ی اصلی قرار دارند و زاویه‌ی جدایش در هر دو شکل گویای این است که جدایش جریان در حضور کنترل‌کننده‌ها نسبت به استوانه‌ی تنها، به تعویق افتاده است که همین امر

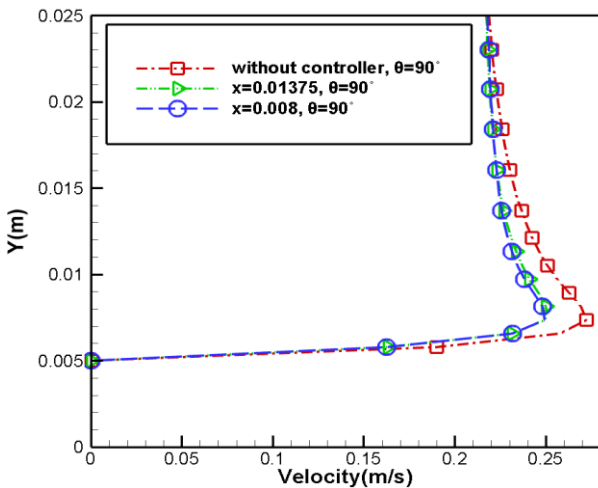


شکل (۱۱): نمودار ضریب پسا از ثانیه‌ی ۸,۴ تا ثانیه‌ی ۱۴ در موقعیت‌های مختلف کنترل‌کننده

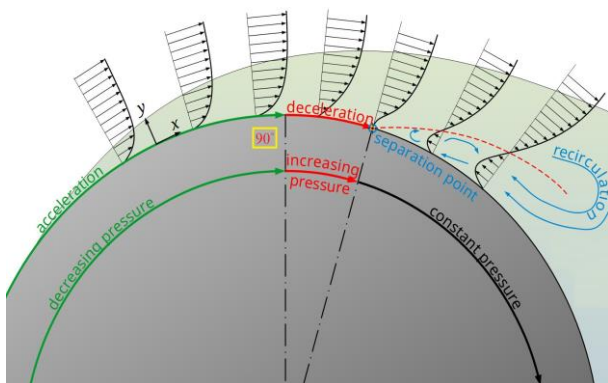
در شکل ۱۰، مقادیر شبه‌پایا شده‌ی نمودار ضریب پسا در حالت بدون کنترل‌کننده و حالتی که استوانه‌های کنترلی در $X=0,0975\text{ m}$ قرار دارند، تقریباً مشابه می‌باشند. در $X=0,0325\text{ m}$ ، تا ثانیه‌ی ۱۰، جریان سیال حالت منظم و پایداری نیافته است. در این فاصله، تا ثانیه‌ی ۱۰، گردابه‌ها در حال رشد بوده و شروع شکل‌گیری خیابان گردابه‌ای رخ داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس‌از آنکه نمودار شبه‌پایا شده است، هرچه کنترل‌کننده نزدیک‌تر شده، مقدار متوسط ضریب پسا نیز کاهش یافته است و در فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$ مقدار متوسط ضریب پسا کمتر از بقیه‌ی حالات است. برای فاصله‌ی کمتر از این مقدار، ضریب پسا افزایش یافته است.

نکته‌ی مهم دیگر این است که وقتی کنترل‌کننده‌های جریان از فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$ ، به استوانه‌ی اصلی نزدیک‌تر می‌شوند؛ نمودار نوسان ضریب پسا، مشابه نمودار در حالت بدون کنترل‌کننده می‌شود و عملاً اثر آن‌ها بر ضریب پسا از بین می‌رود. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در حالتی که فاصله‌ی استوانه‌های کنترلی از مرکز استوانه‌ی اصلی $0,008\text{ m}$ است، نوسان ضریب پسا صفر است. به‌وضوح قابل مشاهده است که بهترین مکان قرارگیری کنترل‌کننده‌ها، فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$ است که معادل $X/D=0,8$ می‌باشد. در مقایسه با کار گودرزی [۱] که فاصله‌ی فوق با توجه به زاویه‌ی 45° درجه‌ی کنترل‌کننده‌ها، $X/D=0,78$ به دست آمده است؛ اگر چه مقدار به‌دست‌آمده در کار حاضر نزدیک به مقدار مذکور است، اما کنترل‌کننده‌ی ثابت، در فاصله‌ی کمی دورتر موفق به توقف ریزش گردابه‌ها شده است. علت اختلاف می‌تواند، چرخان بودن کنترل‌کننده‌ها در کار [۱] باشد. پژوهش مذکور برای کنترل‌کننده‌های دوار که با عامل تحریک خارجی دوران می‌کنند به دست آمده ولی در پژوهش حاضر

جهت دقت نظر بیشتر روی پروفیل سرعت، نمودار پروفیل سرعت جریان روی استوانه‌ی اصلی در ۳ حالت در زاویه‌ی ۹۰° در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. در $Y=0,005\text{ m}$ که نقطه‌ی تماس سیال با سطح بالایی استوانه است، به دلیل شرط عدم لغزش بر دیواره، سرعت صفر است. شکل ۱۵ تصویر مرسوم و شماتیک نمودار پروفیل‌های سرعت بر روی استوانه، در منابع سیالاتی است. نمودار پروفیل سرعت محاسبه‌شده، با تصاویر شماتیک مانند شکل ۱۵ متفاوت است. مطابق نمودار در نزدیکی دیواره‌ی استوانه، جریان سیال در بخشی از پروفیل سرعت در نزدیکی لایه مرزی، سرعتی بیشتر از سرعت جریان آزاد می‌گیرد و یک روند کاملاً یکنوا ندارد که پدیده‌ی جالب توجه‌ی است. این پدیده می‌تواند برای حفظ پیوستگی دبی جرمی و ناشی از عکس‌العمل به حضور مانع (استوانه) باشد. مقدار بیشینه این ناحیه با استفاده از کنترلر کاهش یافته است. وجود این قله در مقاطع دیگر نیز وجود دارد.



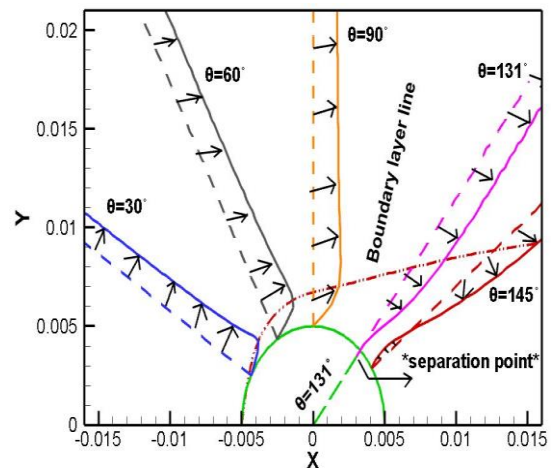
شکل (۱۴): نمودار پروفیل سرعت روی استوانه در زاویه‌ی ۹۰° و در ۳ حالت مختلف



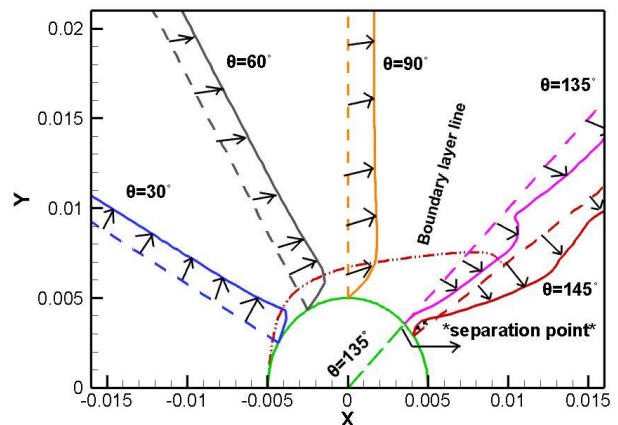
شکل (۱۵): تصویر شماتیک و مرسوم نمودار پروفیل‌های سرعت بر روی استوانه در منابع سیالاتی [۲۲]

سبب کوچک شدن ناحیه‌ی دنباله و توقف ریزش گردابه‌ها می‌شود.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، در زاویه ۱۴۵° که در ناحیه جدایش قرار دارد، بردارهای سرعت بازچرخشی کاملاً مشخص است. در این شکل‌ها بردارهای سرعت با علامت پیکان و با جهت‌گیری تقریبی ترسیم شده‌اند. برای تشخیص لبه لایه مرزی، از مکان مرتبط با مقدار سرعت برابر 0.99 سرعت جریان آزاد استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت لایه مرزی از محل تلاقی جریان با استوانه، شروع به رشد کرده و پس از جدایش دارای نرخ رشد مضاعفی می‌شود. مطابق شکل ۱۳ به علت وجود کنترل‌کننده، رشد لایه مرزی پس از جدایش، نسبت به حالت فاقد کنترل‌کننده، کمتر است. شایان ذکر است، فرورفتگی پروفیل سرعت در شکل ۱۳ در بیرون از لایه مرزی در مقطع شروع جدایش، ناشی از وجود کنترلر در آن مکان است.



شکل (۱۲): نمودار پروفیل‌های سرعت و لایه مرزی بر روی استوانه‌ی بدون کنترل‌کننده



شکل (۱۳): نمودار پروفیل‌های سرعت و لایه مرزی بر روی استوانه‌ی با کنترل‌کننده در فاصله‌ی $X=0,008\text{ m}$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر استوانه‌های کنترلی در کنترل جریان اطراف استوانه‌ای اصلی در رینولدز ۱۴۰ بررسی شده است. در جریان سیال، پس از عبور از استوانه‌ی اصلی، گردابه‌هایی به وجود می‌آیند و ریزش گردابه‌ها اتفاق می‌افتد که باعث پدیده‌ی خستگی در اثر بارگذاری و تنش‌های نوسانی وارد بر سازه می‌شود. نتایج زیر از کار حاضر حاصل شد.

۱- استوانه‌های کنترلی، جدایش جریان از سطح استوانه‌ی اصلی را به تعویق انداخته و سبب کاهش گردابه‌ها، تضعیف پدیده‌ی ریزش گردابه‌ها و کاهش ضریب پسا می‌شوند.

۲- با بررسی‌های صورت گرفته از کانتورهای اندازه‌ی سرعت، فشار و خطوط جریان استنباط می‌شود که توقف ریزش گردابه‌ها به‌واسطه‌ی جای‌گیری استوانه‌های کنترلی در فاصله‌ی خاصی از استوانه‌ی اصلی صورت می‌پذیرند. از یافته‌های این پژوهش می‌توان به بهترین فاصله برای جای‌گیری استوانه‌های کنترلی نسبت به استوانه‌ی اصلی اشاره کرد. این فاصله را می‌توان تحت عنوان فاصله‌ی طلایی نام برد. این فاصله‌ی بهینه به‌عنوان پارامتر طول برای طراحی مطرح می‌شود. در این فاصله ریزش گردابه‌ها خنثی شده و خطوط جریان کاملاً متقارن می‌باشند. رفع پدیده‌ی خستگی، با جای‌گیری استوانه‌های کنترلی در $X=0,008m$ که همان فاصله‌ی بهینه است، محقق گردیده است. این فاصله معادل ۰,۸ قطر استوانه‌ی اصلی است؛ لذا جای‌گیری کنترل‌کننده‌ها با فاصله‌ی به اندازه‌ی ۰,۸ قطر استوانه‌ی اصلی از مرکز آن، با فرض ثابت نگهداشتن اعداد بی‌بعد مهم در این نوع مسائل جهت برقراری اصل تشابه، می‌تواند به‌عنوان فاصله‌ی بهینه جهت ابعاد دیگر استوانه معرفی شود. فاصله‌ی بهینه‌ی یافته‌شده در کار حاضر، اختلاف کمی با نتیجه‌ی پژوهش گودرزی [۱] دارد.

۳- نمودار پروفیل سرعت در مقاطع مختلف و لایه مرزی حاکی از نقش کنترل‌ر در تعویق جدایش است.

مطابق نمودار پروفیل سرعت، این پروفیل یکنوا نبوده و نشان از ایجاد یک مقدار بیشینه در نزدیکی لایه مرزی دارد. این پدیده می‌تواند برای حفظ پیوستگی دبی جرمی و ناشی از عکس‌العمل به حضور مانع (استوانه) باشد. مقدار قله با حضور کنترل‌ر کاهش یافته است. در انتها به‌عنوان پیشنهاد، پژوهش پیرامون نصب این کنترل‌کننده‌ها با فاصله‌ی مناسب، در استوانه‌های بکار رفته در جریاناتی مانند ستون‌های مستقر در آب، می‌تواند در دستور کار پژوهشگران حوزه‌ی کنترل جریان قرار گیرد.

۶- مراجع

1. Goodarzi, M., and Khalili Dehkordi, E. "Numerical Study on Laminar Flow Over a Cylinder and Its Rotating Controllers for Suppressing the Vortex Shedding", AUT J. Mech. Eng. Vol. 50, No. 4, pp. 849-862, 2018, (In Persian).
2. Newman, J. N. "Marine Hydrodynamics", The MIT Press, USA, 1999.
3. Asyikin, M. T. "CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure", MSc thesis, Institutt for bygg, anlegg og transport, 2012.
4. Blevins, R. D. "Flow-Induced Vibrations", 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, United States, 1990.
5. Barzegar Rahimi, M., Amanifard, N., and Samaei, L. "Numerical Study of Flow Control Around Circular Cylinder by Using Two Other Control Cylinders"; 19th Proc. Int. Conf. Fluid Dynamics, Tehran, Iran, 2021, (In Persian).
6. Kuo, C. H., Chiou, L. C., and Chen, C. C. "Wake Flow Pattern Modified by Small Control Cylinders at Low Reynolds Number", J. Fluids Struct. Vol 23, No. 6, pp. 938-956, 2007.
7. Darekar, R. M., and Sherwin, S. J. "Flow Past a Bluff Body With a Wavy Stagnation Face", J. Fluids Struct. Vol. 15, No. 3-4, pp. 587-596, 2001.
8. Rashidi, S., Hayadavoodi, M., and Esfahani, J. A. "Vortex Shedding Suppression and Wake Control: a Review", J. OCEAN ENG. Vol. 126, pp. 57-80, 2016.
9. Meneghini, J. R., Saltara, F., Siqueira, C. L. R., and Ferrari, J. A. "Numerical Simulation of Flow Interference between Two Circular Cylinders in Tandem and Side-By-Side Arrangements", J. Fluids Struct. Vol 15, No. 2, pp. 327-350, 2001.
10. Wang, Y. T., Yan, Z. M., and Wang, H. M. "Numerical simulation of low-Reynolds number flows past two tandem cylinders of different diameters", J. Water Sci. Eng. Vol. 6, No. 4, pp. 433-445, 2013.
11. Williamson, C. H. K. "Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in The Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers", J. Fluid Mech. Vol. 206, pp. 579-627, 1989.
12. Badr, H. M., Coutanceau, M., Dennis, S. C. R., and Menard, C. "Unsteady Flow Past a Rotating Cylinder at Reynolds Numbers 103 and 104", J. Fluid Mech. Vol. 220, pp. 459-484, 1990.
13. Maurel, A., and Petitjeans, P. "Vortex Structure and Dynamics", Lectures of Workshop, Springer, Rouen, France, 1999.

- Virtual Moving Surface Boundary Layer Control”, J. Exp. Fluids. Vol. 60, pp. 1-15, 2019.
20. Imron, C., Hakam, A., Widodo, B., and Yuwono, T. Y. “Numerical Simulation of Fluid Flow Around Circular Cylinder and Three Passive Controls to Reduce Drag Coefficient at $Re= 500$ ”, IJCSAM. Vol. 6, No.1, pp. 13-17, 2020.
21. Han, X., Wang, J., Zhou, B., Zhang, G., and Tan, S. K. “Numerical simulation of flow control around a circular cylinder by installing a wedge-shaped device upstream”, J. Mar. Sci. Eng. Vol. 7, No. 12, pp. 422, 2019.
22. Tec-science. “Flow separation (boundary layer separation)”, <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/flow-separation-boundary-layer-separation/>.
14. Brocchini, M., and Trivellato, F. “Vorticity and Turbulence Effects in Fluid Structure Interaction”, WIT press, USA, 2006.
15. Drazin, P. G. “Introduction to Hydrodynamic Stability”, Cambridge University, England, 2002.
16. Blevins, R. D. “Flow Induced Vibration”, Krieger, USA, 2001.
17. Paidoussis, M. P. “Fluid Structure Interaction: Slender Structures and Axial Flow”, Vol. 1, Academic Press, USA, 1998.
18. Paidoussis, M. P. “Fluid Structure Interactions, Slender Structures and Axial Flow”, Vol. 2, Elsevier Academic Press, 2004.
19. Zhang, X., Choi, K. S., Huang, Y., and Li, H. X. “Flow Control Over a Circular Cylinder Using