



شبیه‌سازی عددی جریان حول یک استوانه غوطه‌ور در آشفتگی تولید شده توسط شبکه‌ای از سیلندره‌ای بالادست

ثاراله عباسی^{۱*}، محمدمتین آقاداتودی^۲

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، ایران.

^۲ کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

چکیده

در این مقاله هدف، بررسی اثر اغتشاشات جریان ورودی حول یک سیلندر دایره‌ای می‌باشد. به منظور ایجاد اغتشاش، شبکه‌ای از سیلندره‌ای دایروی در بالادست یک سیلندر دایره‌ای مدل‌سازی شد و اثر آن بر رفتار جریان بررسی گردیده است. شبیه‌سازی جریان به صورت دوبعدی و گذرا با استفاده از نرم‌افزار تجاری Fluent Ansys و با یکارگیری مدل توربولانسی $k-\omega$ -SST در رینولدز ۲۲۰۰۰ انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات دیگر مقایسه گردیده است که تطابق خوبی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در حالتی که فاصله سیلندره‌ای شبکه تا سیلندر اصلی 6D باشد، بیشترین میزان گردابه‌ها به سیلندر اصلی وارد می‌شود و اغتشاشات ایجاد شده حول سیلندر اصلی تا شدت آشفتگی ۰/۹ افزایش می‌یابد. بررسی ضریب پسا و ضریب برآ نشان می‌دهند که ضریب پسا در حالتی که فاصله سیلندره‌ای شبکه نسبت به سیلندر اصلی 6D است، ۷۶٪ کاهش می‌یابد و ضریب برآ حدود ۱۳ برابر افزایش می‌یابد. یافته‌ها که با داده‌های معیار اعتبارسنجی شده‌اند، پتانسیل آرایه‌های اغتشاش غیرفعال را برای کنترل جریان در کاربردهای بدنه‌ی ضخیم برجسته می‌کنند و بینش‌هایی در مورد کاهش نیروی پسا و کاهش ارتعاش ناشی از گردابه ارائه می‌دهند.

کلمات کلیدی: سیلندر دایره‌ای؛ شبیه‌سازی عددی؛ اغتشاشات جریان ورودی؛ گردابه؛ شدت آشفتگی.

Numerical simulation of flow around an immersed cylinder in turbulence generated by a network of upstream cylinders

Sarallah Abbasi^{1,*}, Mohammad Matin Aghadavodi²

¹ Assoc. Prof., Mech. Eng., Arak University of Technology, Arak, Iran.

² BSc. Student, Mech. Eng., Arak University of Technology, Arak, Iran.

Abstract

This study aims to investigate the effect of incoming flow turbulence around a circular cylinder. To generate turbulence, an array of upstream circular cylinders was modeled, and its influence on the flow behavior around the main cylinder was analyzed. The flow was simulated using a two-dimensional, transient approach with the commercial software ANSYS Fluent, employing the $k-\omega$ SST turbulence model at a Reynolds number of 22,000. For validation, the results of the present study were compared with those of previous research, showing good agreement. The findings indicate that when the distance between the turbulence-generating cylinders and the main cylinder is 6D, the highest level of vortex interaction occurs, increasing the turbulence intensity around the main cylinder up to 0.9. Evaluation of the drag and lift coefficients shows that the drag coefficient decreases by approximately 76%, and the lift coefficient increases by nearly 13 times compared to the base case. These validated results highlight the potential of passive turbulence-generating arrays for flow control in bluff body applications and offer insight into drag reduction and mitigation of vortex-induced vibrations.

Keywords: Circular cylinder; numerical simulation; inlet flow turbulence; vortex; turbulence intensity.

۱- مقدمه

جریان آشفته بطور گسترده، چه تجربی و چه عددی، برای چندین دهه مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی اغتشاشات جریان ورودی مطالعات صورت گرفته در این زمینه کافی نمی‌باشد. جریان آشفته روی یک استوانه رفتارهای بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهد، با این که جریان آشفته غیر قابل پیش بینی است از یک الگو خاص پیروی می‌کند. [۱-۴] در ادامه مروری از مطالعات حول این پیرامون ارائه شده‌است. بیرمن و همکاران تاثیر جریان آزاد آشفته بر جریان دینامیکی اطراف جسم صلب را بررسی کردند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که سه مکانیسم اساسی جریان شامل: انتقال سریع به آشفتگی، افزایش اختلاط یا گردابه‌ها و اعوجاج خود به خودی جریان آزاد آشفته در جریان وجود دارد. [۵]. نوربرگ مطالعاتی پیرامون افزایش آشفتگی انجام داد. او دریافت که افزایش آشفتگی موجب تشکیل گردابه در اطراف سیلندر دایره‌ای می‌شود. که موجب کاهش فشار و افزایش نوسانات می‌شود، این موارد به شرط افزایش تنش رینولدز در لایه‌های برشی ایجاد می‌شود [۶]. نوربرگ، مطالعات تجربی در مورد تاثیر عدد رینولدز و شدت آشفتگی در جریان حول سیلندر دایره‌ای ارائه کردند. آنها دریافتند که اغتشاش با شدت کم موجب افزایش نیروی فشار در جریان قبل از آشفتگی می‌شود، در صورتیکه برای جریان‌های آشفته عکس این اتفاق می‌افتد [۷]. نتیجه مطالعات ویلیامسون نشان می‌دهد که اگر سیلندر به صورت الاستیک نصب شده یا قابل انعطاف باشد، ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌تواند موجب آسیب به سازه به علت خستگی شود؛ زیرا که جریان ورودی سازه‌ها در یک محیط دریایی بسیار آشفته است. ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان ورودی با جریان یکنواخت بسیار متفاوت است [۸]. ویلیامسون و همکاران مروری در مورد ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها تهیه کردند، که در آن نتیجه گرفتند که انتقال گردابه‌ها باعث ایجاد حالت‌های ارتعاشی می‌شود و همچنین اهمیت جرم و میرایی و رابطه بین نیرو و گردابه را ارائه کردند. در نهایت حالت‌های گردابی را از مطالعات ارتعاش اجباری گردآوری کردند و دریافتند که برخی از آنها باعث ارتعاش آزاد می‌شوند [۹]. زاو و همکاران مطالعات عددی دو بعدی با استفاده از مدل توربولانسی $k-\omega$ بر روی سیلندر دایره‌ای شکل انجام دادند، با تجزیه و تحلیل ساختارهای جریان و توزیع سرعت دریافتند

که، ویژگی‌های رژیم‌های جریان به شدت با ریزش گرداب مرتبط است [۱۰]. اولیف و همکاران مطالعاتی بر روی شدت آشفتگی انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در شدت آشفتگی کم درک مطلوبی از اثر تلاطم بر دینامیک جریان وجود ندارد؛ آنها نتیجه گرفتند که مطالعات در شدت آشفتگی بالا باید انجام شود [۱۱]. سادوک و همکاران مطالعات تجربی بر روی سیلندر دایره‌ای انجام دادند، هدف اصلی بررسی اثرات شدت اغتشاشات جریان آزاد (Ti)، بر لایه برشی جداکننده بود. در تلاطم جریان آزاد به نظر می‌رسد که محتوای آشفتگی لایه برشی جداکننده را تقویت می‌کند و در نتیجه باعث تقویت و تسریع شکست گردابه‌های لایه برشی می‌شود. همچنین طول تشکیل گرداب بزرگ را کاهش می‌دهد، در نهایت مدلی توسعه داده شده است که نشان می‌دهد افزایش شدت آشفتگی جریان آزاد، از نظر کیفی، اثرات مشابهی بر روی لایه برشی جدا شده با افزایش رینولدز دارد [۱۲]. تامرو و کوآ مطالعات بر روی استوانه مربعی با گوشه‌های گرد انجام دادند. آنها اثرات برشی جریان ورودی بر استوانه مربعی را زمانیکه جریان به رینولدز بحرانی می‌رسد بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که جریان‌های برشی در دو رژیم جریان اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های آیرودینامیکی سیلندر دارند و به طور کلی اثرات برشی زمانی که رینولدز در ناحیه فوق بحرانی قرار دارد، کمتر است؛ همچنین نشان دادند که فشار میانگین و نوسانی در تمام جریان‌های ورودی یکسان است. علاوه بر این، جهت برآ میانگین در رینولدز فوق بحرانی با جهت برآ در رینولدز زیر بحرانی مخالف یکدیگر است [۱۳]. جی و همکاران به طور تجربی خصوصیات هیدرودینامیکی یک دسته لوله فولادی را تحت جریان نوسانی ناشی از حرکات کشتی را بررسی کردند. نتیجه نشان می‌دهد که شتاب محلی بر شتاب همرفتی جریان ورودی همبستگی قوی با نیروهای هیدرودینامیکی روی سیلندر دارد و رفتارهای پره‌ج و مرج ناشی از نیروی گردابه‌ها مشاهده شد. مطالعات عددی که در جریان ورودی بر روی یک سیلندر دایره‌ای انجام شد، مشخص کرد که آشفتگی جریان ورودی به طور قابل توجهی بر شدت آشفتگی جریان تاثیر می‌گذارد، علاوه بر این آنها دریافتند که جریان آشفته حول سیلندر بسیار پیچیده‌تر است [۱۴]. زو و همکاران، جریان‌های آشفته پشت دو استوانه مربعی کنار هم با نسبت شکاف متفاوت را با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) بررسی

اصلی به طور سیستماتیک مورد بررسی قرار نگرفته است. نوآوری پژوهش حاضر در تحلیل عددی اثر اغتشاش ورودی ایجاد شده توسط شبکه‌ای از سیلندرهای بالادست با فواصل مختلف بر رفتار جریان حول یک سیلندر منفرد، با استفاده از مدل توربولانسی $k-\omega$ SST در چارچوب جریان گذرای دوبعدی است. این مطالعه با تمرکز بر کمی‌سازی ضرایب پسا، برآ، زاویه جدایش، شدت گردابه‌ها و نوسانات فشار، در شرایط واقعی‌تر نسبت به جریان یکنواخت، بینش‌های تازه‌ای را در زمینه کنترل جریان و تحلیل پدیده‌های مرتبط با گردابه در اختیار می‌گذارد. نتایج این پژوهش از منظر مهندسی کاربرد گسترده‌ای دارند. در این مطالعه اثر اغتشاش ورودی تولید شده توسط شبکه‌ای از سیلندرهای بالادست با فواصل مختلف بر رفتار جریان حول یک سیلندر منفرد بررسی شده است. این نوع شرایط جریان، بازتابی از محیط‌های واقعی مانند بستر دریاها، تونل‌های باد صنعتی، یا نواحی پشت موانع شهری است که در آن‌ها جریان به صورت طبیعی دارای اغتشاشات شدید و سازمان‌نیافته است. یافته‌های عددی این تحقیق می‌توانند در طراحی و تحلیل دقیق سازه‌هایی مانند خطوط لوله دریایی، پایه‌های سکوه‌ای فراساحلی، یا برج‌های بلند در معرض باد غیر یکنواخت مورد استفاده قرار گیرند. همچنین از منظر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، داده‌های حاصل از این پژوهش برای توسعه یا کالیبراسیون مدل‌های توربولانسی و تحلیل رفتار جریان در حضور موانع بالادست بسیار مفید خواهند بود. افزون بر این، نتایج به دست آمده می‌توانند مبنایی برای توسعه راهکارهای کنترل جریان و کاهش نیروهای هیدرودینامیکی در طراحی اجسام صلب باشند.

۲- روش حل عددی

در این پژوهش شبیه‌سازی جریان ناپایای دوبعدی اطراف سیلندر با استفاده از روش حجم کنترل و حل گر-Pressure Based در نرم‌افزار ANSYS Fluent انجام شده است. مدل آشفتگی $k-\omega$ -SST برای تخمین دقیق ویسکوزیته گردابی استفاده شده است. پایداری، صرفه‌جویی و دقت مناسب برای طیف وسیعی از جریان‌های آشفته، محبوبیت آن را در شبیه سازی انتقال حرارت و جریان آشفته در صنعت تایید می‌کند [۲۰، ۲۱]. بدر مرز ورودی، جریان یکنواخت با سرعت ۲۲ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

کردند. آنها دریافتند که رژیم جریان آشفته بسته به قدرت جریان به دو دسته تقسیم می‌شود و آنها را رژیم جریان شکاف ضعیف و رژیم جریان شکاف قوی نامیدند، همچنین دریافتند که تنها در جریان شکاف قوی می‌توان نوسانات سرعت را شناسایی کرد [۱۵]. زو و تاوو در شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) دو نوع چیدمان مختلف حالت اول یک نوع معمولی پرکاربرد و حالت دوم یک چیدمان چند مقیاسی با فاصله‌های متغیر استوانه‌های شبکه را بررسی کردند. آنها دریافتند که افت فشار در هر دو حالت تقریباً یکسان است و در حالت دوم یا چند مقیاسی جریان در پایین دست آشفته‌تر است و در حالت اول جریان در پایین دست تقریباً یکنواخت است [۱۶]. زانگ و همکاران مطالعات عددی برای شناسایی نیروها و ضرایب ناشی از گردابه‌ها انجام دادند، علاوه بر این، در جریان‌های آشفته ضرایب نیروی ناشی از گرداب با افزایش سرعت مشهودتر است. این رفتار به تصادفی بودن سرعت و جفت شدن آن با ارتعاشات خارج از صفحه نسبت داده می‌شود [۱۷]. چندران و همکاران مطالعاتی روی تجزیه و تحلیل عددی ضریب پسا اجسام ضخیم سه‌بعدی مانند صفحات تخت، استوانه، منشور مثلثی، پروفیل‌های نیم‌دایره را در مسیر جریان لوله انجام دادند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت جسم ضریب پسا کاهش می‌یابد. باصرف نظر از هندسه و طول، نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در تخمین مقادیر ضریب پسا متفاوت هستند؛ همچنین به این نتیجه رسیدند که طول بدنه صلب در یک مجرای محدود تأثیر قابل توجهی بر ضریب پسا آن دارد [۱۸]. سانگ و همکاران شبیه‌سازی‌های عددی مستقیم (DNS) سه‌بعدی را برای بررسی تأثیر اغتشاش ورودی بر دینامیک جریان پشت یک استوانه اصلی در عدد رینولدز ۳۹۰۰ انجام دادند که به وسیله‌ی سیلندرهای شبکه آشفتگی ورودی ایجاد می‌شود. نتایج مطالعات آنها در مقایسه با جریان ورودی یکنواخت، نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از تلاطم ورودی به طور قابل توجهی بزرگ‌تر است. ضریب پسا میانگین زمانی ۴/۲۹٪ افزایش می‌یابد و شگفت‌آورتر از ضریب پسا، ضریب برآ تا ۵۰۰٪ افزایش می‌یابد [۱۹].

با وجود مطالعات انجام‌شده پیرامون جریان حول سیلندرهای منفرد یا آرایه‌ای، تأثیر ساختار اغتشاش ورودی ناشی از هندسه‌های بالادست بر رفتار آیرودینامیکی سیلندر

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho u^2 A \quad (۴)$$

در روابط فوق ρ , C_L , C_d به ترتیب ضریب پسا، ضریب برا و چگالی سیال است. u سرعت جریان در جهت راستای جریان را نشان می‌دهند.

۴- شرایط مرزی

هندسه شبیه‌سازی شده، شامل ۲۰ سیلندر صلب در بالا دست و یک سیلندر صلب در پایین دست است. مطابق شکل ۱، در حالت مرجع فاصله سیلندرها بالادست تا سیلندر تک به اندازه 9D است و سایر مدل‌ها نسبت به حالت مرجع بررسی شده‌اند [۱۹]. در شکل ۱ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی آورده شده است. ابعاد در شکل بر مبنای D بی‌بعد گردیده‌اند. هشت موقعیت مکانی $Y/D=0,2,3,6$ و $X/D=-2,-5,-6,-7$ که در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند، جهت ترسیم سرعت جریان در راستای جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۵- استقلال از شبکه

به منظور تخمین درست گرادین‌های شدید در میان جریان حول سیلندرها، شبکه بندی جریان بسیار مهم است تا از بروز جهش‌های احتمالی در پارامترهای جریان جلوگیری شود. شکل ۲ یک نمای باز از نحوه شبکه‌بندی میدان جریان و شکل ۳ نمایی بزرگنمایی حول سیلندر اصلی را نشان می‌دهد. مشخص است که با نزدیک شدن به بدنه سیلندرها، شبکه بندی به صورت سازمان یافته و ریزتر نشان گردیده است. مربع متحدالمرکز بزرگ شده اطراف استوانه دایره‌ای با ۲۴۰ گره گسسته شده است و شبکه در جهت شعاعی در نزدیکی سطح استوانه متراکم‌تر شده است. به منظور بهره‌گیری مناسب از مدل توربولانسی و تخمین مناسب میدان جریان در نزدیکی دیوار مقادیر y^+ از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در شبیه سازی حاضر شبکه‌بندی به نحوی انجام شده است که مقدار وای پلاس در نزدیکی دیواره کمتر از ۱ گردیده است (شکل ۴).

در مرزهای بالا و پایین شرط مرزی دیواره (شرط عدم لغزش) اعمال گردیده است. در مرز خروجی جریان، فشار استاتیک خروجی صفر لحاظ گردیده است. برای کوپل فشار و سرعت، الگوریتم SIMPLE به کار گرفته شده و گسسته‌سازی مکانی معادلات مومنوم، انرژی جنبشی آشفتنی و اتلاف انرژی به ترتیب با روش Second Order Upwind و گسسته‌سازی زمانی به صورت Second Order Implicit صورت گرفته است. در گسسته‌سازی معادله فشار نیز از روش PRESTO استفاده شده است. شبیه‌سازی با گام زمانی ۰,۰۰۰۱ ثانیه انجام شده و در هر گام زمانی، ۳۰ تکرار داخلی جهت دستیابی به همگرایی صورت گرفته است. زمان کل شبیه‌سازی ۰/۵ ثانیه است. شرط همگرایی در کلیه معادلات حاکم، رسیدن باقیمانده‌ها به مقادیر کمتر از 10^{-5} است. شبکه‌بندی دامنه نیز با سه چگالی مختلف انجام و تحلیل استقلال از مش صورت پذیرفته است. روند شبیه‌سازی تا رسیدن به یک الگوی پایدار جریان و استخراج کمی ضرایب آیرودینامیکی ادامه یافته و سپس با داده‌های تجربی معتبر اعتبارسنجی شده است.

۳- معادلات حاکم

در تحلیل جریان معادلات حاکم اعم از معادلات پیوستگی و مومنوم که به صورت زیر می‌باشند، استفاده شده است.

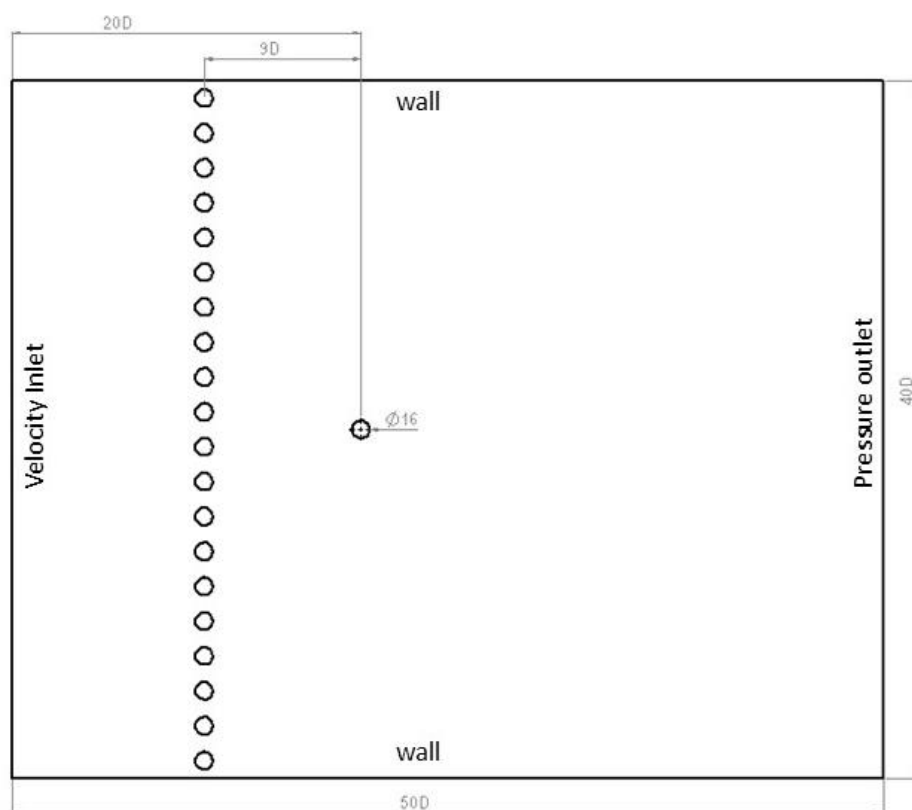
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j - \overline{u_i' u_j'}) \quad (۲)$$

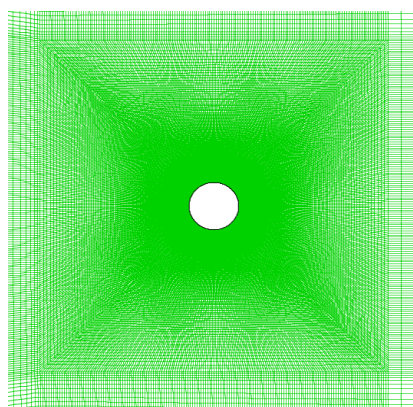
در روابط فوق ρ, u, P به ترتیب فشار استاتیک، سرعت و چگالی سیال است. X_i و X_j جهت جریان و جهت عمود بر جریان را نشان می‌دهند. u_i و u_j مولفه‌های سرعت و $\overline{u_i' u_j'}$ تنش رینولدز می‌باشند.

نیروهای پسا و برا از روابط زیر محاسبه شده است.

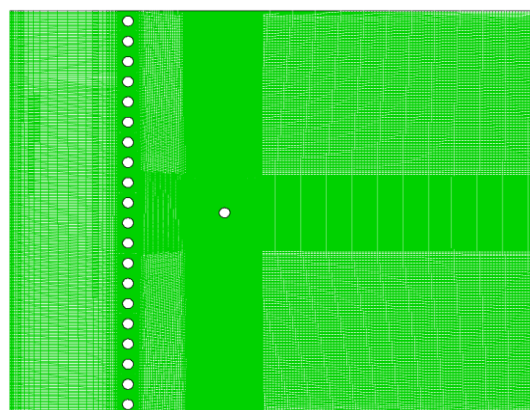
$$D = \frac{1}{2} C_d \rho u^2 A \quad (۳)$$



شکل ۱- مشخصات هندسه و شرایط مرزی مسئله

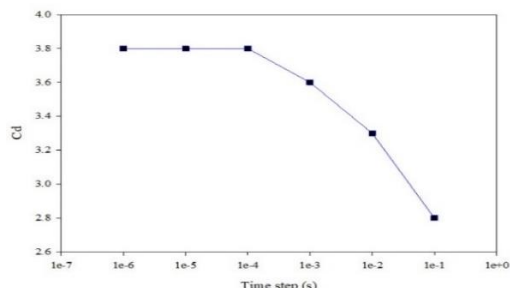


شکل ۳- شبکه بندی اطراف سیلندر اصلی



شکل ۲- شبکه بندی کل هندسه

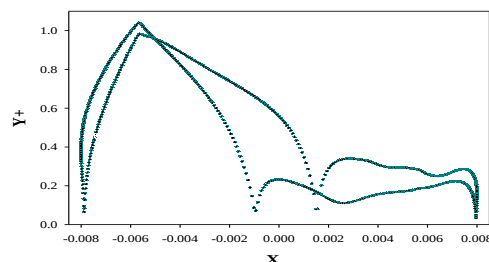
انتخاب شد، چراکه دقت کافی را با هزینه محاسباتی معقول ترکیب می‌کند.



شکل ۶- استقلال از گام زمانی در گام‌های زمانی مختلف

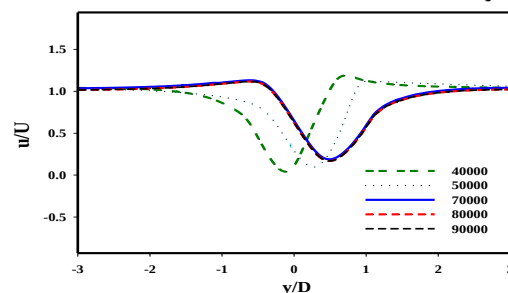
به منظور اعتبارسنجی نتایج، در شکل ۶ و شکل ۷ ضرایب سرعت و فشار حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج مطالعات تجربی مقایسه شده‌است. مقایسه پروفیل‌های سرعت و فشار نیز نشان می‌دهد که نتایج حاصله مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.

علت اصلی اختلاف مشاهده‌شده در شکل ۷ بین نتایج عددی و داده‌های تجربی، به ماهیت دوبعدی شبیه‌سازی عددی برمی‌گردد. در حالی که نتایج تجربی به‌طور طبیعی اثرات سه بعدی، نوسانات عرضی و تداخل گردابه‌ها را در خود دارند، در مدل عددی حاضر این پدیده‌ها به دلیل فرض دوبعدی بودن لحاظ نشده‌اند؛ همچنین وجود نویز آزمایشگاهی و اغتشاشات محیطی در نتایج تجربی می‌تواند موجب افزایش اختلاف شود. از سوی دیگر، اگرچه مدل $k-\omega$ SST برای بسیاری از جریان‌های نزدیک دیواره عملکرد خوبی دارد، اما در جریان‌های متغیر و دارای ناپایداری گردابه‌ای، ممکن است دقت آن نسبت به مدل‌های پرهزینه‌تری همچون LES محدودتر باشد. با این حال، رفتار کلی ضریب پسا در گام‌های زمانی مختلف، همگرایی مناسب را نشان می‌دهد و اختلاف مشاهده‌شده در محدوده قابل قبول مطالعات دوبعدی قرار دارد.



شکل ۴- مقادیر y^+ روی سیلندر اصلی

به منظور بررسی صحت شبکه‌بندی و استقلال نتایج حاصله از تعداد شبکه، شبیه‌سازی جریان در چند شبکه مختلف ۴۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۷۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۹۰۰۰۰ انجام شده‌است. در شکل ۵، نمودار سرعت طولی بی‌بعدشده برای تعداد سلول‌های مختلف نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که افزایش تعداد سلول‌ها از ۴۰۰۰۰ به ۸۰۰۰۰ باعث تغییرات قابل توجهی در سطح فشار صوتی می‌شود. در حالی که با تغییر تعداد سلول‌ها از ۸۰۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ تغییر قابل توجهی در نتایج مشاهده نمی‌شود. بر این اساس، تعداد ۸۰۰۰۰ سلول برای شبیه‌سازی حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌است. لازم بذکر است که تغییر اندک موقعیت پروفیل‌های سرعت در راستای x ناشی از افزایش دقت در تعریف هندسه و مش‌بندی اطراف سیلندر بوده و بر اساس مقایسه در موقعیت‌های مرجع، رفتار جریان به‌طور پایدار همگرا شده‌است.



شکل ۵- نتایج استقلال از شبکه پروفیل سرعت روی سطح سیلندر اصلی در $(x/D = 2)$

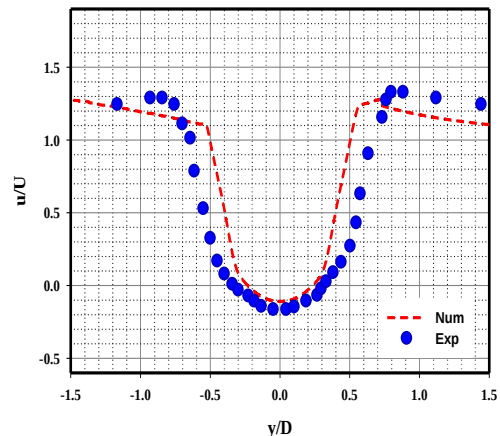
۶- اعتبارسنجی

برای بررسی اثر گام زمانی بر دقت حل ناپایا، ضریب پسا در چند مقدار مختلف گام زمانی محاسبه و مقایسه شد. نتایج در شکل ۶ نشان می‌دهد که با کاهش گام زمانی تا مقدار ۰/۰۰۱ ثانیه، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار C_d مشاهده نمی‌شود. بر این اساس، گام زمانی مذکور برای ادامه تحلیل‌ها

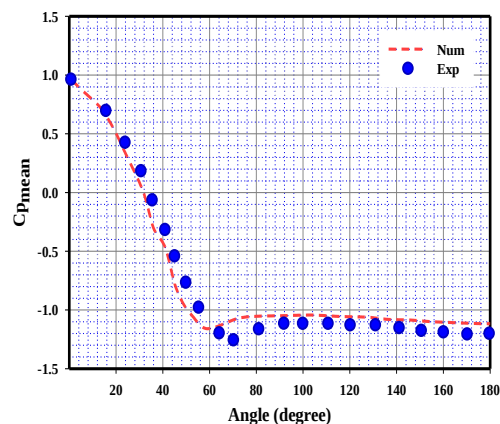
سیلندر شبکه با آرایش و فواصل مساوی در کنار یکدیگر استفاده شده است؛ همچنین اثر فاصله شبکه سیلندرها از سیلندر اصلی در چهار حالت کلی بررسی شده است. در یک حالت، سیلندر اصلی بدون سیلندره‌های شبکه ($T=0$) و سه حالت دیگر با وجود سیلندره‌های بالادست در فواصل مختلف یعنی $T=6D$ و $T=9D$ و $T=12D$ که T فاصله سیلندره‌های شبکه تا سیلندر اصلی را نشان می‌دهد.

پروفیل‌های سرعت متوسط در امتداد جهت جریان و در فواصل عمودی مختلف (یعنی Y/D های مختلف) در شکل ۹ نشان داده شده است. انحراف توزیع‌های سرعت در امتداد $Y/D=2$ در اطراف $X/D=0$ نشان‌دهنده محل قرارگیری سیلندر اصلی است. پروفیل‌های سرعت در امتداد خط شکاف یک رفتار جت مانند با مقدار قابل توجهی به اندازه تقریباً ۲ در محل قرارگیری سیلندره‌های شبکه نشان می‌دهند و به دنبال آن یک کاهش یکنواخت بیشتر در پایین دست بعد از سیلندره‌های شبکه وجود دارد، که نشان‌دهنده میرا بودن جریان است. توزیع سرعت در امتداد خط مرکزی آشفتگی در $Y/D=0$ (شکل ۹ الف) ابتدا به صفر و سپس به منفی می‌رسد، این تغییر ناشی از ایجاد جریان گردابه‌ای در پشت سیلندر اصلی است و پس از دور شدن از سیلندر اصلی به مقدار U_{∞} باز می‌گردد. پروفیل سرعت در امتداد خط $Y/D=0$ نشان می‌دهد که سرعت جریان در موقعیتی که سیلندر اصلی در آن قرار دارد به دلیل شرایط مرزی بدون لغزش به صفر می‌رسد.

پروفیل‌های سرعت طولی متوسط در صفحات عمود بر جریان اصلی (یعنی جهت Y) در موقعیت‌های طولی مختلف ($X/D=-2, -5, -6, -7$) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این مکان‌ها بالا دست سیلندر اصلی قرار دارند و در شکل ترسیم شده‌اند. شکل ۹ نشان می‌دهد که در $X/D=-2$ میانگین سرعت جریان سیال در اطراف سیلندر اصلی ثابت بوده و مقدار آن برابر ۱ است. حول سیلندر تغییرات شدید سرعت وجود دارد و هر چقدر به سیلندر اصلی نزدیک‌تر باشد، تغییرات سرعت شدیدتر می‌شود.



شکل ۶- مقایسه سرعت داده‌های عددی حاضر با داده‌های تجربی [۲۰]

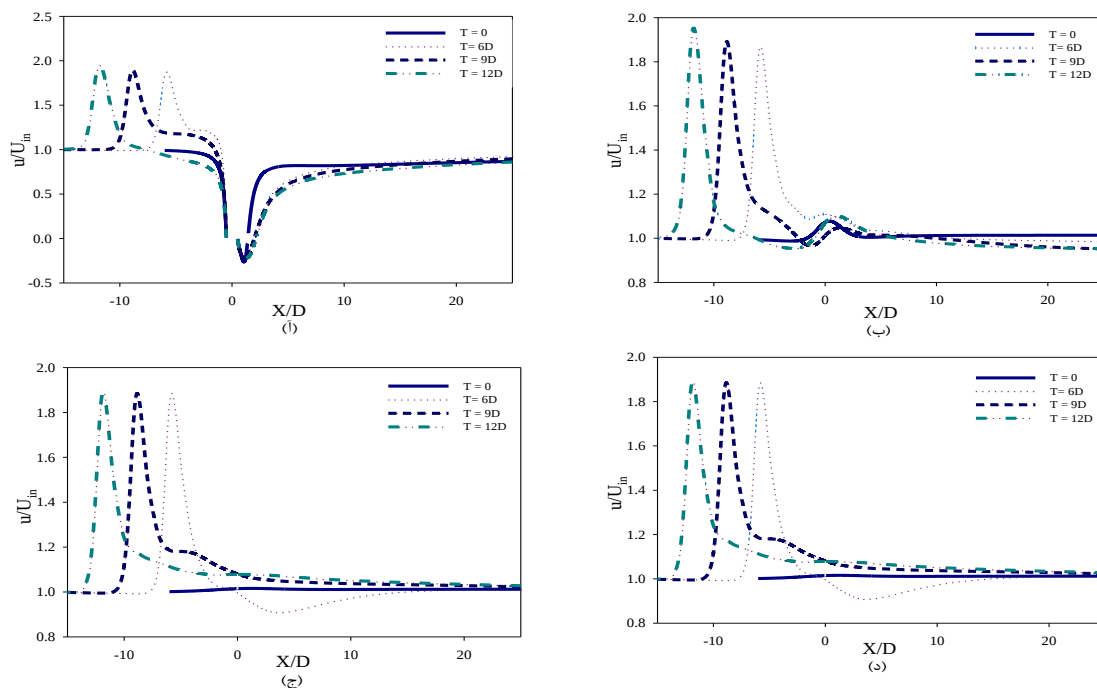


شکل ۷- مقایسه ضریب فشار داده‌های عددی حاضر با داده‌های تجربی [۲۰]

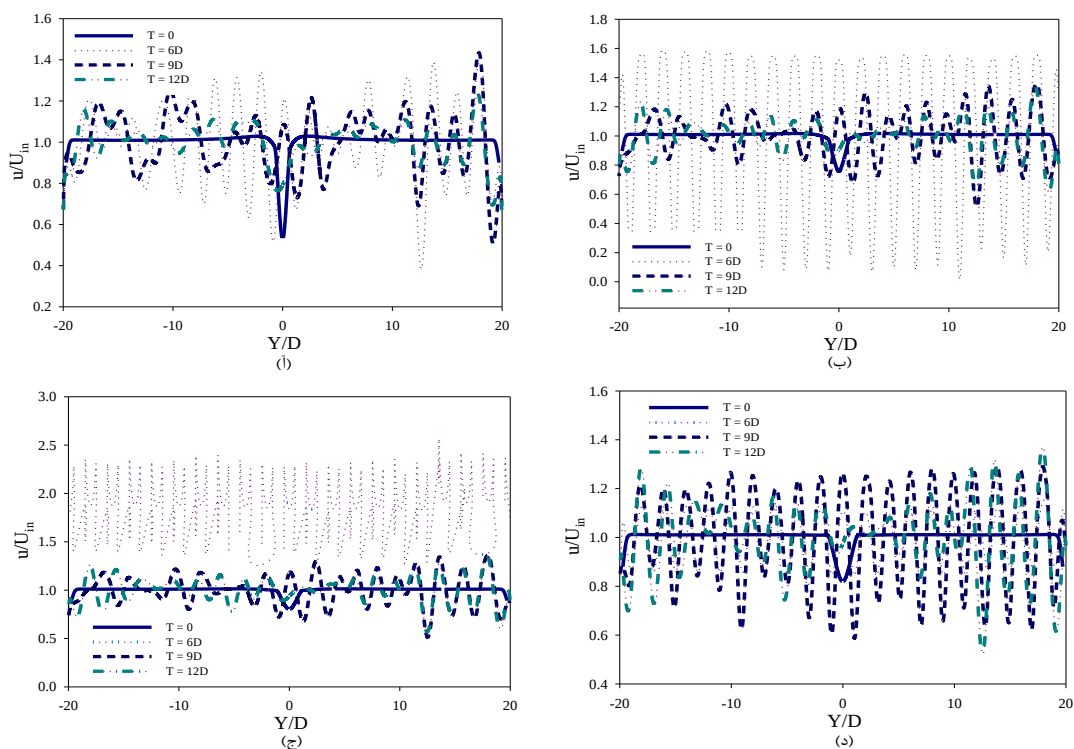
۷- نتایج

توزیع سرعت متوسط

در مقاله حاضر به بررسی اثر اغتشاشات ورودی بر رفتار جریان و مشخصه‌های ایرودینامیکی یک سیلندر دایروی پرداخته می‌شود. اغتشاشات ورودی از طریق سیلندره‌های شبکه در بالادست سیلندر اصلی ایجاد می‌شود. بدین منظور از بیست



شکل ۹- سرعت جریان در راستاهای $Y/D=0, 2, 3, 6$ است. (آ) $Y/D=0$ ، (ب) $Y/D=2$ ، (ج) $Y/D=3$ ، (د) $Y/D=6$

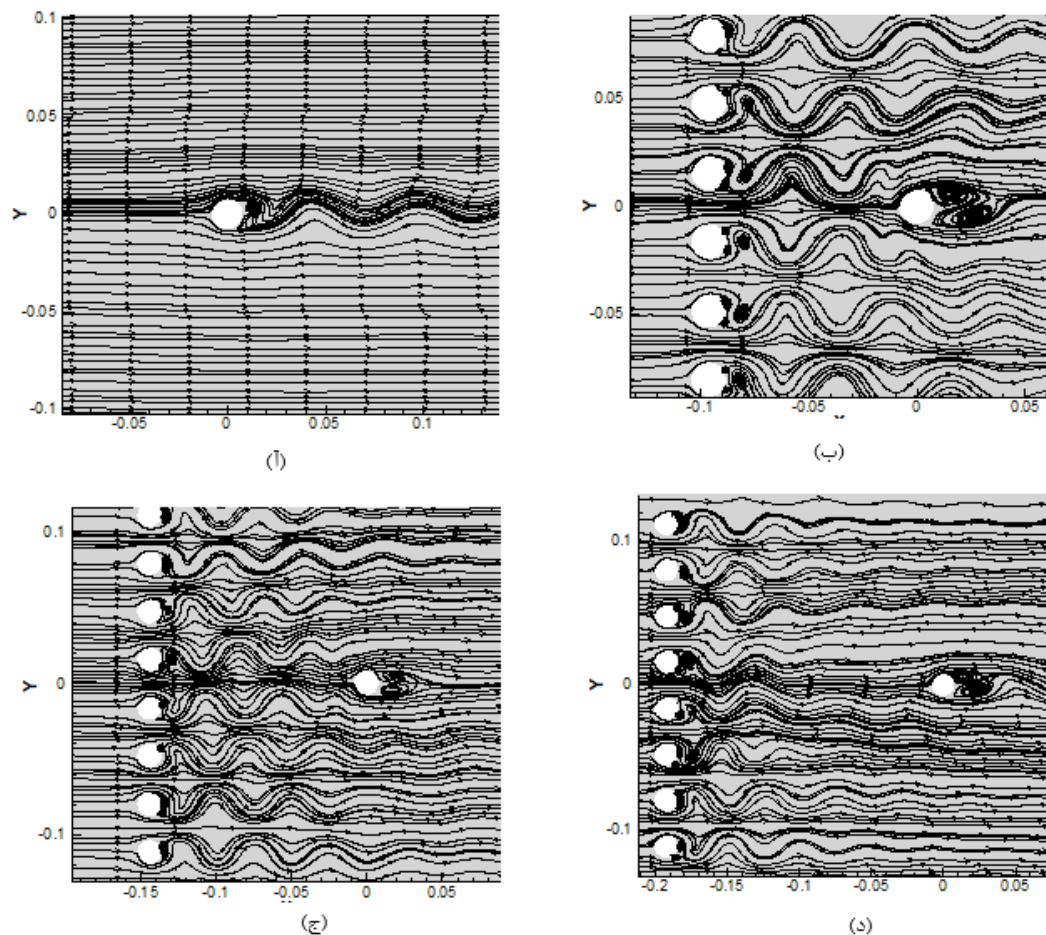


شکل ۱۰- سرعت جریان در راستاهای $X/D=-2, -3, -4, -6$ است. (آ) $X/D=-2$ ، (ب) $X/D=-3$ ، (ج) $X/D=-4$ ، (د) $X/D=-6$

منظم است و ناحیه جدایش کمی به عقب‌تر منتقل شده است. با کاهش فاصله به 9D و به‌ویژه 6D، ساختار جریان پیچیده‌تر شده و اغتشاش وارد شده موجب تأخیر بیشتر در جدایش و تغییر شکل ناحیه گردابه شده است. در فاصله 6D، نوسانات عرضی گردابه‌ها تقویت شده و امتداد گردابه‌های متناوب در پایین‌دست کشیده‌تر و نامتقارن‌تر به‌نظر می‌رسد. این رفتار بیانگر افزایش پایداری لایه مرزی پیش از جدایش و نیز افزایش نیروی برآ در این حالت است. در مجموع، خطوط جریان نشان‌دهنده اثر مستقیم و قابل توجه اغتشاش ورودی بر رفتار جدایش، موقعیت گردابه‌ها و ساختار جریان پایین‌دست هستند.

خطوط جریان

شکل ۱۱ خطوط جریان اطراف سیلندر اصلی را در چهار حالت مختلف شامل بدون سیلندر بالادست 0D و با حضور سیلندرهایی بالادست در فواصل 6D و 9D و 12D نشان می‌دهد. در حالت پایه (بدون سیلندر بالادست)، جریان یکنواخت ورودی منجر به تشکیل الگوی کلاسیک جدایش متقارن و ایجاد دو حباب گردابه‌ای در پایین‌دست سیلندر می‌شود. این الگو با نرخ بالای جدایش و ناپایداری پایین‌دست همراه است. با ورود جریان از میان سیلندرهایی بالادست، ساختار جریان دستخوش تغییر قابل توجهی می‌شود. در حالت 12D، با وجود اغتشاش اولیه، الگوی گردابه‌ها همچنان نسبتاً

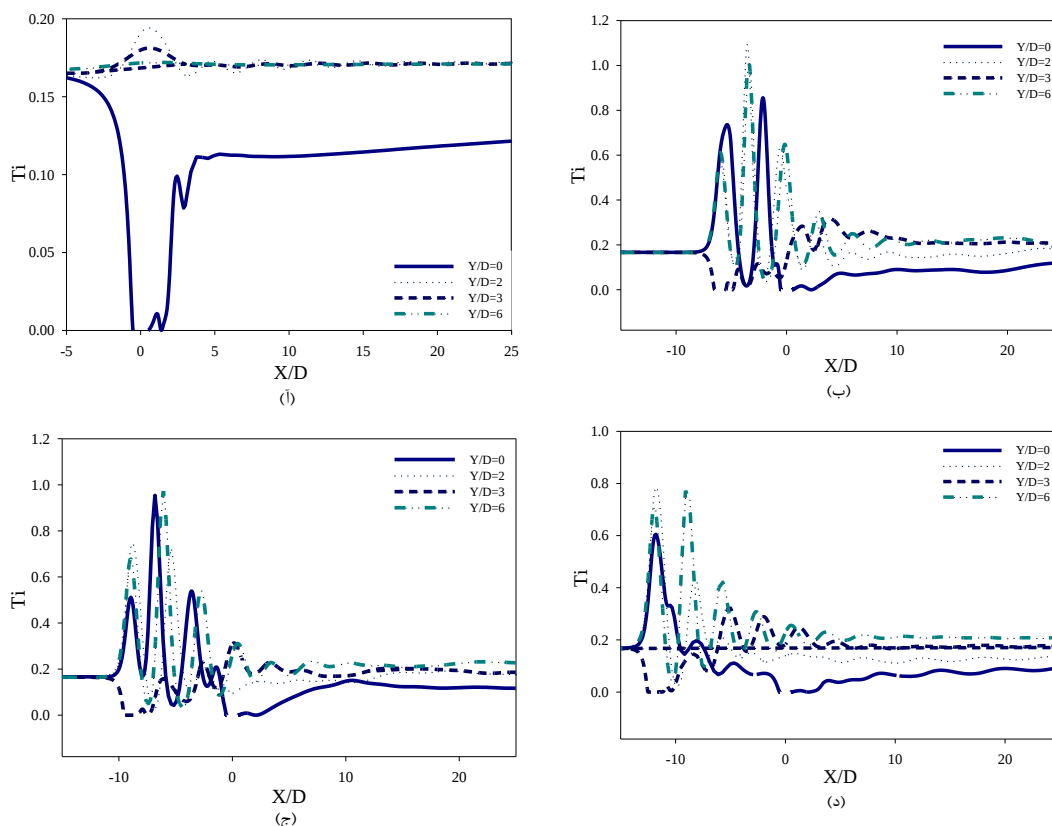


شکل ۱۱- خطوط جریان در حالت‌های مختلف: الف) حالت فاقد سیلندر شبکه، ب) 6D، ج) 9D، د) 12D

شدت آشفتگی (Ti)

اصلی است، در خط $Y/D=0$ ، نمودار در نقطه صفر به علت برخورد با سیلندر اصلی حذف شده است. در شدت آشفتگی کمتر از 0.3 جریان آرام فرض می‌شود، میزان آشفتگی روی سیلندر اصلی در خط‌های $Y/D=2,3,6$ و مقدار این افزایش به ترتیب در $Y/D=2$ بیشتر از $Y/D=3$ و $Y/D=3$ بیشتر از $Y/D=6$ است. شدت آشفتگی به علت تغییرات غیر قابل پیش‌بینی سرعت‌های نوسانی قابل پیش‌بینی نیست و از الگو مشخصی پیروی نمی‌کند.

شکل ۱۲ توزیع شدت آشفتگی Ti را در امتداد چهار پروفایل انتخاب شده نشان می‌دهد که در آن پروفیل در امتداد خط جریان در $Y/D=6$ را می‌توان به علت دور بودن از سیلندر اصلی به عنوان توسعه شدت تلاطم بدون تداخل سیلندر اصلی تقریب زد. از آن پروفیل‌ها می‌توان دریافت که شدت تلاطم در حدود $X/D=0$ در روی سیلندر اصلی به اوج خود می‌رسد و شدت تلاطم در سیلندر اصلی حدود ۱۸٪ است. قسمتی از نمودار که رسم نشده است به علت برخورد خط مربوطه با سیلندر



شکل ۱۲- توزیع شدت آشفتگی (Ti) در مختلف (آ) حالت فاقد سیلندر شبکه، (ب) $6D$ ، (ج) $9D$ و (د) $12D$

گردابه‌ها

جریان حول سیلندر اصلی تقریباً شکل یکنواخت به خود گرفته‌اند و گردابه‌ها به شدت تضعیف شده‌اند.

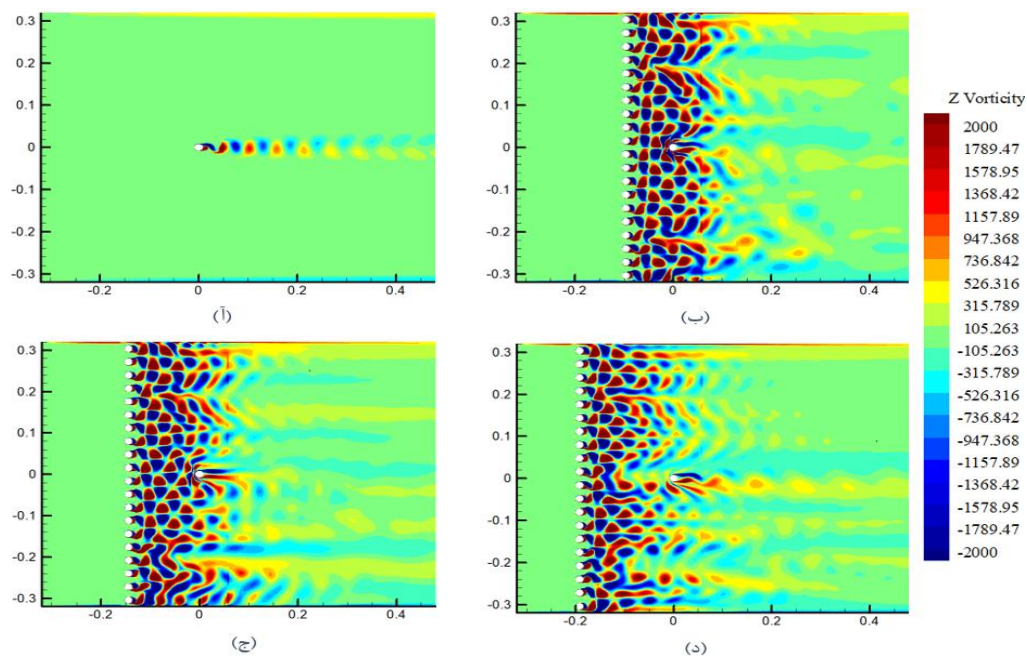
شکل ۱۳ کانتور قدرت گردابه‌ها^۱ را در میدان جریان نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است با فاصله گرفتن از دیواره‌ها گردابه‌ها شکل می‌گیرند، هرچقدر شدت آشفتگی ورودی به سیلندر اصلی بیشتر باشد، جریان‌های گردابی پشت سیلندر بیشتر سرکوب می‌شوند. به نحوی که در حالت $12D$ ،

^۱ vorticity

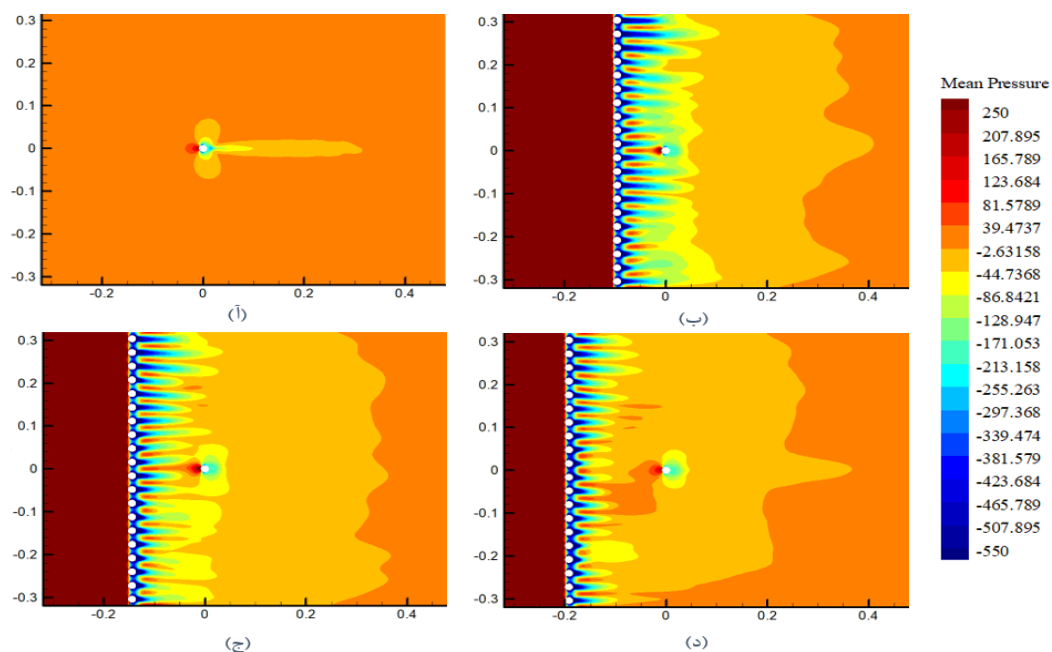
توزیع فشار

فشار در پشت سیلندرها است. به علت پدیده اثر ونتوری فشار در میان سیلندرها شبکه کاهش می‌یابد.

کانتورهای فشار میانگین در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند و همان‌طور که انتظار می‌رود، فشار در جلوی سیلندرها بیشتر از



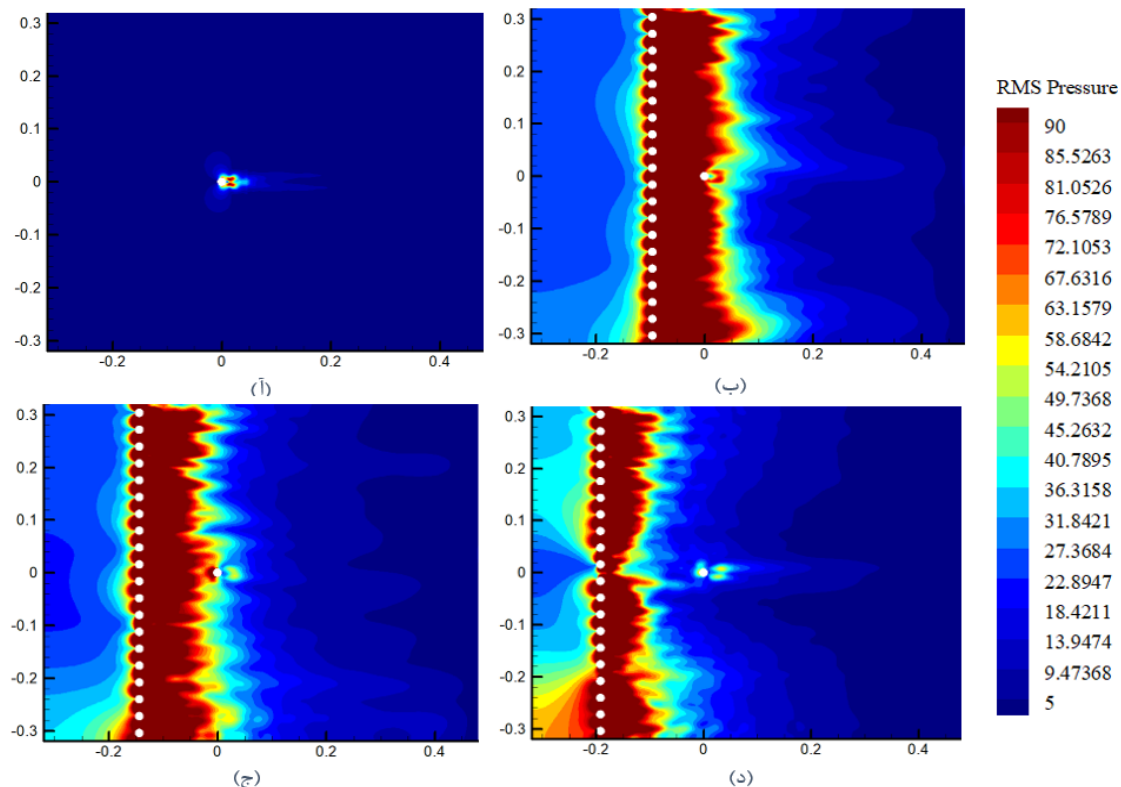
شکل ۱۳- کانتور قدرت گردابه در فواصل مختلف سیلندرهایی بالادست الف) حالت فاقد سیلندر شبکه، ب) 6D، ج) 9D، د) 12D



شکل ۱۴- کانتور فشار میانگین در فواصل مختلف سیلندرهایی بالادست الف) حالت فاقد سیلندر شبکه، ب) 6D، ج) 9D، د) 12D

افزایش یافته است. مشخص است که با افزایش فاصله سیلندره‌ای بالادست از سیلندر اصلی میزان نوسانات جریان ناشی از رخداد گردابه در پشت سیلندر اصلی تضعیف می‌گردد. این وضعیت در فاصله‌ی 12D کالا مشخص است.

شکل ۱۵، کانتور نوسانات فشار استاتیک را بر روی سیلندرها نشان می‌دهد. این کانتورها رفتار کلی جریان ناپایا را نشان می‌دهند که شامل شدت، مکان و اندازه گردابه است. به عبارت دیگر رخداد گردابه‌ها توأم با افزایش نوسانات می‌باشد. در نتیجه نواحی که نوسانات افزایش می‌یابد، آشفتگی

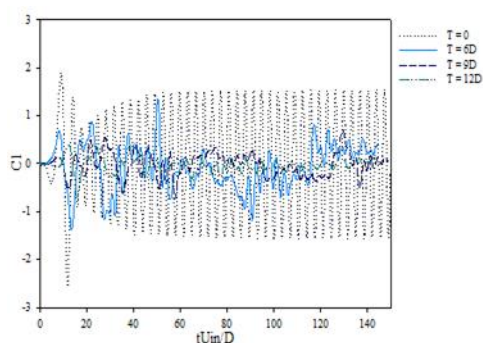


شکل ۱۵- کانتور نوسانات فشار استاتیک در در فواصل مختلف سیلندره‌ای بالادست الف) حالت فاقد سیلندر شبکه، ب) 6D، ج) 9D، د) 12D

سیلندره‌ای بالادست بیشتر بوده و همچنین نیز با گذر زمان نیز تغییر می‌کند. از نمودارهای ضرایب برآ و پسا می‌توان دریافت که بیشترین مقادیر متوسط ضرایب برآ و پسا برای حالتی هست که سیلندره‌ای بالادست وجود نداشته باشند. بیشترین و کمترین نوسانات در ضرایب برآ و پسا به ترتیب متعلق به حالت 6D و حالت 12D می‌باشند.

ضرایب آیرودینامیکی

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ تاریخچه زمانی ضریب پسا C_d و ضریب برآ C_l برای سیلندر اصلی را نشان می‌دهد. مشخص است که در حالتی که فاقد سیلندره‌ای شبکه است، نوسانات ضرایب پسا و برآ به صورت منظم و دارای الگوی خاصی می‌باشند و مقادیر دامنه نوسانات نیز با گذر زمان تقریباً ثابت است. در صورتی که با اعمال سیلندره‌ای شبکه در بالادست سیلندر اصلی، نوسانات قابل پیش‌بینی نبوده و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند. همچنین دامنه نوسانات نیز نسبت به حالت بدون



شکل ۱۷- تاریخچه زمانی ضریب برآ در حالت های مختلف

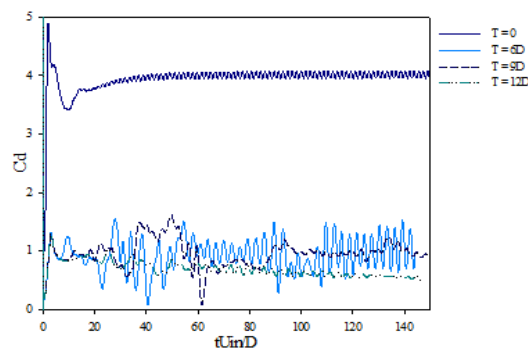
جدایش جریان

در شکل های ۱۸ و ۱۹ تغییرات فشار استاتیک میانگین $\overline{PS}$ و نوسانات فشار استاتیک P'_{rms} نسبت به زاویه بر روی سیلندر اصلی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۸ مشخص است که فشار استاتیک میانگین ($\overline{PS}$)، تا زاویه ۷۰ درجه فشار استاتیک در تمامی حالت ها ثابت است. و سپس تا زاویه ۱۱۰ درجه کاهش می یابد، از این زاویه به بعد $\overline{PS}$ افزایش می یابد، که احتمال جدایش در این ناحیه را نشان می دهد. در شکل ۱۹ مقادیر فشار استاتیک نوسانی P'_{rms} نشان داده شده است. نوسانات فشار بر روی سیلندر بخصوص در زوایای ۱۰۰ تا ۱۸۰ درجه در حالت های مختلف متفاوت است. این موضوع ناشی از برخورد گردابه های سیلندره های بالادست بر سیلندر اصلی می باشد. برای جریان ورودی آشفته، توزیع P'_{rms} دارای پیک دوم در ۱۵۰ درجه است که با جدا سازی لایه برشی مطابقت دارد. همان طور که نشان داده شده است، هرچقدر میله های شبکه به سیلندر اصلی نزدیک تر باشند، نوسانات فشار استاتیک بیشتر خواهد شد، در حالت هایی که سیلندره های شبکه وجود ندارند یا دور هستند، پیک دوم رخ نمی دهد و این حکایت از عدم ایجاد جدایش در روی سیلندر و رخداد گردابه ها در پشت سیلندر است.

مقادیر میانگین ضرایب برآ و پسا در جدول ۲ نشان داده شده است. بررسی ضریب پسا و ضریب برآ متوسط نشان می دهد که ضریب پسا در حالتی که فاصله سیلندره های شبکه نسبت به سیلندر اصلی ۶D است تا حدود ۷۶٪ کاهش یافته و ضریب برآ با افزایش بیش از ۱۳ برابر نسبت به حالت پایه همراه بوده است. تغییرات ذکر شده برای تغییرات ضرایب پسا و برآ بر اساس مقایسه با مقادیر پایه در حالت بدون سیلندره های بالادست ۰D بیان شده اند. توضیح اینکه در حالت ۰D، ضریب پسا مقدار قابل توجهی دارد، در حالی که ضریب برآ به دلیل تقارن جریان تقریباً نزدیک به صفر است؛ بنابراین، در فاصله ۶D، با ورود اغتشاشات و ایجاد ناپایداری در جریان، ضریب برآ به شکل محسوسی افزایش می یابد که منجر به رشد بسیار بالا (بیش از ۱۳ برابر) می شود.

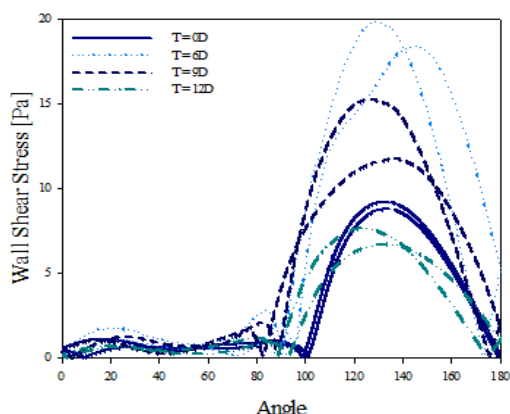
جدول ۲- مقادیر میانگین ضرایب برآ و پسا در حالت فاقد

سیلندره های شبکه و سه حالت ۶D، ۹D، ۱۲D				
12D Grid	9D Grid	6D Grid	No Grid	
۰.۷۰۲۳	۰.۹۶۶۸۲	۰.۹۳۹۹۷۷	۴.۰۱۷۷۸۳	ضریب
۳۴				پسا
۰.۰۳۲۸	۰.۰۲۰۲۱	-۰.۰۷۷۸۵	-۰.۰۰۵۰۲	ضریب
-۹				برآ



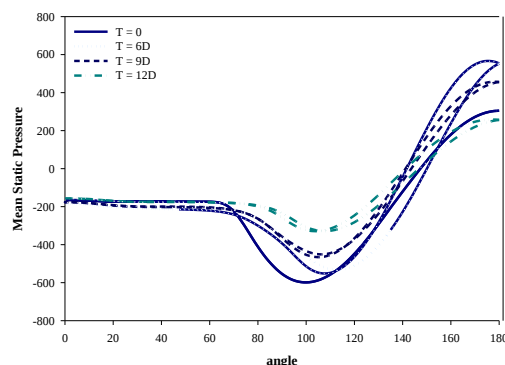
شکل ۱۶- تاریخچه زمانی ضریب پسا در حالت های مختلف

موجب انتقال انرژی به لایه مرزی شده و باعث مقاومت بیشتر آن در برابر جدایش می‌گردد؛ بنابراین، حضور سیلندرهایی بالادست با فواصل مناسب می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در کنترل موقعیت جدایش جریان مورد توجه قرار گیرد.

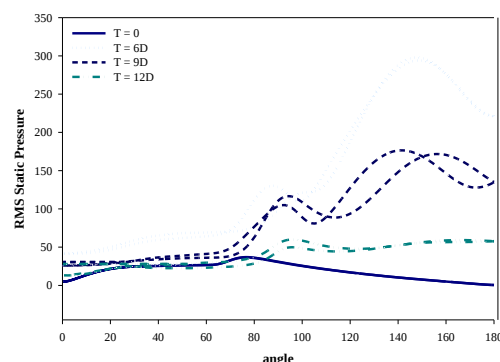


شکل ۲۰- تنش برشی بر روی دیواره سیلندر در حالت‌های مختلف

در شکل ۲۱، پروفیل سرعت لایه مرزی در زاویه ۹۰ درجه سطح سیلندر ارائه شده‌است. این زاویه به‌عنوان ناحیه کلیدی در فرآیند جدایش جریان انتخاب شده، چراکه بیشترین تغییرات لایه مرزی در آن رخ می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که با کاهش فاصله سیلندرهایی بالادست (به‌ویژه در فاصله 6D) ضخامت لایه مرزی افزایش یافته و شیب پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره کاهش می‌یابد که این موضوع نشانه‌ای از تضعیف گرادین سرعت و نزدیکی به جدایش است. در مقابل، برای فاصله 12D، لایه مرزی نازک‌تر و نرخ رشد سرعت سریع‌تر است که حاکی از تأخیر در شروع جدایش جریان است. این نتایج به‌خوبی تأثیر اغتشاش ورودی بر پایداری یا ناپایداری موضعی جریان را در ناحیه میانی سیلندر نشان می‌دهد و با تحلیل گردابه‌ها و ضرایب آیرودینامیکی تطابق دارد.



شکل ۱۸- توزیع فشار استاتیک میانگین بر روی سیلندر اصلی در حالت‌های مختلف



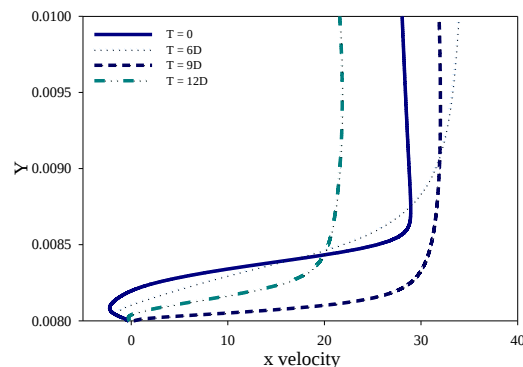
شکل ۱۹- توزیع نوسانات فشار استاتیک بر روی سیلندر اصلی در حالت‌های مختلف

زاویه جدایش جریان با استفاده از نمودار توزیع تنش برشی روی دیواره سیلندر (شکل ۲۰) برای چهار حالت مختلف شامل بدون سیلندر بالادست (فاصله 0D)، فاصله 6D، فاصله 9D و فاصله 12D تعیین شده‌است. زاویه صفر پیشانی سیلندر اصلی و زاویه ۱۸۰ پشت سیلندر اصلی است. در این تحلیل، محل جدایش با صفرشدن تنش برشی و تغییر علامت آن مشخص گردید. نتایج نشان می‌دهد که در حالت پایه (فاصله 0D)، زاویه جدایش حدود ۸۲ درجه بوده‌است. در حالی‌که با افزودن سیلندرهایی بالادست و کاهش فاصله آن‌ها، زاویه جدایش به‌ترتیب به حدود ۹۳ درجه (12D)، ۹۸ درجه (فاصله 9D) و ۱۱۰ درجه (فاصله 6D) افزایش یافته‌است. این روند نشان‌دهنده تأثیر مستقیم اغتشاش ورودی در تأخیر جدایش جریان از سطح سیلندر است؛ به این معنا که آشفتگی بیشتر

➤ نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه شد و تطابق قابل قبولی داشت؛ همچنین نمودارهای استقلال از شبکه و گام زمانی، پایداری و دقت شبیه‌سازی را تأیید کردند.

مراجع

- [1] Yadegari M, Bak Khoshnevis A, Boloki M (2023) An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder. Iran J Sci Technol Trans Mech Eng 47(1): 67–80.
- [۲] حاتمی س، یادگاری م، بک‌خوشنویس ع (۱۴۰۱) بررسی تجربی ضریب درگ در سیلندره‌ای دایروی با چیدمان پشت سر هم در زوایای مختلف. مجله مهندسی مکانیک ۳۱(۶): ۳–۱۲. <https://doi.org/10.30506/mmep.2023.562121.2048>
- [3] Bak Khoshnevis A, Boloki M, Yadegari M (2020) The investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylindrical wake. J Solid Fluid Mech 10(1): 223–236.
- [4] Yadegari M, Bak Khoshnevis A (2021) Numerical and experimental study of the characteristics of the wake produced behind an elliptic cylinder with trip wires. Iran J Sci Technol Trans Mech Eng 45: 265–285.
- [5] Bearman P, Morel T (1983) Effect of free stream turbulence on the flow around bluff bodies. Prog Aerosp Sci 20(2–3): 97–123.
- [6] Norberg C (1986) Interaction between freestream turbulence and vortex shedding for a single tube in cross-flow. J Wind Eng Ind Aerodyn 23: 501–514.
- [7] Norberg C, Sundén B (1987) Turbulence and Reynolds number effects on the flow and fluid forces on a single cylinder in cross flow. J Fluids Struct 1(3): 337–357.
- [8] Williamson CHK (1996) Vortex dynamics in the cylinder wake. Annu Rev Fluid Mech 28: 477–539.
- [9] Williamson CHK, Govardhan R (2004) Vortex-induced vibrations. Annu Rev Fluid Mech 36: 413–455.
- [10] An H, Cheng L, Zhao M (2009) Steady streaming around a circular cylinder in an oscillatory flow. Ocean Eng 36(14): 1089–1097.
- [11] McAuliffe BR, Yaras MI (2010) Transition mechanisms in separation bubbles under low-and elevated-freestream turbulence. In: Proc. ASME Turbo Expo.
- [12] Khabbouchi I, Fellouah H, Ferchichi M, Guellou MS (2014) Effects of free-stream turbulence and Reynolds number on the separated shear layer from



شکل ۲۱- پروفیل سرعت در حالت‌های مختلف سیلندره‌ای شبکه

جمع بندی

در این پژوهش، تأثیر اغتشاش ورودی ناشی از سیلندره‌ای بالادست بر رفتار جریان حول یک سیلندر منفرد در عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ به صورت عددی بررسی شد. سیلندرها در بالادست سیلندر اصلی و در فواصل مختلف قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج حاصل، نکات کلیدی زیر به دست آمد:

- با کاهش فاصله بین سیلندره‌ای بالادست و سیلندر اصلی از ۱۲D به ۶D، شدت تلاطم ورودی افزایش یافته و ساختار جریان اطراف سیلندر به طور چشمگیری تغییر کرد.
- زاویه جدایش از حدود ۸۲ درجه در حالت بدون سیلندر بالادست ۰D به حدود ۱۱۰ درجه در فاصله ۶D افزایش یافت که بیانگر تأخیر جدایش و انتقال انرژی بیشتر به لایه مرزی در حضور اغتشاش ورودی است.
- در فاصله ۶D، ضریب پسا (C_d) به طور محسوسی کاهش یافت و ضریب برآ (C_l) افزایش چشمگیری داشت که نشان‌دهنده پایداری کمتر جریان و تقویت نوسانات گردابه‌ای است.
- کانتورهای گردابه و خطوط جریان نشان دادند که اغتشاش ورودی موجب افزایش گستره ناحیه گردابه و تقویت شدت گردابه‌ها شده‌است، به ویژه در فواصل کوتاه‌تر.

- [18] Chandran J, KR B (2022) Numerical prediction of the drag coefficient of bluff bodies in three-dimensional pipe flow. *J Comput Appl Res Mech Eng* 12(1): 13–29.
- [19] Song B, et al. (2022) Direct numerical simulation of flow over a cylinder immersed in the grid-generated turbulence. *Phys Fluids* 34(1): 015109.
- [20] Mansouri Z, Yadegari M, Bak Khoshnevis A (2023) Numerical investigation of the effects of installing four trip wires with different diameters on the mean and fluctuation velocities and characteristics of the wake around the circular cylinder. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 45: 459.
- [21] Mansouri Z, Yadegari M, Bak Khoshnevis A (2023) Effect of trip wire on Reynolds shear stress and fluctuating velocities in circular cylinder. *J Mech Eng* 32: 31–45.
- [22] Sadeghi M, Yadegari M, Khoshnevis AB (2024) Numerical investigation of the flow characteristics around two sequential cylinders with circular and square cross-sections. *J Mar Sci Technol* 29(2): 315–332.
- a circular cylinder. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 135: 46–56.
- [13] Cao Y, Tamura T (2018) Aerodynamic characteristics of a rounded-corner square cylinder in shear flow at subcritical and supercritical Reynolds numbers. *J Fluids Struct* 82: 473–491.
- [14] Ji C, Cui Y, Xu D, Yang X, Srinil N (2019) Vortex-induced vibrations of dual-step cylinders with different diameter ratios in laminar flows. *Phys Fluids* 31(7): 073602.
- [15] Zhou Y, Nagata K, Sakai Y, Watanabe T (2019) Extreme events and non-Kolmogorov-5/3 spectra in turbulent flows behind two side-by-side square cylinders. *Phys Rev Fluids* 4(12): 124602.
- [16] Tao S, Zhou Y (2019) Turbulent flows around side-by-side cylinders with regular and multiscale arrangements. *Phys Rev Fluids* 4(12): 124602.
- [17] Zhang M, Fu S, Liu C, Ren H, Xu Y (2021) Experimental investigation on vortex-induced force of a steel catenary riser under in-plane vessel motion. *Mar Struct* 78: 102882.