

تحلیل عددی تأثیر استفاده از صفحات منحرف کننده کوتاه

در پایین دست سیلندر استوانه‌ای

بهزاد قدیری دهکردی* و حامد حوری جعفری

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

تاریخ ثبت اولیه: ۸۷/۹/۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۷/۹/۶، تاریخ پذیرش قطعی: ۸۷/۱۰/۵

چکیده پدیده ریزش گردابه از پشت سیلندره‌ای استوانه‌ای باعث القای نیروهای نوسانی لیفت و درگ به این سیلندرها می‌شود. می‌توان با قراردادن صفحات منحرف کننده جریان و یا حتی یک سیلندر استوانه‌ای دیگر در پایین دست سیلندر اصلی، این پدیده را فرونشاند و باعث کاهش نیروهای القایی توسط سیال شد. در مقاله حاضر با حل عددی میدان جریان آرام، لزج و دوبعدی گذرنده از سیلندر استوانه‌ای و صفحه منحرف کننده در پایین دست آن، چگونگی فرونشانی پدیده ریزش گردابه به کمک صفحات منحرف کننده کوتاه تجزیه و تحلیل شده است. برای حل میدان جریان از روش حجم محدود در شبکه کارتیزین استفاده شده است. همچنین جهت اعمال شرط عدم لغزش بر روی اجسام جاسازی شده در میدان (سیلندر استوانه‌ای و صفحه منحرف کننده)، روش سلول شبح (Ghost-Cell Method) به همراه تکنیک مقدار بزرگ جمله چشمه به کار فته است. قبل از حل میدان جریان در اطراف سیلندر استوانه‌ای با صفحه منحرف کننده، دقت و صحت روش، با شبیه سازی جریان در اطراف سیلندر استوانه‌ای تنها، سنجش شده است. نتایج حاصل در تطابق کامل با دیگر نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود است. شبیه سازی‌های عددی صورت گرفته برای سیلندر استوانه‌ای با صفحه منحرف کننده، در اعداد رینولدز ۴۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ و محدوده $0 < G/D < 10$ و $0 < Z/D < 1/25$ است (D قطر سیلندر، Z و G به ترتیب فواصل عمودی و افقی بین لبه ابتدایی منحرف کننده با خط مرکزی و ته سیلندر). مقادیر بحرانی Z و G که در آنها پدیده ریزش گردابه به طور کامل فرونشانده می‌شود، محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب لیفت و درگ نیز وابستگی بسیاری به Z و G دارند و در مقادیر مشخصی از آنها، به حداقل مقدار خود کاهش می‌یابند.

کلمات کلیدی سیلندر استوانه‌ای، صفحه منحرف کننده، ریزش گردابه، حجم محدود، شبکه کارتیزین.

Suppression of Vortex Shedding from Circular Cylinders Using Detached Short Splitter-Plates

B. Ghadiri Dehkordi* and H. Hourri Jafari

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

Abstract Vortex shedding phenomena from circular cylinders imposes oscillatory flow induced forces on these structures. Splitter-plates in the downstream/upstream of the circular cross section cylinder could be embedded in order to reduce flow induced forces and suppress vortex shedding. In this Article, flow over a circular cylinder with detached short splitter-plate is numerically simulated by solving two dimensional, unsteady, and viscous flow fields. Implemented Method is based on finite-volume approach on Cartesian-staggered grid. In addition, the ghost-cell method in conjunction with Great Source Term technique is employed to enforce directly no-slip condition on the cylinder boundary. The accuracy of the solver is validated by simulation of the flow over a single circular cylinder. The results are in excellent agreement with the experiments reported in the literature. Eventually, the flow over a circular cylinder with splitter-plate in its downstream in $Re=40, 100$ and $150, 0 \leq G/D \leq 10$ and $0 \leq Z/D \leq 1/25$ (where D is the cylinder diameter, G and Z the horizontal and vertical distances between leading edge of the splitter-plate and the cylinder base) are simulated and analyzed. Critical values of G and Z where vortex shedding is fully suppressed is calculated. The results show that the critical values are significantly dependent on the G and Z.

Keywords Circular Cylinders, Splitter-Plate, Vortex Shedding, Finite-Volume Method, Cartesian-Staggered Grid.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، گروه مکانیک.

تلفن: ۰۲۱-۲۲۰۲۹۳۵۱-۹، دورنگار: ۰۲۱-۲۲۰۴۶۹۹۵، پیام‌نگار: ghadiri@modares.ac.ir

۱- مقدمه

انجام شده است [۹-۷]. بیشتر مطالعات در شرایطی اند که صفحه منحرّف کننده به نقطه پشت سیلندر متصل است و از آن فاصله ای ندارد. در سال ۱۹۹۹ برای اولین بار ایده استفاده از صفحات منحرّف کننده به صورت جدا شده از انتهای سیلندر را Ozono [۱۰] توسعه داد. او الگوی جریان در رینولدز ۶۷۰۰ را به صورت آزمایشگاهی با قرار دادن یک صفحه منحرّف کننده کوتاه به طول قطر سیلندر، در فواصل مختلف نسبت سیلندر تجزیه و تحلیل کرد و ریزش گردابه را در موقعیت های مختلف ارزیابی کرد. وی نشان داد که در مقادیر Z/D ثابت با تغییر دادن مقدار G/D (D قطر سیلندر، Z و G به ترتیب فواصل عمودی و افقی بین لبه ابتدایی منحرّف کننده با خط مرکزی و ته سیلندر) درجایی که به آن مقدار بحرانی گفته می شود، مقادیر ضریب درگ، عدد استروهال^۵ و ضریب فشار پشت سیلندر ناگهان کاهش می یابند. همچنین Ozono [۱۱] مطالعه آزمایشگاهی مشابهی بر روی صفحات منحرّف کننده بزرگ (با طول ۶ برابر قطر سیلندر) و جدا از انتهای سیلندر انجام داد.

Hwang و دیگران [۱۲] مطالعه مشابهی به صورت عددی برای صفحات منحرّف کننده کوتاه در رینولدزهای ۱۰۰ و ۱۶۰ انجام داده اند و مقدار بحرانی $G/D=2/6$ را برای هنگامی که صفحه فقط در امتداد خط مرکزی سیلندر حرکت می کند ($Z/D=0$)، محاسبه کرده اند. همچنین Hwang و Yang [۱۳] استفاده از دو صفحه منحرّف کننده، یکی در پایین دست و دیگری در بالادست سیلندر، میزان کاهش در ضریب درگ را در چیدمان های مختلف به صورت عددی محاسبه کردند. هر دو صفحه در امتداد خط مرکزی سیلندر جابه جا می شد و مقادیر بحرانی آنها $G1/D=1/5$ و $G2/D=2/4$ (G1 فاصله لبه انتهایی صفحه بالادستی تا سیلندر، G2 فاصله لبه ابتدایی صفحه پایین دستی تا سیلندر) محاسبه شد. در این شرایط، ضریب درگ به میزان $38/6\%$ کاهش یافت. براساس نتایج کار، صفحه بالادستی به واسطه کاهش فشار در نزدیکی نقطه سکون سیلندر و صفحه

ارتعاش ناشی از گردابه^۱ می تواند در مسائلی که برهم کنش بین سیال و سازه وجود دارد، پدید آید و باعث ویرانی سازه شود. علت این امر القای نیروهای نوسانی از طرف سیال به سازه است. در موارد بسیاری نظیر مبدل های حرارتی، سازه های دریایی، پل ها و حتی خطوط انتقال برق، رخ می دهد. بنابراین کنترل ریزش گردابه^۲ از پشت سازه و حتی در صورت امکان فرونشانی آن از اهمیت حیاتی دارد؛ به ویژه در سازه های دریایی آب های عمیق که برطرف کردن عیوب در آنها بسیار سخت و پرهزینه خواهد بود. برای فرونشاندن ریزش گردابه می توان از صفحات منحرّف کننده جریان^۳ یا یک سیلندر دیگر با قطر کوچکتر در پایین دست سیلندر اصلی استفاده کرد.

مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعددی درباره متوقف کردن پدیده با استفاده از یک سیلندر استوانه ای کوچکتر که به آن سیلندر کنترل^۴ اطلاق می شود، صورت گرفته است. نمونه مطالعات آزمایشگاهی آن در مراجع [۲،۱] و نمونه مطالعات عددی آن نیز در مراجع [۵-۳] موجود است. در مرجع [۱] رینولدزهای پایین و در مرجع [۲] رینولدزهای بالا آزمایش شده اند و قطر هر دو سیلندر را برابر با یکدیگر در نظر گرفته اند است. در مرجع [۶] مطالعه عددی مبسوطی درباره متوقف کردن ریزش گردابه از یک سیلندر استوانه ای در مجاورت دیواره صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد که در فواصل کم بین سیلندر و دیواره، ریزش گردابه متوقف می شود. مقادیر بحرانی فاصله سیلندر تا دیواره در رینولدزهای بین ۸۰ تا ۱۰۰۰ محاسبه شده است. برای رینولدزهای بین ۸۰ تا ۲۰۰ تغییر خیلی زیادی در مقادیر بحرانی مشاهده نمی شود.

از دیگر روش های متوقف کردن پدیده ریزش گردابه و در پی آن کاهش ضرایب لیفت و درگ، استفاده از صفحات منحرّف کننده است که در این خصوص نیز مطالعات زیادی

1. Vortex Induced Vibration.
2. Vortex Shedding.
3. Splitter-Plate.
4. Control Clinder.
5. Srouhal Number.

شده است. تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی مسئله در بخش ۳، و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۴ صورت گرفته است.

۲- نحوه انجام آزمایش

۲-۱- معادلات حاکم و فرمولاسیون عددی

۲-۱-۱- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان جریان لزج، غیردائمی و آرام، شامل معادله پیوستگی و معادلات ممتوم (معادلات نویر-استوکس) است که در شرایط دوبعدی به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } \mathbf{u}) - \frac{\partial P}{\partial x} + \beta_x \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho \mathbf{u} v) = \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial P}{\partial y} + \beta_y \quad \text{رابطه (۳)}$$

ρ دانسیته سیال، μ ویسکوزیته سیال، \mathbf{u} میدان سرعت جریان، P فشار و \mathbf{u} و v مؤلفه‌های میدان سرعت در جهت x و y هستند. همچنین β_x و β_y نیروهای حجمی^{۱۲} به ازای واحد حجم سیال‌اند. در این کار سیال، تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین به‌طور خودکار مقدار دانسیته سیال در طول محاسبات ثابت در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که در همه شبیه‌سازی‌ها جریان به‌صورت تراکم‌ناپذیر با

پایین دستی با افزایش فشار پشت سیلندر در دنباله، باعث کاهش چشمگیر ضریب درگ شدند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیار محدودی بر روی اثر استفاده از صفحات منحرف‌کننده‌ای که به سیلندر متصل نیستند، صورت گرفته است. همچنین مطالعات عددی صورت گرفته نیز بسیار کم و محدود به جابه‌جایی صفحه در امتداد خط مرکزی سیلندر بوده است.

در مقاله حاضر تأثیر استفاده از صفحات منحرف‌کننده کوتاه که به‌صورت غیرمتقارن (خارج از خط مرکزی سیلندر) در پایین دست جریان واقع شده‌اند، بر الگوی جریان و نیروهای وارده از سیال بر سازه مورد تحلیل شده است. جهت بررسی این تأثیر در رینولدزهایی که ریزش گردابه وجود ندارد، عدد رینولدز ۴۰ شبیه‌سازی شده و جهت بررسی نحوه فرونشانی ریزش گردابه، میدان جریان در رینولدزهای ۱۰۰ و ۱۵۰ مطالعه شده است. از روش حجم محدود جهت حل میدان جریان استفاده شده و گسسته‌سازی مکانی معادلات بر طبق روش ترکیبی^۶ و از نظر زمانی به‌صورت کاملاً ضمنی^۷ در شبکه کارترین-جابه‌جاشده صورت پذیرفته است. تکنیک سلول شیخ^۸ برای اعمال شرط عدم لغزش بر روی مرزهای انحنادار جاسازی شده در مختصات کارترین به‌کار رفته است. همچنین تکنیک مقدار بزرگ برای جمله چشمه^۹ را به‌جای اضافه کردن نیروی برگشتی به معادلات نویر استوکس^{۱۰} جهت اعمال مقادیر مورد نظر جریان (مثل مقادیر صفر برای مؤلفه‌های سرعت) در ناحیه‌ای که اجسام جامد جاسازی شده‌اند، به‌کار برده‌ایم. الگوریتم حل عددی بر مبنای روش سیمپل^{۱۱} است.

در ادامه، معادلات حاکم، شرایط مرزی و فرمولاسیون عددی میدان محاسباتی در بخش ۲ تشریح شده است در بخش ۳ جهت اطمینان از عملکرد و صحت کد، معتبرسازی و تحلیل نتایج حاصل از حل میدان جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و دیگر روش‌های عددی ارائه

6. Hybrid Scheme
7. Fully Implicit.
8. Ghost-Cell
9. Great Source Term Technique.
10. Navier-Stokes.
11. Simple.
12. Body Forces.

در میدان وجود دارد، موقعیت آن با Z و G مشخص می‌شود که به ترتیب فواصل عمودی و افقی بین لبه ابتدایی منحرف‌کننده و ته سیلندر است. که طول صفحه منحرف‌کننده برابر با قطر سیلندر در نظر گرفته شده است. همچنین در تمامی شبیه‌سازی‌ها، قطر سیلندر برابر با $D=(0/04)$ ، ضخامت صفحه برابر با $0/002$ و برای دستیابی به اعداد رینولدز 40 ، 100 و 150 ، سرعت جریان آزاد به ترتیب برابر با $0/001002$ ، $0/002505$ و $0/0037575$ انتخاب شده‌اند. عدد رینولدز بر مبنای قطر سیلندر تعریف شده است.

۲-۳. شرایط مرزی

شرایط مرزی مهم شامل، شرط مرزی در ورودی و خروجی حوزه محاسباتی و شرط مرزی نقاط داخلی و نقاط مرزی اجسام جامد جاسازی شده در میدان است. در ورودی میدان از شرط دریشلت^{۱۳} ($u = U$ و $v = 0$) و سرعت جریان آزاد) و در خروجی از شرط مرزی نیومان^{۱۴} ($\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ و $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$) استفاده شده است.

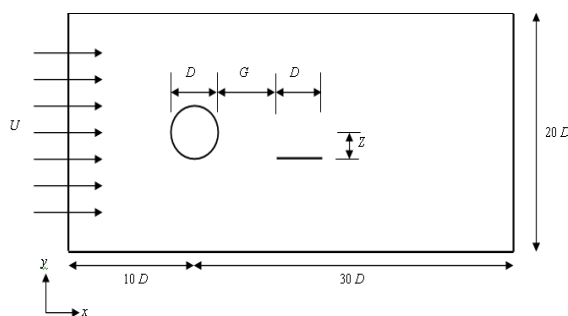
جهت اعمال شرط عدم لغزش بر روی مرز صفحه منحرف‌کننده، مقادیر مؤلفه‌های سرعت برای نقاطی از شبکه که بر روی صفحه یا داخل آن واقع هستند، برابر صفر ($v=0$) و $u=0$ است. این کار با توجه به شکل مستطیلی صفحه و نوع شبکه، به راحتی صورت گرفته است. اما روش اعمال شرط عدم لغزش بر روی مرز واقعی سیلندر که از مشکلات روش حاضر است، در بخش‌های ۲-۷ و ۲-۸ به طور کامل توضیح داده شده است. به دلیل استفاده از شبکه کارتزین، مرز انحنادار سیلندر به طور کامل بر نقاط شبکه منطبق نیست و همین امر ما را ملزم به استفاده از تکنیک سلول شیخ کرده است.

برای اعمال مقادیر مشخص شده متغیرهای جریان برای اجسام جاسازی شده در میدان، (سیلندر و صفحه منحرف‌کننده)،

مشخصات $\rho = 1000$ و $\mu = 0/001002$ در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل اینکه در مسئله مورد نظر سطح آزادی وجود ندارد، از مقدار نیروهای حجمی نیز می‌توان صرف‌نظر کرد ($\beta_x \approx 0, \beta_y \approx 0$). معادلات ۱ تا ۳، معادلات حاکم بر جریان سیال لزج، غیردائمی و دوبعدی هستند که در شرایط جریان آرام و بدون حضور آشفتگی در جریان، حل خواهند شد.

۲-۲. حوزه محاسباتی مسئله

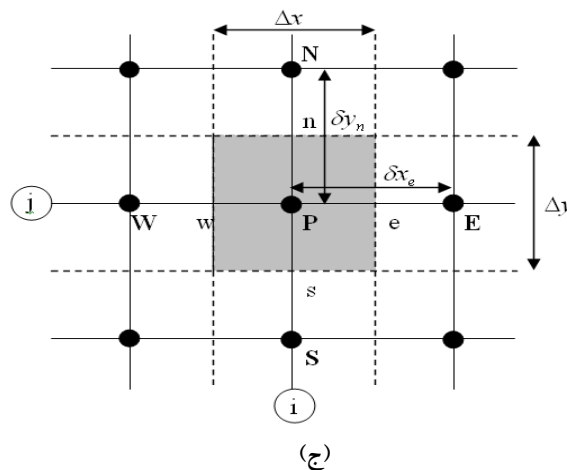
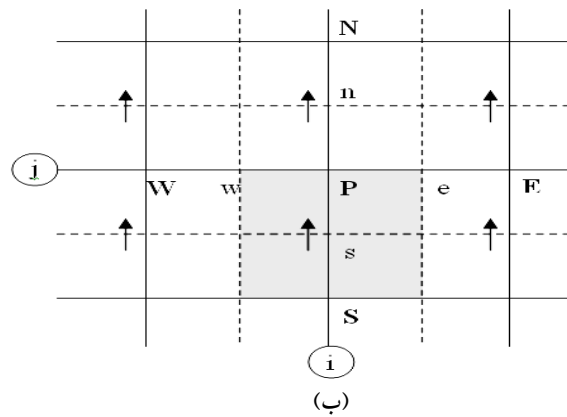
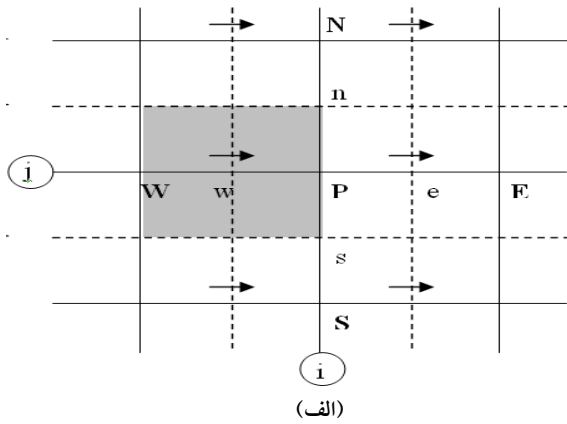
در شبیه‌سازی‌ها از یک حوزه محاسباتی مستطیلی جهت حل میدان جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای ساکن با صفحه منحرف‌کننده و بدون آن استفاده شده است (شکل ۱). طول و عرض حوزه محاسباتی به ترتیب $40D$ و $20D$ است که در آن قطر سیلندر استوانه‌ای است. ابعاد مذکور به اندازه کافی بزرگ هستند که تأثیر مرزها به کمترین مقدار خود برسد. سیلندر استوانه‌ای به گونه‌ای در حوزه محاسباتی واقع گشته است که مرکز آن در مختصات $x=10D$ و $y=10D$ قرار می‌گیرد. جهت جریان از سمت چپ به سمت راست، و سرعت جریان آزاد در ورودی میدان، U است. در شرایطی که صفحه منحرف‌کننده



شکل ۱. حوزه محاسباتی میدان جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای و صفحه منحرف‌کننده.

13. Dirichlet.

14. Neumann.



شکل ۲. شبکه کارترین-جابه‌جاشده برای مسائل دوبعدی، (الف) شبکه جابه‌جا شده برای u ، (ب) شبکه جابه‌جا شده برای v و (ج) شبکه اصلی برای دیگر متغیرها، (حجم‌های کنترل‌بخش خاکستری‌اند. دیگر متغیرها = \bullet ، \rightarrow = u ، \uparrow = v).

از تکنیک مقدار بزرگ برای جمله چشمه بخش (۲-۶) استفاده کرده‌ایم. بدین ترتیب مقادیر مورد نظر به‌طور مستقیم و بدون استفاده از نیروی بازخورد به‌عنوان جواب میدان، در نقاط مورد نظر اعمال می‌شوند.

۲-۴. تولید شبکه

در کار حاضر، از شبکه کارترین-جابه‌جاشده^{۱۵} غیریکنواخت استفاده شده و شبکه در ناحیه‌ای که جسم جامد قرار گرفته، ریزتر شده است. در این نوع شبکه محاسبه مؤلفه‌های سرعت برای نقاطی صورت می‌گیرد که بر روی وجوه حجم کنترل اصلی و به عبارتی نقاط جابه‌جاشده قرار دارند. در حالی که فشار برای نقاطی محاسبه می‌شود که روی شبکه اصلی‌اند. الگوی شبکه مورد استفاده در شکل ۲ آمده است. در این شکل محل مؤلفه‌های سرعت u و v بر روی وجوه حجم کنترل اصلی مشخص شده است. مهم‌ترین نتیجه استفاده از شبکه جابه‌جاشده این است که نرخ جریان جرم از وجوه حجم کنترل بدون هیچ گونه میانمایی برای مؤلفه‌های سرعت قابل محاسبه است.

۲-۵. گسسته‌سازی معادلات حاکم

در گسسته‌سازی معادلات از روش حجم محدود استفاده شده و انتگرال‌گیری معادلات حاکم بر روی شبکه کارترین اشاره شده در بخش قبل، انجام شده است. گسسته‌سازی معادلات از نظر مکانی بر طبق روش ترکیبی و از نظر زمانی به صورت کاملاً ضمنی است. معادلات گسسته‌شده شامل معادلات ممتوم، معادلات اصلاح فشار و اصلاح سرعت، با جزئیات کامل در Patankar [۱۴] تشریح شده است و در اینجا از ذکر دوباره آنها خودداری می‌شود.

در طول روند گسسته‌سازی، تابع $A(|P|)$ در ضرایب نقاط همسایه معادله جبری ظاهر می‌شود که در آن پارامتر P

که در آن 10^{30} نشان‌دهنده مقدار بزرگی است که از دیگر ترم‌های معادله گسسته شده ممتوم در مقابل آن می‌توان صرف نظر کرد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\Phi_P = -\frac{S_C}{S_P} = -\frac{10^{30} \Phi_{P, \text{desired}}}{-10^{30}} = \Phi_{P, \text{desired}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

۷-۲. انتخاب سلول‌های قطع شده و سلول‌های شیخ برای سیلندر

در این قسمت و قسمتهای بعدی، مشکل اعمال شرط عدم لغزش بر مرز منحنی شکل سیلندر که بر نقاط شبکه کارترین منطبق نیست، حل می‌شود. یکی از راه‌حل‌ها، به کارگیری تکنیک سلول قطع شده^{۱۶} است. در این تکنیک از گسسته سازی متفاوت برای آن دسته از نقاط شبکه که به مرز نزدیک هستند استفاده می‌شود؛ لذا هزینه محاسبات بالا می‌رود و اجرای آن نیز پیچیده است [۱۵]. تکنیک دیگر در روش حجم محدود، روش سلول شیخ است. سلول شیخ به سلولی گفته می‌شود که توسط مرز فیزیکی قطع شده باشد و نقاط محاسبه مقادیر جریان در آن، داخل مرز باشد. در این روش پس از شناسایی سلول‌های شیخ، با استفاده از میانبایی (قسمت ۸-۲) از روی نقاطی که خارج مرز در میدان جریان اند، مقادیر جریان به گونه‌ای برای نقاط سلول شیخ محاسبه می‌شود که شرط عدم لغزش بر روی مرز اصلی جسم ارضا شود [۱۶]. در مقاله از این روش جهت اعمال شرایط مرزی روی سیلندر جاسازی شده در میدان استفاده شده است. البته چنین مشکلی برای صفحه به وجود نخواهد آمد؛ زیرا شکل مستطیل است و نقاط شبکه بر آن منطبق اند.

قبل از انجام میانبایی باید که سلول‌های شیخ انتخاب شوند. با توجه به اینکه در این مقاله از شبکه جابه‌جاشده استفاده

عدد پکلت و تابع A نیز بسته به نوع گسسته‌سازی مکانی مسئله انتخاب می‌شود. با توجه به انتخاب روش ترکیبی در مقاله، تابع مذکور به این صورت تعریف شده است:

$$A(P) = \left[\left[0, 1 - 0.5|P| \right] \right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

که تابع $[[,]]$ بزرگ‌ترین آرگمان را انتخاب می‌کند. در معادلات گسسته شده، عبارات S_C و S_P نیز ظاهر می‌شود که اجزای جمله چشمه خطی شده $(\bar{S} = S_C + S_P \Phi_P)$ می‌باشند. گرادیان فشار نیز در جمله چشمه خطی شده معادله ممتوم، نهفته است. پارامتر Φ_P متغیر وابسته در نقطه قطب است که در معادلات ممتوم، مؤلفه‌های سرعت و در معادله پیوستگی گسسته شده، مقدار اصلاح فشار را شامل می‌شود.

۶-۲. شناسایی اجسام جامد جاسازی شده در میدان

حل میدان جریانی که اجسام جامد جاسازی شده (یا موانع) در آن وجود دارد، با غیرفعال کردن حجم‌های کنترلی که بر روی این موانع قرار می‌گیرند و فعال نگه داشتن حجم‌هایی که در میدان جریان واقع می‌شوند، صورت می‌پذیرد. این عملیات با قراردادن مقادیر مناسب برای متغیر وابسته Φ در نواحی غیرفعال انجام می‌شود که در مقاله حاضر با استفاده از تکنیک مقدار بزرگ برای جمله چشمه، صورت گرفته است. در این روش هر مقدار دلخواه Φ ، (مثل مقادیر میانبایی شده برای u و v بر روی نقاط مرزی سیلندر)، می‌تواند به منزله حل میدان جریان قرار گیرد که این کار با تنظیم S_C و S_P در جمله چشمه خطی شده، به صورت زیر امکانپذیر است:

$$S_C = 10^{30} \Phi_{P, \text{desired}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$S_P = -10^{30} \quad \text{رابطه (۶)}$$

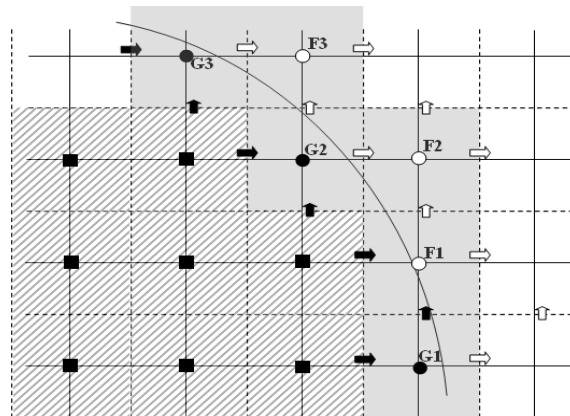
سیلندر واقع شوند (نقاط G1، G2 و G3) به سلول قطع شده، سلول شیخ گفته می‌شود مقادیر جریان نیز به کمک میانمایی در این نقاط به منزله شرط مرزی تعیین می‌شود اگر خارج مرز سیلندر واقع شوند (نقاط F1، F2 و F3) هیچ میانمایی یا تأثیری روی مقادیر آنها صورت نمی‌پذیرد و مقادیر آنها در میدان حل محاسبه خواهد شد.

این رویه برای شبکه‌های جابه‌جاشده u و v نیز صادق است و عیناً تکرار می‌شود. در شکل ۳ فلش مشکی محل‌هایی از شبکه‌های جابه‌جاشده را نشان می‌دهد که در آنها مقادیر سرعت u و v شرط مرزی (به کمک میانمایی) تعیین می‌شود و فلش توخالی محل‌هایی که مقادیر این سرعت‌ها توسط خود میدان به دست خواهد آمد. در ادامه رویه میانمایی برای مقادیر جریان در سلول‌های شیخ را توضیح داده‌ایم.

۲-۸. اعمال شرط عدم لغزش برای سیلندر

یکی از راه‌حل‌های ساده جهت اعمال شرط عدم لغزش، صفر قراردادن مؤلفه‌های سرعت در نقاط مرزی انتخاب شده در بخش قبل است (هم نقاط شیخ و هم نقاط جریان نزدیک مرز فیزیکی). این کار وقتی جواب صحیح می‌دهد که ابعاد شبکه تا بی‌نهایت ریز شود. روشن است که این امر از نظر محاسباتی امکان‌پذیر نیست. اگر با ابعاد متداول شبکه چنین کاری صورت پذیرد، توزیع فشار نوسانی در اطراف سیلندر به دست می‌آید. هدف از اجرای تکنیک سلول شیخ، جلوگیری از پدید آمدن همین توزیع فشار نوسانی است.

برای اجرای روش سلول شیخ، از میانمایی خطی پیشنهادی در مرجع [۱۶] استفاده شده است. در این مرجع فرض تغییرات خطی مقادیر جریان در نزدیک مرز فیزیکی، تقریباً دقت یکسانی با فرض تغییرات مرتبه ۲^{۱۷} دارد و دقت مرتبه دوم گسسته‌سازی معادلات را حفظ می‌کند. اگر فرض کنیم که ϕ متغیر وابسته برای مقادیر جریان (مثل فشار یا مؤلفه‌های



شکل ۳. سلول‌های قطع شده توسط مرز سیلندر و نمایش محل مؤلفه‌های سرعت در شبکه‌های جابه‌جا شده. سلول‌های هاشور خورده، سلول‌های اصلی غیرفعال اند و سلول‌های خاکستری، سلول‌های اصلی قطع شده. \blackrightarrow محل مؤلفه سرعت u برای سلول شیخ شبکه جابه‌جا شده u. $\black\bullet$ محل مؤلفه سرعت v برای سلول شیخ شبکه جابه‌جا شده v. \bullet محل محاسبه فشار در سلول شیخ شبکه اصلی. \rightarrow محل مؤلفه سرعت u در میدان جریان. \uparrow محل مؤلفه سرعت v در میدان جریان. \circ محل محاسبه فشار در سلول واقع در میدان جریان برای شبکه اصلی.

می‌شود، برای هر سلول محل محاسبه فشار و مؤلفه‌های سرعت متفاوت است. این نکته باید به‌طور جدی مدنظر قرار گیرد. مطابق شکل ۳ برای انتخاب سلول‌های قطع شده ابتدا فاصله چهار گوشه تمام سلول‌های شبکه تا مرکز قرارگیری سیلندر محاسبه شده است. اگر فاصله تمام این چهار گوشه بزرگ‌تر از شعاع سیلندر باشد، سلول خارجی است. اگر تمام چهار فاصله کوچک‌تر از شعاع باشند، سلول داخلی است. و اگر برخی بزرگ‌تر و برخی کوچک‌تر از شعاع سیلندر باشند، آنگاه سلول از نوع قطع شده است. در شکل ۳ سلول‌های قطع شده برای شبکه اصلی به رنگ خاکستری و سلول‌های قطع نشده داخلی، به صورت هاشور خورده مشخص شده‌اند. اگر محل محاسبه مقادیر جریان (مثل فشار برای شبکه اصلی)، داخل مرز

برای معادلات پیوندخورده با ترم فشار است. این روش را اولین بار Patankar [۱۷] و Spalding و Patankar [۱۸] ابداع و استفاده کردند. مهم‌ترین مراحل الگوریتم سیمپل عبارت‌اند از: حدس میدان فشار، حل معادلات ممتوم، محاسبه باقیمانده کل (b)، اصلاح فشار و سرعت، حل دیگر معادلات دیفرانسیل برای ϕ (مثلاً معادلات $K-\epsilon$ در صورت آشفتگی بودن جریان) و تکرار تمامی مراحل تا رسیدن به همگرایی کامل ($b \approx 0.0$).

۲-۱۰. معیار همگرایی

اندازه‌های باقیمانده بهترین فاکتور جهت تنظیم معیار همگرایی‌اند. این باقیمانده‌ها عبارت‌اند از: باقیمانده‌های معادلات ممتوم در جهت X و Y و همچنین باقیمانده معادله اصلاح فشار که از معادله پیوستگی به دست آمده است. مقدار بسیار کوچک برای باقیمانده معادله اصلاح فشار به معنی ارضای معادله پیوستگی و حصول اطمینان برای متوقف کردن تکرارهای الگوریتم سیمپل است. در این مقاله، شرط همگرایی، رسیدن مقدار باقیمانده کل در معادله اصلاح فشار (پیوستگی) به کمتر از مقدار 10^{-6} تنظیم شده است.

۲-۱۱. جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای

در این بخش میدان جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای جهت بررسی صحت و دقت رویه عددی مورد استفاده، حل می‌شود. همچنین نتایج عددی و آزمایشگاهی بسیاری جهت مقایسه وجود دارد که در این فصل با نتایج کار مقایسه شده‌اند. برای انجام مقایسه در این بخش (جریان در اطراف تک سیلندر) و بخش بعدی (جریان در اطراف سیلندر با صفحه منحرف کننده) پارامترهای بدون بعد مختلفی استفاده کرده‌ایم که به این صورت تعریف می‌شوند:

سرعت) باشد، آنگاه تغییرات مقادیر جریان در نزدیکی مرز طبق این رابطه است:

$$\Phi = a + bx + cy \quad \text{رابطه (۸)}$$

a، b و c ضرایب ثابت، x و y مختصات محل محاسبه ϕ است. برای اینکه مقدار ϕ در نقطه شبح (ϕ_G) تعیین شود، سه نقطه با مقدار معلوم لازم است تا در ابتدا بتوان مقدار ضرایب ثابت را تعیین کرد. سپس به راحتی می‌توان با استفاده از رابطه ۸ مقدار ϕ_G را مشخص و به منزله شرط مرزی تنظیم کرد. سه نقطه‌ای که جهت تعیین ضرایب ثابت معادله ۸ در این مقاله استفاده شده عبارت‌اند از:

نقطه روی مرز اصلی سیلندر که از محل برخورد خط گذرنده از هر نقطه شبح (G) و مرکز سیلندر، با محیط سیلندر به دست می‌آید و مقدار ϕ در آن همان شرط مرزی است. مثلاً اگر $\phi = u$ باشد و سیلندر ساکن، مقدار ϕ صفر اختیار خواهد شد. دو تا از نقاط خارجی (F) که نزدیک‌ترین نقاط به نقطه روی مرز اصلی سیلندرند و مقدار ϕ در از روی حل میدان جریان در تکرار قبلی، مشخص است.

باید توجه داشت که اگر از شبکه مرتب شده^{۱۸} به جای شبکه جابه‌جاشده استفاده می‌شد، ضرایب ثابت معادله ۸ برای متغیرهای فشار و مؤلفه‌های سرعت، یکسان بود؛ ولی به دلیل استفاده از شبکه جابه‌جاشده، محل محاسبه فشار و سرعت متفاوت است و بدین ترتیب ضرایب متفاوتی برای هر یک محاسبه خواهد شد. در این مقاله به جای استفاده از نیروی بازخورد برای تنظیم مقادیر میانجی در نقاط شبح، از روش مقدار بزرگ جمله چشمه (بخش ۲-۶) استفاده کرده‌ایم.

۲-۹. الگوریتم حل عددی

رویه حل عددی میدان جریان در این مقاله براساس روش سیمپل است. نام سیمپل برگرفته از روش شبه-ضمنی

۲-۱۱-۱- بررسی استقلال جواب‌ها از ابعاد شبکه

جهت بررسی استقلال جواب‌ها از ابعاد شبکه، چهار شبکه با ابعاد متفاوت مطالعه شده است. در این بخش استقلال نتایج از ابعاد شبکه به اثبات رسیده و نشان داده شده است که با تغییر ابعاد شبکه، تغییر چشمگیری در نتایج حاصل نمی‌شود. خلاصه نتایج این مطالعه در جدول ۱ آمده است. در این جدول ضرایب درگ فشاری، درگ اصطکاک، درگ کل و زاویه جدایش برای جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای در رینولدز ۴۰ برای چهار شبکه با ابعاد مختلف ارائه شده است. چهار نوع شبکه مذکور شامل A شبکه ریز، B شبکه استاندارد، C شبکه درشت و D شبکه خیلی درشت است. در تمام انواع فوق، شبکه در اطراف سیلندر به گونه‌ای ریزتر انتخاب شده است که برای شبکه ریز تعداد ۲۰ سلول در امتداد قطر و برای شبکه خیلی درشت تعداد ۱۰ سلول در امتداد قطر سیلندر قرار می‌گیرد.

شکل ۴ شبکه نوع A را به همراه محل سیلندر جاسازی شده در میدان، نشان می‌دهد. اجرای برنامه در شرایط غیردائمی و با گام زمانی $\Delta t = 10^{-3}$ صورت پذیرفته است. البته با توجه به اینکه در رینولدز ۴۰ جریان دائمی است، حل میدان تا رسیدن به این شرایط ادامه یافته است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، نتایج به‌طور کامل از نوع شبکه و ابعاد آن مستقل است. برای مثال ضریب درگ کل در شبیه‌سازی با شبکه نوع D برابر ۱/۴۳۶ و در شبیه‌سازی با شبکه نوع A برابر ۱/۵۲۰ به دست آمده که اختلاف این دو دقیقاً معادل ۵/۵٪ است. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که هرچه شبکه از نوع A ریزتر شود، دیگر تغییری در نتایج مشاهده نخواهد شد. برای همه شبیه‌سازی‌های بخش‌های آینده نیز از شبکه نوع A، استفاده شده است.

$$\text{Re} = \frac{\rho U D}{\mu} \quad \text{رابطه (۹) عدد رینولدز:}$$

$$C_{D} = \frac{F_{D}}{0.5 \rho U^2 D} \quad \text{رابطه (۱۰) ضریب درگ:}$$

$$C_{L} = \frac{F_{L}}{0.5 \rho U^2 D} \quad \text{رابطه (۱۱) ضریب لیفت:}$$

$$C_{P} = \frac{P}{0.5 \rho U^2} \quad \text{رابطه (۱۲) ضریب فشار:}$$

$$\text{St} = \frac{f D}{U} \quad \text{رابطه (۱۳) عدد استروهل:}$$

$$T = \frac{t U}{D} \quad \text{رابطه (۱۴) زمان بدون بعد:}$$

F_L و F_D به ترتیب نیروی درگ و لیفت (شامل درگ و لیفت فشاری و اصطکاک)، f فرکانس تولید گردابه (در رینولدزهایی که تولید گردابه وجود دارد) و t زمان است. نیروهای لیفت و درگ اصطکاک با محاسبه تانسور تنش و بردار نرمال سطح در هر نقطه مرزی روی سیلندروانتگرال‌گیری از حاصل ضرب داخلی آنها روی سطح سیلندر به دست می‌آیند. همچنین لیفت و درگ فشاری با داشتن توزیع فشار در میدان، قابل محاسبه می‌شود. عدد استروهل فرکانس بدون بعدی است که در آن گردابه‌ها از انتهای سیلندر جدا می‌شوند. فرکانس تولید گردابه (f) که در عدد استروهل وجود دارد، از روی فرکانس نوسان ضریب لیفت (فقط برای رینولدزهایی که تولید گردابه وجود دارد) به دست می‌آید.

بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه صورت‌گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های جریان در اطراف تک سیلندر استوانه در پایان این بخش معتبرسازی شده است.

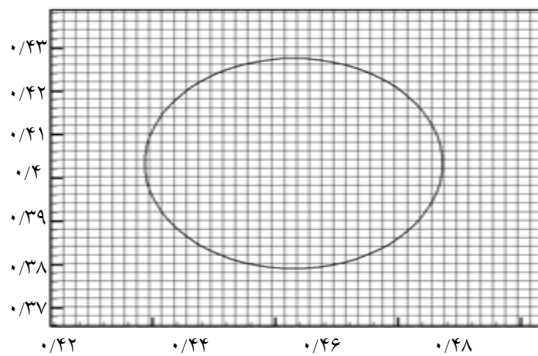
۳- نتایج و بحث

توزیع فشار در رینولدزهای ۴۰ و ۱۰۰ که در شبکه نوع A محاسبه شده‌اند، در شکل ۵ آمده است. در این شکل انطباق کامل بین کار حاضر و نتایج دیگر محققان (مراجع ۱۹-۲۱) ملاحظه می‌شود. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در این بخش نشان می‌دهند که در رینولدز ۴۰، جریان به‌صورت

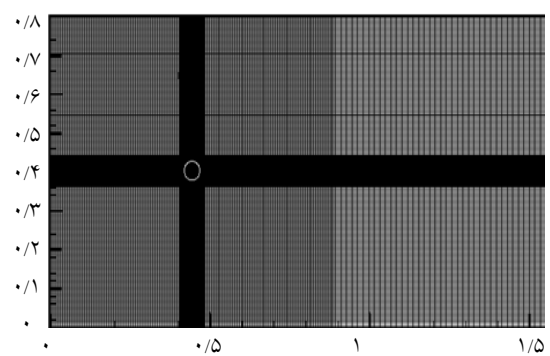
در این بخش با استفاده از پارامترهای بدون بعد تعریف شده (معادلات ۹ تا ۱۳) نتایج کار حاضر در حل میدان جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای معتبرسازی و تحلیل خواهد شد.

جدول ۱. ضرایب درگ فشاری، درگ اصطکاکی، درگ کل و زاویه جدایش برای جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای بدون صفحه منحرف‌کننده در رینولدز ۴۰ و برای شبیه‌سازی‌های A تا D، (N_D : تعداد سلول‌های شبکه در طول قطر سیلندر).

							Re=40
N_{cells}	N_D	ابعاد حوزه محاسباتی	$C_{D,p}$	$C_{D,s}$	C_D	θ_{sep}	نوع شبکه
۲۰۰×۲۰۰	۲۰	۲۰D×۴۰D	۱/۰۱۰	۰/۵۱۰	۱/۵۲۰	۱۲۶/۱	A Fine Grid
۱۶۰×۱۶۰	۱۶	۲۰D×۴۰D	۰/۹۹۸	۰/۵۰۹	۱/۵۰۷	۱۲۵/۹	B Standard
۱۲۰×۱۲۰	۱۲	۲۰D×۴۰D	۰/۹۷۵	۰/۴۹۷	۱/۴۷۲	۱۲۵/۵	C Coarse Grid
۱۰۰×۱۰۰	۱۰	۲۰D×۴۰D	۰/۹۶۷	۰/۴۶۹	۱/۴۳۶	۱۲۵/۲	D Coarser Grid



(ب)



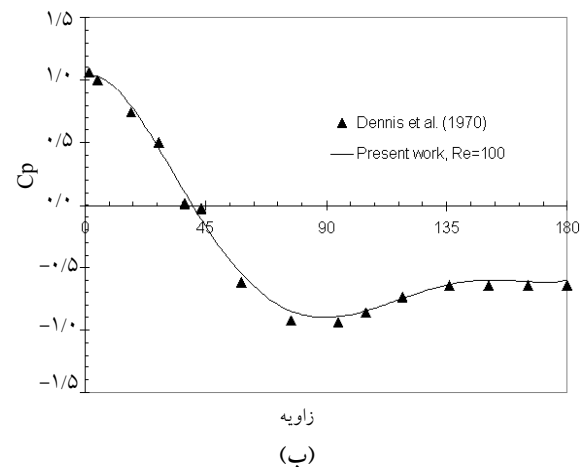
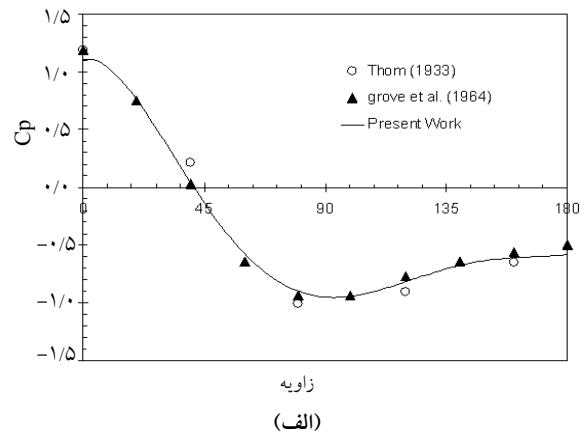
(الف)

شکل ۴. (الف) نمای کلی شبکه در میدان محاسباتی برای جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای و (ب) ناحیه بزرگنمایی شده از منطقه‌ای که سیلندر قرار دارد.

نیروی لیفت می‌شود؛ بنابراین مقدار نیروی لیفت در این رینولدز برابر صفر است. برای رینولدزهای ۱۰۰ و ۱۵۰ به بعد، توزیع فشار غیرمتقارن وجود دارد. به دلیل توزیع فشار نامتقارن و خیابان گردابه فون کارمن، ضرایب لیفت و درگ در این رینولدزها نوسان خواهند کرد و محل نقطه جدایش نیز پیوسته در حال تغییر است و نوسان می‌کند. در این شرایط، ضریب درگ با فرکانسی معادل دو برابر فرکانس نوسانی ضریب لیفت، نوسان می‌کند [۲۳].

جهت مقایسه الگوی تغییرات ضرایب لیفت و درگ با زمان، این ضرایب برحسب تابعی از زمان بدون بعد برای رینولدزهای ۴۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در شکل ۶ آمده است. ضرایب لیفت و درگ رسم شده در شکل ۶، تطابق بسیار خوبی با مراجع [۲۴، ۲۳] دارند. برای رینولدز ۴۰ ضریب درگ در ابتدا بسیار بزرگ است و سپس به سرعت به مقدار $1/52$ کاهش می‌یابد. ضریب لیفت برای این رینولدز، ثابت و برابر صفر است. این در حالی است که برای رینولدزهای ۱۰۰ و ۱۵۰ ضریب لیفت با فرکانسی معادل فرکانس ریزش گردابه، نوسان کرده و حداکثر دامنه نوسان آن به ترتیب برابر $0/27$ و $0/39$ به دست آمده است. همچنین عدد استروهاال محاسبه شده برای این اعداد رینولدز به ترتیب برابر $0/63$ و $0/179$ است که در تطابق کامل با مراجع [۲۵، ۲۲] است. از رینولدز ۱۶۰ به بالا اثرات سه بعدی در جریان ظاهر می‌شود و ماهیت جریان دیگر به طور کامل دوبعدی نیست [۲۴].

آخرین مقایسه‌ای که در خصوص تحلیل جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای صورت گرفته است، مقایسه مقدار ضریب درگ با دیگر کارهای عددی و آزمایشگاهی است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی این پارامتر در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که مشهود است کار حاضر در محدوده دقت بسیار خوب و پذیرفتنی نسبت به نتایج آزمایشگاهی و عددی دیگر محققان است.



شکل ۵. توزیع ضریب فشار برای جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای بدون صفحه منحرف‌کننده، (الف) در رینولدز ۴۰ در مقایسه با مراجع [۲۰، ۱۹] و (ب) در رینولدز ۱۰۰ در مقایسه با مرجع [۲۱].

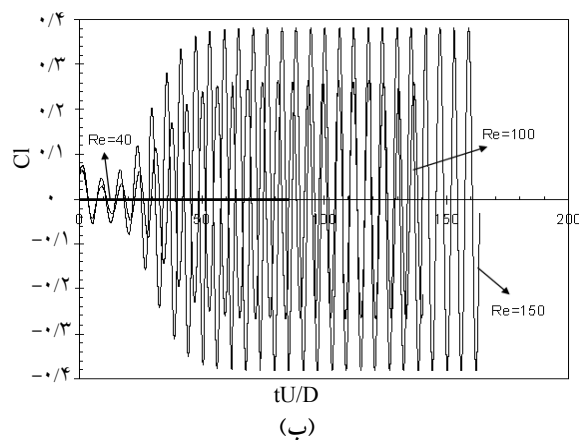
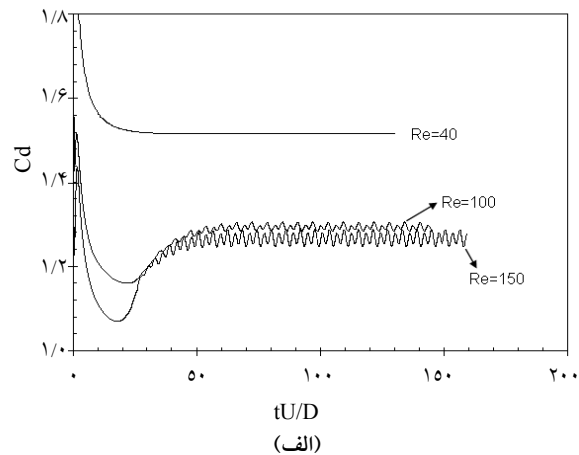
دائمی و کاملاً متقارن است. در این رینولدز دو گردابه ثابت در پشت سیلندر تشکیل شده و از انتهای سیلندر جدا نمی‌شوند. این در حالی است که در رینولدزهای بیشتر از ۴۷، گردابه‌های پشت سیلندر ناپایدار شده و از آن جدا می‌شوند [۲۲]. از این رو در رینولدزهای بالای ۴۷، در پشت سیلندر خیابان گردابه تشکیل می‌شود و جریان ماهیت غیردائمی و غیرمتقارن خواهد داشت. توزیع فشار متقارن در رینولدز ۴۰ باعث عدم ایجاد

۱-۳- جریان در اطراف سیلندر استوانه‌ای با صفحات منحرف‌کننده

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان در اطراف سیلندر استوانه‌ای به همراه صفحه‌ی منحرف‌کننده در این بخش تجزیه و تحلیل شده است. مشخصات سیال، گام زمانی، شرط همگرایی، ابعاد شبکه و سایر شرایط در این بخش دقیقاً مثل شرایط مربوط به حل میدان جریان در اطراف تک سیلندر استوانه‌ای تنظیم شده‌اند. نتایج این تحقیق در دو رینولدز ۴۰ و ۱۰۰ ارائه شده است. به دلیل اینکه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در دو رینولدز ۱۰۰ و ۱۵۰ الگوی تغییرات کاملاً مشابه دارند، نتایج مربوط به رینولدز ۱۵۰ در ادامه نیامده است. همچنین در رینولدز ۴۰ اثرات تولید گردابه وجود ندارد و بررسی این رینولدز برای تعیین میزان تأثیر صفحه‌ی منحرف‌کننده در ضریب درگ و الگوی جریان است. در پایان نیز تأثیر استفاده از دو صفحه‌ی منحرف‌کننده در پایین دست جریان ارزیابی شده است تا بتوان کاهش بیشتری در ضریب درگ ایجاد کرد.

۲-۳- تحلیل نتایج در $Re=40$

در شکل ۷ ضریب درگ در عدد رینولدز ۴۰ به ازای مقادیر مختلف Z/D و G/D نشان داده شده است. در بیشتر موارد استفاده از صفحه‌ی منحرف‌کننده نه تنها باعث کاهش ضریب درگ در این رینولدز نشده، بلکه به افزایش آن نیز منجر شده است. بررسی نحوه تغییر ضرایب درگ فشاری و درگ اصطکاکی نشان می‌دهد که تغییرات ضریب درگ بیشتر به واسطه تغییر در ضریب درگ فشاری است. در مواردی که درگ افزایش یافته، میزان افت فشار در پشت سیلندر بیشتر از حالت بدون صفحه‌ی منحرف‌کننده است و برای مواردی که درگ کاهش یافته، عکس آن اتفاق افتاده است. تنهادر منحنی‌های $Z/D=0/5$ و $0/75$ است که ضرایب درگ با مقادیری کمتر از

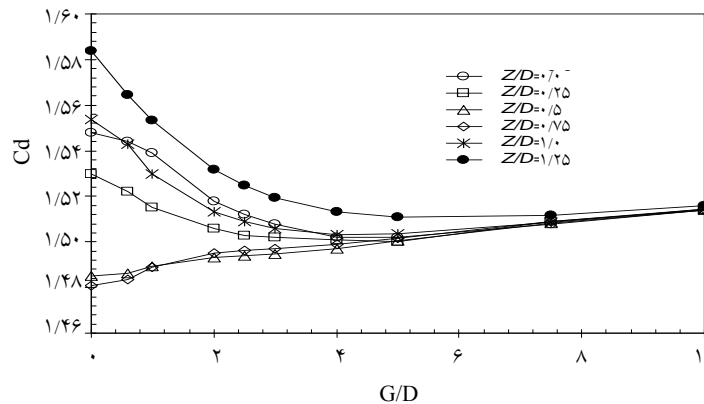


شکل ۶. ضرایب درگ و لیفت برحسب زمان بدون بعد برای جریان در اطراف تک سیلندر استوانه‌ای بدون صفحه‌ی منحرف‌کننده در رینولدزهای ۴۰، ۱۰۰ و ۱۵۰، (الف) ضریب درگ و (ب) ضریب لیفت.

در بخش بعدی، میدان جریان به همراه صفحه‌ی منحرف‌کننده، حل و نیز تجزیه و تحلیل می‌شود. همچنین جهت مقایسه نتایج، حالت سیلندر استوانه‌ای بدون صفحه‌ی منحرف‌کننده به منزله "حالت مرجع" است.

جدول ۲. مقایسه ضریب درگ به دست آمده در کار حاضر برای جریان در اطراف تک سیلندر استوانه‌ای بدون صفحه منحرّف کننده، با مقادیر به دست آمده توسط دیگر تحقیقات عددی و آزمایشگاهی.

جریان دائمی		جریان غیردائمی		توضیحات روش	مرجع
Re	C _D	Re	C _D		
۴۰	۱/۴۸	۱۰۰	۱/۲۵	آزمایشگاهی	[۲۶]
		۱۰۰	۱/۳	آزمایشگاهی	[۲۷]
۴۰	۱/۵۲	۱۰۰	۱/۳۱	شبکه قطبی، روش اختلاف محدود	[۲۸]
۴۰	۱/۵۱	۱۰۰	۱/۳۳	شبکه قطبی، روش اختلاف محدود	[۲۹]
۴۰	۱/۵۴	۱۰۰	۱/۳۹	شبکه کارتیزین، روش المان محدود، روش مرز غوطه‌ور	[۲۴]
		۱۵۰	۱/۳۷		
		۱۰۰	۱/۳۳	شبکه قطبی، روش اختلاف محدود	[۲۳]
۴۰	۱/۵۲			شبکه کارتیزین مرتب شده، روش حجم محدود، تکنیک سلول قطع شده	[۱۵]
۴۰	۱/۵۲	۱۰۰	۱/۲۹	شبکه کارتیزین جابه‌جا شده، روش حجم محدود، روش سلول شبح	(کار حاضر)
		۱۵۰	۱/۲۷		



شکل ۷. تغییرات ضریب درگ با تغییر محل صفحه منحرّف کننده در عدد رینولدز ۴۰.

مقدار حالت مرجع (بدون صفحه منحرّف کننده) مشاهده می‌شود. بدترین حالت متعلق به $Z/D=0$ و $G/D=0$ است که در آن ضریب درگ بیشترین افزایش را معادل ۴/۲٪ نسبت به حالت مرجع داشته است. بیشترین کاهش در ضریب درگ نیز در حالت $Z/D=0$ و $G/D=0$ به دست آمده که معادل ۲/۶٪ نسبت به حالت مرجع است که البته مقدار ناچیزی است. الگوی

مقدار حالت مرجع (بدون صفحه منحرّف کننده) مشاهده می‌شود. بدترین حالت متعلق به $Z/D=0$ و $G/D=0$ است که در آن ضریب درگ بیشترین افزایش را معادل ۴/۲٪ نسبت به حالت

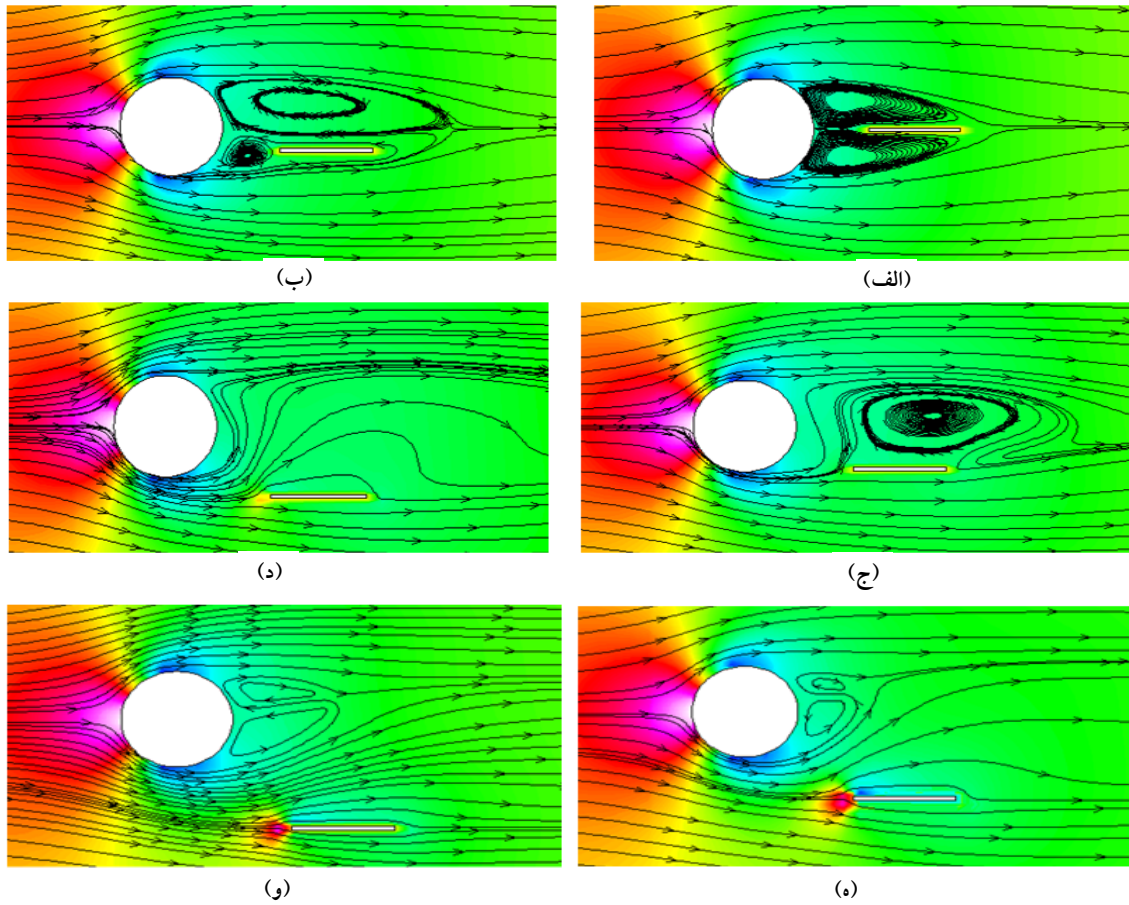
لذا شرایط به حالت قبل باز می‌گردد. البته در این دو حالت به دلیل عدم تقارن در توزیع فشار (شکل ۸e,f) مقداری نیروی لیفت نیز پدید می‌آید که مقدار ضریب آن به ترتیب برابر ۰/۰۶- و ۰/۰۳۴- به دست آمده است.

۳-۳. تحلیل نتایج در $Re=100$

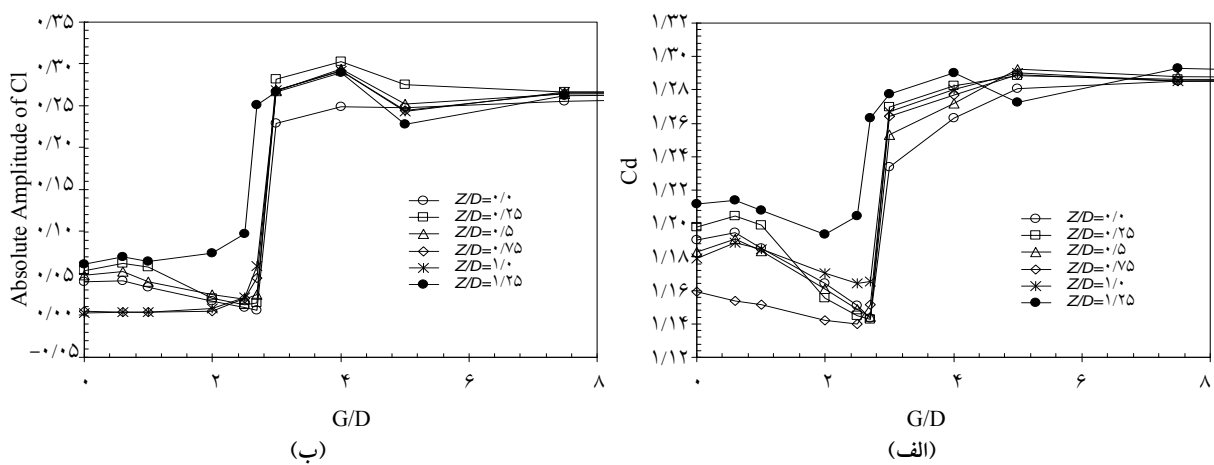
در شکل ۹ ضریب درگ و قدرمطلق دامنه نوسان ضریب لیفت در عدد رینولدز ۱۰۰ و مقادیر مختلف Z/D و G/D آمده است. قرار گرفتن صفحه منحنی‌کننده در پایین دست جریان با از بین بردن نظم تولید گردابه موجب به کاهش چشمگیری ضریب درگ شده است. علت این امر افزایش میزان فشار منفی پشت سیلندر می‌باشد. همچنین قرار گرفتن منحنی‌کننده در پایین دست جریان، با محدود کردن دنباله سیلندر در مقادیر پایین G/D باعث جلوگیری از پدید آمدن گردابه و در نتیجه سرکوب پدیده ریزش گردابه شده است. این امر ضریب لیفت را به شدت کاهش داده و نوسانات آن را محدود کرده است؛ لذا مکانیزم اصلی منحنی‌کننده، از بین بردن نظم ریزش گردابه بوده است. در یک مقدار ثابت Z/D ، با دور کردن صفحه از سیلندر (افزایش G/D) میزان ضریب درگ کاهش یافته تا اینکه به حداقل مقدار خود برسد، این مقدار G/D مقدار بحرانی نامیده می‌شود. در مقادیر بیشتر از مقدار بحرانی، افزایش ناگهانی در ضرایب لیفت و درگ دیده شده تا اینکه با افزایش بیشتر فاصله صفحه تا سیلندر، لیفت و درگ به مقادیر مربوط به حالت مرجع (سیلندر تنهای بدون منحنی‌کننده) می‌رسند. مقدار فاصله افقی بحرانی در تمامی فواصل عمودی به استثنای $Z/D=1/25$ تقریباً یکسان و برابر $G/D=2/7$ به دست آمده است. یعنی مقادیر بحرانی فاصله افقی صفحه از سیلندر تقریباً از فاصله عمودی آن نسبت به سیلندر مستقل است. هنگامی که $Z/D=1/25$ است، مقدار بحرانی فاصله افقی در $G/D=2/5$ محاسبه شده است.

تغییرات ضریب درگ با فاصله افقی بین سیلندر و صفحه منحنی‌کننده (G/D) در منحنی‌های $Z/D=0/5$ و $0/75$ تقریباً به صورت یک خط صاف است که با کاهش فاصله افقی، مقدار ضریب درگ نیز در آن کاهش می‌یابد. این الگو برای سایر منحنی‌های $Z/D=cte$ به گونه‌ای است که با کاهش فاصله افقی بین سیلندر و صفحه منحنی‌کننده از آن، ضریب درگ به طور غیرخطی افزایش می‌یابد.

در شکل ۸ توزیع فشار به همراه خطوط جریان در رینولدز ۴۰ به ازای مقادیر مختلف Z/D و مقدار ثابت $G/D=0/6$ رسم شده است. شایان ذکر است که نمودارهای مذکور در زمانی رسم شده که جریان به شرایط دائمی خود رسیده است. در شرایطی که صفحه منحنی‌کننده در پشت سیلندر وجود ندارد، یا درست بر روی خط مرکزی سیلندر ($Z/D=0$) است (شکل ۸a)، دو گردابه بزرگ و ثابت در پشت سیلندر به صورت متقارن تشکیل می‌شود. این گردابه‌ها به انتهای سیلندر متصل هستند. در حالتی که $Z/D=0/25$ (شکل ۸b) است، تقارن میان دو گردابه به هم خورده و گردابه پایینی با شکل متفاوتی تشکیل شده است. در هر دو مورد، کاهش فشار در پشت سیلندر به افزایش ضریب درگ منجر شده است. در فاصله عمودی $Z/D=0/5$ نحوه قرارگیری صفحه منحنی‌کننده به گونه‌ای است که به جداسدن گردابه‌ها از پشت سیلندر منجر می‌شود و در این موارد دیگر گردابه‌ها به سیلندر چسبیده نیستند. در $Z/D=0/75$ حتی گردابه‌ای هم در پشت سیلندر تشکیل نشده است. به عبارتی صفحه درست در جایی واقع شده که در مقادیر پایین G/D فاصله مناسب جهت شکل‌گیری گردابه در پشت سیلندر نیست. درست به همین دلیل، عدم تشکیل مناسب گردابه و نهایت افزایش فشار پشت، ضریب درگ در این حالت‌ها (شکل ۸c,d) نسبت به موارد دیگر کاهش چشمگیری یافته است. در فواصل عمودی $Z/D=1$ و $Z/D=1/25$ مجدداً دو گردابه به انتهای سیلندر متصل می‌شوند و از آن جدا نمی‌شوند؛



شکل ۸. توزیع فشار و خطوط جریان در عدد رینولدز ۴۰ و $G/D=0.6$. (الف) $Z/D=0$ (ب) $Z/D=0.25$ (ج) $Z/D=0.5$ (د) $Z/D=0.75$ (ه) $Z/D=1$ (و) $Z/D=1.25$



شکل ۹. تغییرات ضرایب درگ و لیفت با تغییر محل صفحه منحرف‌کننده در عدد رینولدز ۱۰۰، (الف) ضریب درگ و (ب) حداکثر دامنه ضریب لیفت.

تمامی موارد، بعد از مقادیر بحرانی، با افزایش فاصله افقی مقادیر عدد استروهال به مقادیر حالت مرجع همگرا می‌شوند.

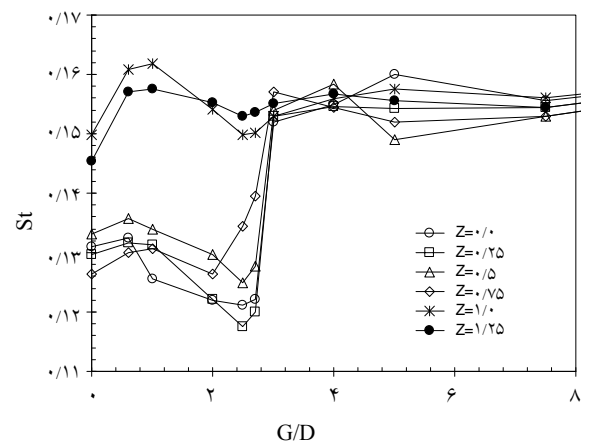
در شکل ۱۱ میدان چرخش برای رینولدز ۱۰۰ و $G/D=2$ به‌ازای مقادیر مختلف Z/D در لحظه $U/D=110$ نشان داده شده است. در شرایطی که صفحه منحرف‌کننده در میدان وجود ندارد (حالت مرجع)، خیابان گردابه در پشت سیلندر تشکیل می‌شود که گردابه‌های آن اندازه و قدرت چشمگیری دارند (شکل ۱۱a). با اضافه کردن صفحه منحرف‌کننده، خیابان گردابه تحت تأثیر قرار گرفته و گردابه‌ها با اندازه کوچک‌تری تشکیل می‌شوند. تا اینکه در $Z/D=0.75$ و $Z/D=1$ اندازه گردابه‌ها به حداقل رسیده (شکل f و ۱۱e) و درست در همین شرایط نیز دامنه نوسان ضریب لیفت تا حد صفر کاهش یافته و بسیار ناچیز است (شکل ۹b). در $Z/D=1.25$ مجدداً گردابه با ابعاد بزرگ شکل گرفته و به‌طور منظم از پشت سیلندر ریزش گردابه وجود دارد. البته ریزش گردابه در این حالت، بیشتر از قسمت فوقانی سیلندر است نه قسمت تحتانی آن. در این حالت نسبت به دیگر حالات کمترین کاهش در ضریب لیفت و همچنین درگ، مشاهده شده است.

در شکل ۱۲ میدان چرخش وابسته به زمان برای رینولدز ۱۰۰، $G/D=2$ و $Z/D=0.75$ نشان داده شده است. این شکل نشان‌دهنده نحوه توسعه جریان از شروع تا رسیدن به شرایطی است که الگوی جریان به‌طور منظم تکرار می‌شود، فاصله صفحه منحرف‌کننده تا سیلندر به‌گونه‌ای است که مانع ریزش منظم گردابه به‌خصوص از سمت پایین سیلندر شده است. همچنین به‌واسطه تشکیل لایه مرزی بر روی سطح سیلندر، در نواحی نزدیک به آن جریان به‌شدت برشی است. در این مناطق با انتقال انرژی به گردابه‌ها، قدرت آنها افزایش می‌یابد و سپس گردابه‌ها به‌واسطه اتلاف ناشی از چسبندگی به‌خصوص در پایین دست‌های دورتر، انرژی خود را از دست می‌دهند و مستهلک می‌شوند. به‌طور کلی استفاده از صفحه منحرف‌کننده

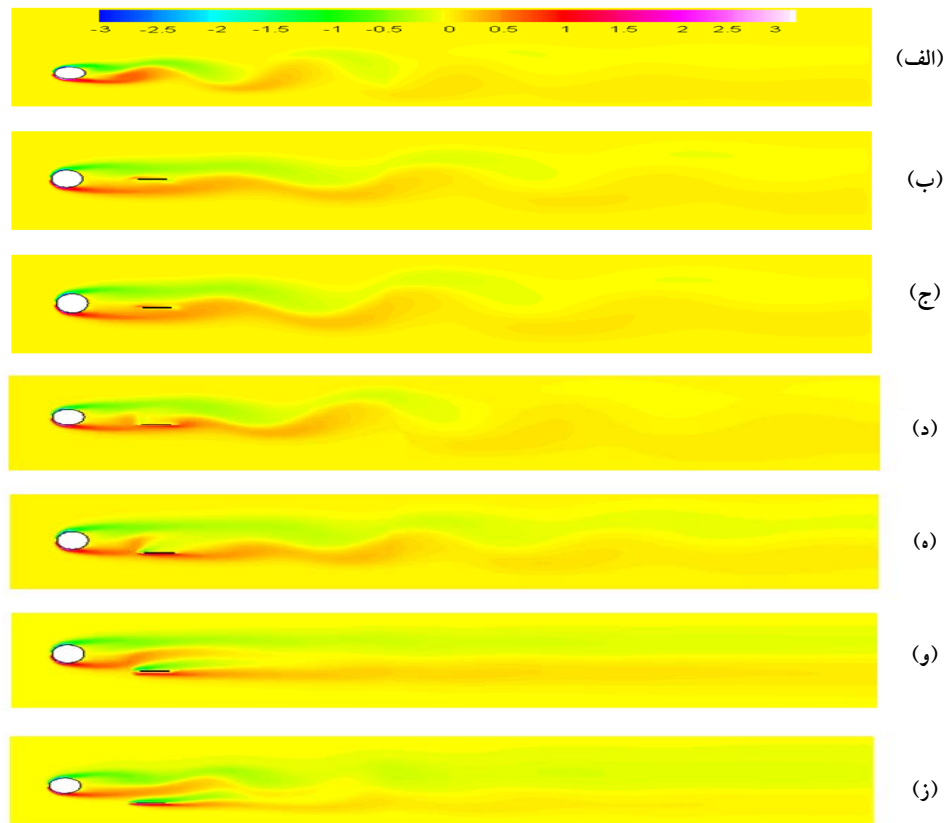
بیشترین کاهش در مقادیر درگ و لیفت هنگامی است که فاصله عمودی در $Z/D=0.75$ تنظیم شده باشد. در این حالت ریزش گردابه نیز به‌طور کامل سرکوب شده و ماکزیمم دامنه نوسان ضریب لیفت نیز تقریباً صفر شده است. این امر نشان‌دهنده تبدیل الگوی نامتقارن توزیع فشار به الگوی متقارن است که به عدم تولید نیروی لیفت منجر شده است.

برای حالت قرارگیری صفحه در خط مرکزی سیلندر ($Z/D=0$) هنگامی که سیال هوا انتخاب شده باشد، میزان فاصله افقی بحرانی برابر $G/D=2/6$ به‌دست آمده است [۱۳]. این درحالی است که این مقدار در شرایط شبیه‌سازی کار حاضر با سیال آب برابر با $G/D=2/7$ محاسبه شده است و این مقدار برای شرایط مربوط به استفاده از یک سیلندر کنترلی کوچک‌تر در پایین دست جریان، $G/D=3$ است [۲].

در شکل ۱۰ تغییرات عدد استروهال نیز به‌ازای مقادیر مختلف فواصل عمودی و افقی صفحه منحرف‌کننده تا سیلندر در رینولدز ۱۰۰ آمده است. الگوی تغییر عدد استروهال برای بیشتر مقادیر Z/D ، یکسان است؛ به‌جز مقادیر $Z/D=1$ و $Z/D=1.25$. این امر با نتایج موجود در مرجع [۲] نیز انطباق کامل دارد. در



شکل ۱۰. تغییرات عدد استروهال با تغییر محل صفحه منحرف‌کننده در عدد رینولدز ۱۰۰.



شکل ۱۱. میدان چرخش در رینولدز ۱۰۰، لحظه $tU/D=110$ و $G/D=2$ ، (الف) بدون صفحه منحرّف کننده، (ب) $Z/D=0$ ، (ج) $Z/D=0.25$ ، (د) $Z/D=0.5$ ، (ه) $Z/D=0.75$ ، (و) $Z/D=1$ و (ز) $Z/D=1.25$

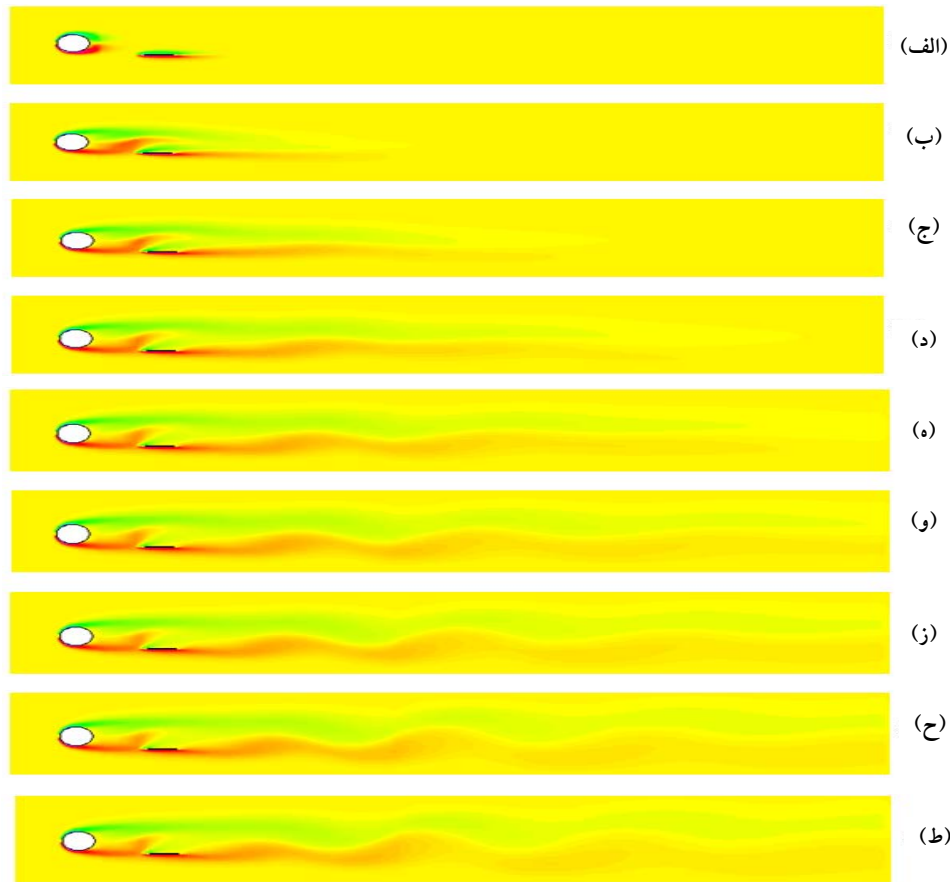
ولی هنگامی که صفحه خارج از خط مرکزی است و به طور نامتقارن قرار گرفته، ناحیه بالایی صفحه برش بیشتری نسبت به ناحیه پایینی دارد.

۳-۴. استفاده از دو صفحه منحرّف کننده

بهترین حالت پیشنهادی جهت استفاده از صفحه منحرّف کننده در $Z/D=0.75$ است. در این شرایط بیشترین کاهش در ضرایب لیفت و درگ حاصل شده است. به نظر می رسد جهت کاهش بیشتر در ضریب درگ بتوان از دو صفحه منحرّف کننده در

در خارج از محور مرکزی سیلندر، مانع تشکیل درست گردابه با قدرت بالا شده و این امر موجب به کاهش چشمگیر ضریب لیفت شده است. لازم به توضیح است که الگوی کاملاً غیرمتقارن فشار موجب می شود که متوسط زمانی نیروی لیفت برخلاف حالت مرجع دیگر برابر صفر نباشد.

از دیگر نتایج عدم تأثیر صفحه منحرّف کننده بر الگو و مشخصات بالادست جریان است. همچنین هنگامی که صفحه بر روی خط مرکزی سیلندر جابه جا می شود، نواحی برشی در بالا و پایین صفحه به طور مساوی و متقارن تشکیل شده است؛



شکل ۱۲. میدان چرخش در رینولدز ۱۰۰، $Z/D=0/75$ و $G/D=2$. (الف) $tU/D=1$ ، (ب) $tU/D=13$ ، (ج) $tU/D=27$ ، (د) $tU/D=41$ ، (ه) $tU/D=55$ ، (و) $tU/D=68$ ، (ز) $tU/D=82$ ، (ح) $tU/D=96$ و (ط) $tU/D=110$

پایین دست جریان استفاده کرد که نسبت به خط مرکزی سیلندر در آینه یکدیگر قرار گرفته باشند. انتظار می رود چنین کاری اثر استفاده از صفحه منحرف کننده را دو برابر کند و ضریب درگ نیز به مقدار بیشتری کاهش یابد.

جهت اثبات این نظریه، ضریب درگ برای حالت استفاده از دو صفحه منحرف کننده در $Z_1/D=0/75$ و $Z_2/D=0/75$ که به طور کاملاً متقارن و موازی نسبت به خط مرکزی سیلندر در پایین دست آن قرار گرفته اند در شکل ۱۳

رسم شده است.

توانسته ایم با استفاده از دو صفحه منحرف کننده به کاهش بیشتری در ضریب درگ دست یابیم. بیشترین کاهش در ضریب درگ مربوط به $G/D=0$ است که در آن ضریب درگ به میزان ۲۰٪ نسبت به حالت مرجع کاهش یافته است. البته لازم به توضیح است که این مقدار از $3/38/6$ به دست آمده توسط دو صفحه منحرف کننده یکی در بالادست و دیگری در پایین دست جریان [۱۳] کمتر است.

درگ، عدد استروهاال، منطقه جدایش و خیابان گردابه تطابق بسیار خوبی با نتایج سایر محققان نشان داد.

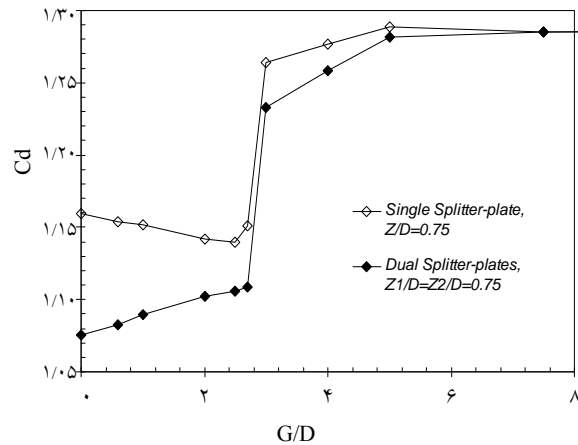
تحلیل میدان جریان در اطراف سیلندر استوانه‌ای با صفحه منحرف‌کننده نیز، با حل جریان در رینولدزهای ۴۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ صورت پذیرفت که خلاصه مهم‌ترین نتایج حاصل آن به این صورت است:

۱. در رینولدز ۴۰، صفحه منحرف‌کننده نه تنها باعث کاهش ضریب درگ در این رینولدز نشد، بلکه به افزایش آن نیز منجر شده است. در این رینولدز الگوی تغییرات ضریب درگ با کاهش فاصله افقی بین سیلندر و صفحه منحرف‌کننده (G/D) به گونه‌ای است که در منحنی‌های $Z/D=0.5$ و $Z/D=0.75$ به صورت خطی کاهش می‌یابد برای سایر منحنی‌های $Z/D=0.25$ ، $Z/D=0.1$ ، $Z/D=0.125$ به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. این درحالی است که تغییرات مذکور بسیار کوچک و غیر قابل توجه است.

۲. استفاده از صفحه منحرف‌کننده در خارج از محور مرکزی سیلندر، باعث عدم تقارن در توزیع فشار در رینولدز ۴۰ شده و لذا در این شرایط مقداری نیروی لیفت نیز پدید آمده است.

۳. در رینولدز ۱۰۰ ضرایب لیفت و درگ وابستگی بسیاری به Z و G دارد و در مقادیر مشخصی از آنها، به حداقل مقدار خود کاهش می‌یابد. مقدار فاصله افقی بحرانی در تمامی فواصل عمودی به استثنای $Z/D=1/25$ تقریباً یکسان و برابر $G/D=2/7$ به دست آمده است. هنگامی که $Z/D=1/25$ است، مقدار بحرانی فاصله افقی در $G/D=2/5$ محاسبه شده است.

۴. مکانیزم اصلی صفحه منحرف‌کننده، از بین بردن نظم ریزش گردابه در پایین دست جریان است. در $Z/D=0.75$ و $Z/D=1$ ریزش گردابه سرکوب شده، دامنه ضریب لیفت تا حد صفر کاهش یافته و بسیار ناچیز است.



شکل ۱۳. تغییرات ضریب درگ با G/D در رینولدز ۱۰۰ و $Z/D=0.75$ برای دو حالت تک صفحه منحرف‌کننده و دو صفحه منحرف‌کننده در آینه یکدیگر نسبت به خط مرکزی سیلندر.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله میدان جریان در اطراف سیلندر استوانه‌ای با صفحات منحرف‌کننده به صورت عددی حل شد. روش مورد استفاده، حجم محدود بر مبنای یک روش ترکیبی و کاملاً ضمنی در گسسته‌سازی معادلات حاکم در شبکه‌کارتزین-جابه‌جا شده با الگوریتم سیمپل بوده است. الگوریتم مناسبی جهت انتخاب سلول‌های شبح، به کار گرفته شد. سپس با استفاده از میانبایی، مقادیر جریان برای سلول‌های شبح به گونه‌ای تعیین شد که شرط عدم لغزش درست بر روی مرز سیلندر استوانه‌ای ارضا شود. برای اعمال مقادیر مذکور از تکنیک مقدار بزرگ برای جمله چشمه استفاده کردیم. روش توسعه‌یافته در این مقاله هزینه‌های محاسباتی بسیار کمتری نسبت به روش‌های مشابه دارد. برای کالیبراسیون برنامه و بررسی صحت نتایج، میدان جریان در اطراف تک‌سیلندر استوانه‌ای در رینولدزهای ۴۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ معتبرسازی شد. پارامترهای کلیدی جریان همچون ضریب لیفت، ضریب

- Flow-Induced Forces on a Circular Cylinder Using a Detached Splitter-Plate”, *J. of Phys. Fluids*, Vol. 15 No. 8 (2003) 2433-2436.
13. Hwang, J.Y. and Yang, K.S., “Drag Reduction on a Circular Cylinder Using Dual Detached Splitter-Plates”, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95 (2007) 551-564.
 14. Patankar S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York, (1980).
 15. Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H.S. and Shyy, W., “An Accurate Cartesian Grid Method for Viscous Incompressible Flows with Complex Immersed Boundaries”, *J. of Computational Physics*, Vol. 156 (1999) 209-240.
 16. Tseng, Y.H. and Ferziger, J.H., “A Ghost-Cell Immersed Boundary Method for Flow in Complex Geometry”, *J. of Computational Physics*, Vol. 192 (2003) 593-623.
 17. Patankar, S.V., Numerical Prediction of Three-Dimensional Flows, Studies in Convection: Theory, Measurement, and Applications, B.E. Launder (ed.), Academic, New York, Vol. 1 (1975).
 18. Patankar, S.V. and Spalding, D.B., “A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Tree-Dimensional Parabolic Flows”, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 15 (1972) 1787.
 19. Thom, A., “Numerical Solution for the Flow around a Cylinder at Reynolds Numbers of 40, 200 and 500”, *J. of Proc. Roy. Soc. A.*, Vol. 141 (1933) 651-669.
 20. Grove, A.S., Shair, F.H., Petersen, E.E. and Acrivos, A., “An Experimental Investigation of the Steady Separated Flow Past a Circular Cylinder”, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 19 (1964) 60-80.
 21. Dennis, S.C.R. and Chang, G., “Numerical Solutions for Steady Flow Past a Circular Cylinder at Reynolds Numbers up to 100”, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 42 (1970) 471-489.
 22. Williamson, C.H.K., Vortex Dynamics in the Cylinder Wake, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 28 (1996) 477-539.
 23. Wanderley, J.B.V. and Levi, C.A., “Validation of a Finite Difference Method for the Simulation of Vortex-Induced Vibrations on a Circular Cylinder”, *J. of Ocean Engineering*, Vol. 29 (2002) 445-460.
 24. Lima, E. Silva, A.L.F., Silveira-Neto, A. and Damasceno, J.J.R., “Numerical Simulation of two-Dimensional Flows Over a Circular Cylinder using the Immersed Boundary Method.”, *J. of Computational Physics*, Vol. 189 (2003) 351-370.
 25. Roshko, A., “On the Wake and Drag of Bluff Bodies”, *J. of Aeronaut. Sci.*, Vol. 22 (1955) 124.
 26. Tritton, D.J., “Experiments On the Flow Past A Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers.”, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 6 (1959) 547-567.
 27. Henderson, R.D., “Details of the Drag Curve Near the Onset of Vortex Shedding”, *J. of Phys. Fluids*, Vol. 7 (1995) 2102-2104.
 28. Kravchenko, A.G., Moin, P. and Shariff, K., “B-Spline Method and Zonal Grids for Simulations of Complex Turbulent Flows”, *J. of Comp. Phys.*, Vol. 151 (1999) 757-789.
 29. Park, J., Kwon, K. and Choi, H., “Numerical Solutions Of Flow Past A Circular Cylinder At Reynolds Number Up To 160”, *Int. J. of KSME*, Vol. 12 (1998) 1200.
۵. استفاده از دو صفحه منحرّف کننده در پایین دست جریان که نسبت به خط مرکزی سیلندر در آینه یکدیگر قرار گرفته باشند در $Z_1/D=0.75$ و $Z_2/D=0.75$ به کاهش بیشتری در ضریب درگ منجر شده و در بهترین حالت آن را در $G/D=0$ ، 20% نسبت به حالت مرجع کاهش داده است.

مراجع

1. Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R., “On the Formation and Suppression of Vortex Shedding at Low Reynolds Numbers”, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 218 (1990) 74-107.
2. Ozono, S., “Vortex Suppression of the Cylinder Wake by Deflectors”, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91 (2003) 91-99.
3. Dipankar, A., Sengupta, T.K. and Talla, S.B., “Suppression of Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder by Another Control Cylinder at Low Reynolds Numbers.”, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 573 (2006) 1-20.
4. Mittal, S. and Raghuvanshi, A., “Control of Vortex Shedding Behind Circular Cylinder for Flows at Low Reynolds Numbers”, *Int. J. of Numer. Meth. Fluids*, Vol. 35 (2001) 421-447.
5. Dalton, C. and Xu, Y., “The Suppression of Lift on a Circular Cylinder Due to Vortex Shedding at Moderate Reynolds Numbers.”, *J. of Fluids and Structures*, Vol. 15 (2001) 617-628.
6. Lei, C., Cheng, L., Armfield, S.W. and Kavanagh, K., “Vortex Shedding Suppression for Flow over a Circular Cylinder near a Plane Boundary”, *J. of Ocean Engineering*, Vol. 27 (2000) 1109-1127.
7. Rathakrishnan, E., “Effect of Splitter-Plate on Bluff Body Drag”, *AIAA J.*, Vol. 37 No. 9 (1999) 1125-1126.
8. Anderson, E.A. and Szewczyk, A.A., “Effect of a Splitter on the Near Wake of a Circular Cylinder in 2 and 3 Dimensional flow Configurations”, *J. of Exp. Fluids*, Vol. 23 (1997) 161-174.
9. Kwon, K., and Choi, H., “Control of Laminar Vortex Shedding behind Circular Cylinder Using Splitter-Plates”, *J. of Phys. Fluids*, Vol. 8 (1995) 479-486.
10. Ozono, S., “Flow Control of Vortex Shedding by a Short Splitter-Plate Asymmetrically Arranged Downstream of a Circular Cylinder”, *J. of Phys. Fluids*, Vol. 11 No. 10 (1999) 2928-2934.
11. Ozono, S., “Flow Control of Vortex Shedding by Asymmetrically Arranged Plates”, *J. of Theoret. Appl. Mech.*, Vol. 49 (2000) 191-196.
12. Hwang, J.Y., Yang, K.S. and Sun, S.H., “Reduction of