



## بررسی عددی جریان عبوری از یک استوانه دایره‌ای زیر سطح آزاد با روش حجم سیال

سید مصطفی حسینعلی‌پور<sup>\*</sup>، نوید حاجی غفوری بوکانی

دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۴ آذر ۱۳۹۳  
بازنگری: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۷ تیر ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

جریان سطح آزاد  
روش حجم سیال  
رهايش گردابه  
حل عددی  
عدد استروهل

**چکیده:** در این تحقیق، جریان گذرنده از یک استوانه دایره‌ای دوبعدی ثابت، نزدیک یک سطح آزاد در عدد رینولدز ۱۸۰ و عدد فرود ۰/۲ در نسبت فاصله‌های گوناگون از سطح آزاد سیال، بطور عددی بررسی شده است. برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال استفاده شده است. معادلات پیوستگی و مومنتم با روش حجم محدود توسط کد تجاری فلونت حل شده‌اند. برای اعداد فرود پایین که نشان‌دهنده تأثیر غالب گرانش و تغییر شکل ناچیز سطح آزاد هستند، نتایج دارای شباهت‌های بسیاری با مسئله جریان حول استوانه نزدیک یک دیواره بدون لغزش است، بگونه‌ای که مکانیزم رهايش گردابه یکسانی برای آنها می‌توان پیش‌بینی نمود. زمانیکه فاصله بین استوانه و سطح آزاد کاهش می‌یابد، عدد استروهل در نسبت فاصله ۰/۷ به حد اکثر مقدار خود می‌رسد، کاهش بیشتر نسبت فاصله، موجب کاهش عدد استروهل شده، در نسبت فاصله ۰/۱۶ اساساً پدیده رهايش گردابه به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. در این تحقیق به بررسی کانتورهای سرعت، فشار و ضرایب آیرودینامیکی در نسبت فاصله‌های مختلف پرداخته شده و تأثیر سطح آزاد سیال بر هیدرودینامیک جریان در اعداد فرود پائین مطالعه شده است.

### ۱- مقدمه

جریان عبوری از یک استوانه دایره‌ای نزدیک سطح آزاد سیال، دارای اهمیت وافری در طراحی سازه‌های دور از ساحل، زیردریایی‌ها، خطوط لوله و سیستم‌های تولید توان بر مبنای انرژی آب دارد. با آنکه تحقیقات متعددی در تمرکز بر تغییرات پارامترهای مختلف این جریان انجام شده، ولی هنوز با جزئیات کامل بررسی نشده است، حال آنکه در جریان حول یک استوانه در سیال نامحدود، تحقیقات کاملی موجود است. این تحقیق که به نوعی شبیه‌ساز جریان حول خطوط لوله نزدیک سطح آزاد دریاست، مدل عددی کارآمدی را در تحلیل جریان‌های دارای سطح آزاد و رژیم جریان آرام ارائه می‌دهد که در آن بطور خاص به تأثیر سطح آزاد بر پروفیل سرعت، فشار و گردابه حول استوانه، ضرایب آیرودینامیکی و شکل رهايش گردابه می‌پردازد. مسئله جریان عبوری از یک استوانه، نزدیک به یک مرز بدون لغزش، نکته مفید مشابهی را برای مطالعه حاضر فراهم می‌سازد. بیرمن و دراکویچ [۱]، پاسخ فرکانسی یک استوانه نزدیک به یک مرز بدون لغزش را بررسی کردند، جی‌اکتون [۲]، برای همین جریان دریافت، زمانیکه نسبت فاصله از مرز به ۰/۵ کاهش می‌یابد، افزایش ابتدایی در عدد استروهل به همراه یک کاهش در نسبت فاصله‌های کوچکتر رخ می‌دهد. شریدان و همکاران [۳ و ۴]، با بررسی آزمایشگاهی جریان حول یک استوانه نزدیک سطح آزاد، با ثابت نگه‌داشتن عمق استوانه و تغییر سرعت جریان آزاد، اثر تغییرات عدد فرود بر

تغییر شکل سطح آزاد سیال را مطابق شکل ۱ مشاهده کردند.

ریچل و همکاران [۵ و ۶]، بصورت دو بعدی، جریان عبوری از یک استوانه نزدیک به سطح آزاد را با یک رویکرد عددی بررسی کردند و در آن به اثرات نسبت فاصله و عدد فرود با هم با جزئیات تغییرات پارامترهای فیزیکی تمرکز کردند و به تشابه نتایج در اعداد فرود پایین به جریان نزدیک به یک مرز بدون لغزش در مراجع [۱ و ۲]، اشاره داشتند. واربورتون و کارنیاداکیس [۷]، با یک شبیه‌سازی عددی، نتیجه گرفتند که ویژگی‌های جریانی مشاهده شده توسط شریدان و همکاران [۳]، کاملاً دو بعدی هستند؛ آنها اطلاعات بسیاری در مورد نحوه تغییر نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر استوانه ارائه دادند، ریچل و همکاران [۸ و ۵] نیز نتایج مشابهی بدست آوردند.

در ادامه مطالعات فوق، در این مقاله با بررسی کانتورهای سرعت، خطوط جریان، فشار و نمودارهای ضرایب برآ و پسا، بررسی جامعی از جریان حول استوانه نزدیک سطح آزاد سیال در اعداد فرود پایین و شباهت‌های آن با حالت وجود دیواره بدون لغزش بجای سطح آزاد سیال، بصورت کمی و کیفی ارائه می‌شود.

### ۲- مدل‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی، جریان دو بعدی گذرنده از یک استوانه نزدیک سطح آزاد سیال در عدد رینولدز ۱۸۰ و عدد فرود ۰/۲ انتخاب شده است، بنابراین

$$St = fd / U \quad (۳)$$

$$We = \rho u^2 d / \sigma \quad (۴)$$

برای شبیه‌سازی، نسبت چگالی و لزجت آب به هوا، هر دو برابر ۱۰۰ و بجای مقادیر واقعی آنها در نظر گرفته می‌شوند. مطابق کار ریچل و همکاران [۵]، با اینکار هزینه محاسباتی کاهش یافته و تاثیر سیال سبک‌تر کم می‌شود.

### ۳- شبیه‌بندی مسئله

در این مسئله، دو ناحیه از شبکه‌بندی ریزتری بهره‌مند می‌شوند؛ ناحیه گردابه استوانه و محل سطح آزاد سیال. شکل ۳ شبکه‌بندی مسئله را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه جریان در اطراف استوانه اهمیت بیشتری دارد، در یک ناحیه مربعی حول استوانه از شبکه سازمان‌یافته و در سایر نواحی از یک شبکه غیر سازمان‌یافته مثلثی استفاده شده است. در رابطه با کیفیت شبکه، فاکتور کیفیت تعامد بررسی می‌شود که از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند و هر چه به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده کیفیت کمتر شبکه است. برای شبکه‌بندی این تحقیق، حداقل کیفیت تعامد ۰/۵۵ است. در ضمن حداکثر میزان نسبت منظری ۶/۴۴ می‌باشد. برای بررسی تاثیر تغییر تعداد مش‌ها، دو شبکه‌بندی مختلف در عدد فرود ۰/۴ مطابق با جدول ۱ بررسی شده است. علت استفاده از عدد فرود ۰/۴، میزان تغییر شکل بیشتر سطح آزاد نسبت به عدد فرود ۰/۲ و در نتیجه تشخیص ردیابی دقیق‌تر سطح آزاد سیال است.

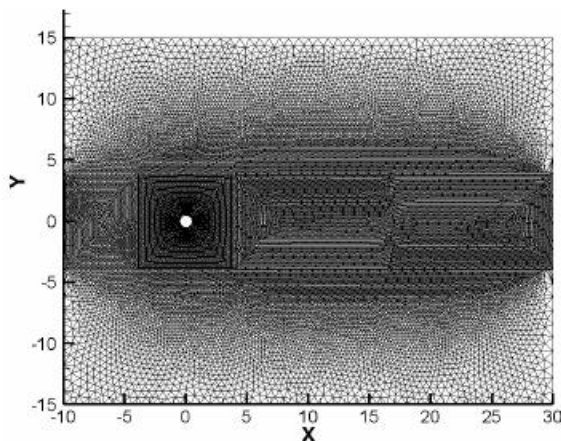


Fig. 3. Numerical grid (dimensions in meter)

شکل ۳: شبکه‌بندی مسئله (ابعاد بر حسب متر)

جدول ۱: اثر دقت شبکه در جریان سطح آزاد با رینولدز ۱۸۰ و فرود ۰/۴

Table 1. Effect of grid resolution at  $Re=180$ ,  $Fr=0.4$

تعداد شبکه	عدد استروهل	ضریب پسا	آر.ام.اس ضریب پسا	آر.ام.اس ضریب برآ
۵۲۹۶۰	۰/۱۹۶۹	۱/۶۲۲۵	۰/۱۵۲۶	-۰/۳۲۲۵
۸۸۶۷۰	۰/۱۹۷۲	۱/۶۲۰۹	۰/۱۵۰۷	-۰/۳۲۶۸

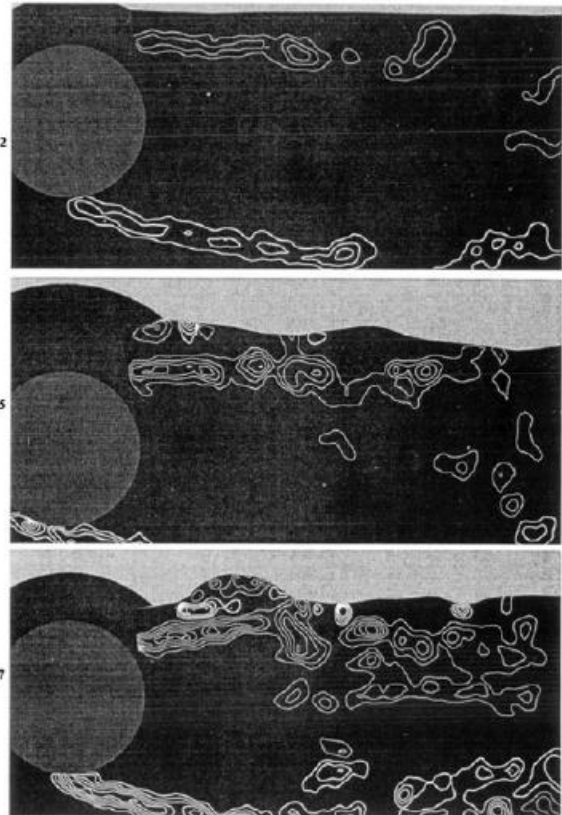


Fig. 1. Froude number effects on the free surface deformation [3]

شکل ۱: اثر عدد فرود بر تغییر شکل سطح آزاد [۳]

رژیم جریان، آرام و گردابه‌ها و جدایش آنها پدیده‌ای دو بعدی هستند. از طرفی با توجه به پایین بودن عدد فرود و تعریف عدد فرود بصورت نسبت نیروی اینرسی به نیروی گرانش، میزان تغییر شکل سطح آزاد سیال کوچک است، چرا که نیروی گرانش، میزان تغییر شکل آن را محدود می‌سازد. شکل ۲، شماتیک مسئله مورد نظر برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

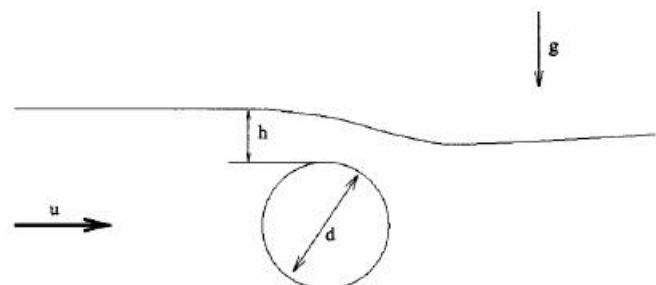


Fig. 2. Flow around a circular cylinder near the free surface of fluid

شکل ۲: شماتیک جریان حول یک استوانه دایره‌ای نزدیک سطح آزاد سیال

پارمترهای بی‌بعد مهم در این تحقیق عبارتند از:

$$Fr = U / \sqrt{gd} \quad (۱)$$

$$Gap - Ratio = h / d \quad (۲)$$

1 Laminar

## ۵- روش‌های حل عددی

معادلات حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی با روش حجم محدود توسط کد تجاری انسیس فلونت<sup>۲</sup> حل شده‌اند؛ برای حل کوپلینگ سرعت-فشار از روش پیرو<sup>۳</sup> از روش‌های خانواده سیمپل، برای گسسته‌سازی گرادیان فشار از روش پرستو<sup>۴</sup>، برای گسسته‌سازی مومنتم از روش کوئیک<sup>۵</sup> و از روش هریک اصلاح شده<sup>۶</sup> برای گسسته‌سازی کسر حجمی استفاده می‌شود. ضرایب زیر تخفیف<sup>۷</sup> نیز برای گرادیان فشار ۰/۳، برای معادله مومنتم ۰/۷ و برای کسر حجمی ۰/۵ در نظر گرفته می‌شوند.

## ۶- اعتبارسنجی و تحلیل نتایج

برای شبیه‌سازی‌ها از عدد فرود ۰/۲ و نسبت فاصله‌های ۰/۲۲ تا ۵ استفاده شده است. تغییر زمانی نیروی برای عمل‌کننده بر استوانه، تحلیل شده و تغییرات قابل توجهی در عدد استروهل با تغییر نسبت فاصله مشاهده شده است. در شکل ۴، نمودار عدد استروهل نرمالیزه شده (با عدد استروهل استوانه در سیال نامحدود) بر اساس فاصله استوانه از سطح آزاد سیال ارائه شده است. ملاحظه می‌شود زمانیکه استوانه به سطح نزدیکتر می‌شود، عدد استروهل به مقدار حداکثر خود در نسبت فاصله ۰/۷ می‌رسد. پس از آن با کاهش بیشتر نسبت فاصله، عدد استروهل کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان، تغییر در طول تشکیل گردابه<sup>۸</sup> با تغییر نسبت فاصله دانست. تغییر در رفتار دنباله و رهایش گردابه نسبت به فاصله از سطح آزاد به صورت شکل ۵ در نمودار عدد استروهل بر حسب نسبت فاصله ارائه شده است. در این

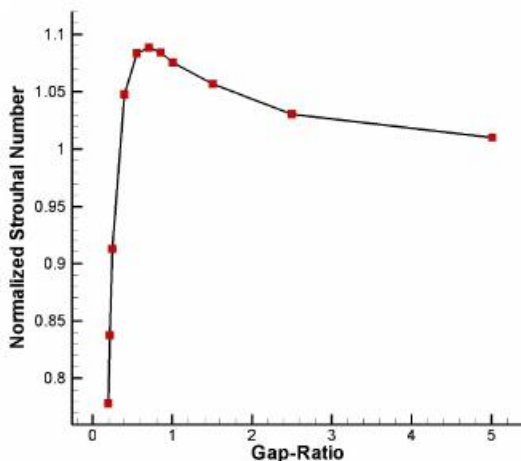


Fig. 4. Normalized Strouhal number vs. Gap-Ratio

شکل ۴: نمودار عدد استروهل نرمالیزه شده بر حسب فاصله بی‌بعد استوانه از سطح آزاد سیال

- 2 Ansys Fluent
- 3 PISO
- 4 PRESTO!
- 5 QUICK
- 6 Modified HRIC
- 7 Under-Relaxation Factors
- 8 Vortex Formation Length

مطابق جدول ۱، تعداد شبکه‌های حدوداً ۵۳۰۰۰، با توجه به تغییرات ناچیز پارامترها نسبت به تعداد شبکه‌های ۸۹۰۰۰، بعنوان شبکه‌بندی بهینه در نظر گرفته می‌شود. شبکه‌بندی با استفاده از پیش‌پردازنده گمبیت انجام شده است.

## ۴- شرایط مرزی و معادلات حاکم بر مسئله

شرط مرزی دبی جرمی ثابت، برای سیالات آب و هوا در مرز ورودی استفاده شده است، استوانه دارای شرط عدم لغزش و مرزهای بالا و پایین دارای شرط تنش برشی صفر هستند، همچنین شرط مرزی گرادیان سرعت طولی صفر برای مرزهای خروجی آب و هوا بکار گرفته شده است. معادلات حاکم بر این مسئله به شکل معادلات (۵) و (۶) ارائه می‌شوند.

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

معادلات مومنتم در راستای عمودی و افقی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (6)$$

شبیه‌سازی سطح آزاد سیال: روش حجم سیال<sup>۱</sup> امروزه کاراترین و پرستفاده‌ترین روش در شبیه‌سازی مسائل مربوط به سطح آزاد است. در این روش برای ذخیره پارامترهای مشخصه سیال در هر سلول، تنها یک مقدار ذخیره می‌شود و در هر المان حجمی، مجموع کسرهای حجمی فازها برابر واحد است؛ اگر کسر حجمی سیال  $q$  ام در یک سلول با  $\alpha_q$  نشان داده شود، ردیابی فصل مشترک میان فازها با استفاده از حل معادله پیوستگی برای کسر حجمی هر فاز، به شکل معادله (۵) خواهد بود. در صورت استفاده از روش حجم سیال، خاصیت سیال در هر سلول، مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$S = \sum \alpha_q S_q \quad (7)$$

معادلات پیوستگی و مومنتم برای تعیین میدان‌های سرعت، فشار و کسر حجمی بطور همزمان حل می‌شوند.

اثر کشش سطحی در یک مسئله دو فازی آب-هوا، زمانی اهمیت پیدا می‌کند که عدد وبر، به مراتب کوچکتر از یک باشد، لذا با در نظرگیری اینکه کشش سطحی بین دو سیال آب و هوا در دمای محیط ۰/۰۷ نیوتون بر متر است، مشخص می‌شود که عدد وبر در این مسئله، بسیار بزرگتر از یک (۷۰۰۰) است، لذا اثر کشش سطحی بطور کامل قابل چشم‌پوشی است.

1 Volume of Fluid (VOF) method

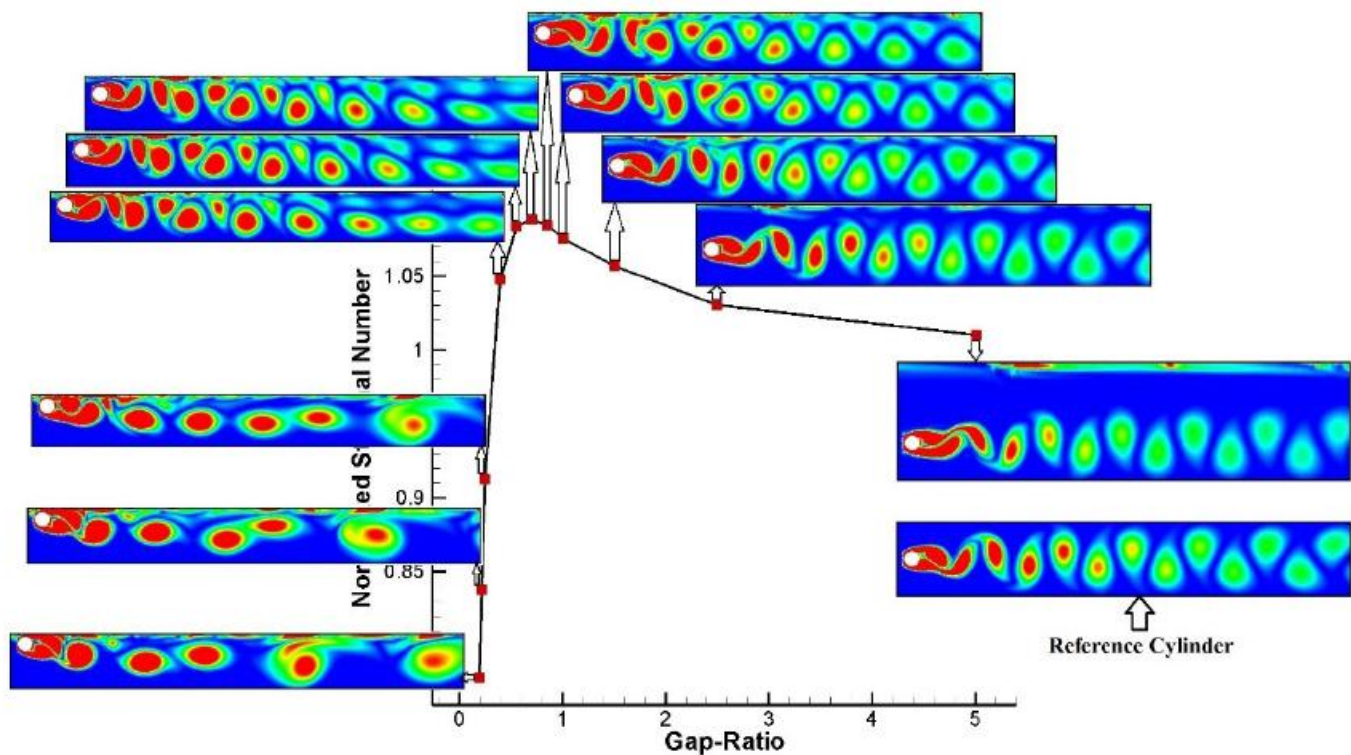


Fig. 5. Vortex shedding contours at  $Re=180$ ,  $Fr=0.2$

شکل ۵: کانتورهای سرعت برای استوانه در نسبت فاصله‌های مختلف در عدد فرود  $0.2$  و رینولدز  $180$  در نمودار عدد استروهل برحسب نسبت فاصله از سطح آزاد سیال

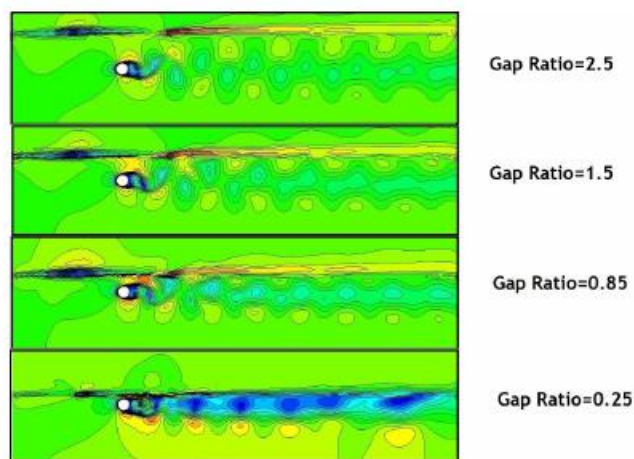


Fig. 6. Contours of Streamlines at various Gap-Ratios

شکل ۶: خطوط جریان روی کانتور سرعت برای نسبت فاصله‌های مختلف

نمودارهای ضریب برآ با کسر شناوری بصورت تابعی از زمان در سه نسبت فاصله ۵، ۱ و  $0.4$  برای بررسی اثر سطح آزاد سیال در شکل ۷ ارائه شده است. اگر نیروی شناوری از نیروی برای کلی کم شود و با استوانه در سیال نامحدود مقایسه شود، ملاحظه می‌گردد که اگرچه از منظر متناوب بودن نیروهای هیدرودینامیکی، رفتار جریان در دو وضعیت مشابه است، اما به دلیل وجود سطح آزاد، برآیند نیروهای برآ منفی بوده و صفر نیست، از طرف دیگر، با افزایش اثر سطح آزاد، برآیند نیروی برآ به لحاظ مقداری، افزایش و از آن سو، دامنه نوسانات آن کاهش می‌یابد.

نمودار، رهایش گردابه استوانه در سیال نامحدود بعنوان استوانه مرجع در نظر گرفته شده است. رفتار عدد استروهل مطابق شکل ۴، بسیار شبیه رفتار جریان حول استوانه نزدیک به یک دیواره بدون لغزش است که در [۲ و ۱] به آن پرداخته شده است.

مطالعه‌ای از طیف و میدان جریان، اشاره دارد که شکل ضعیفی از رهایش گردابه در نسبت فاصله  $0.16$  برای استوانه ثابت نزدیک سطح آزاد مشاهده می‌شود، بگونه‌ای که برای نسبت فاصله‌های کوچکتر از آن، اساساً رهایش گردابه مشاهده نمی‌شود، از طرفی بررسی کانتورها در نسبت فاصله‌های مختلف، نشان‌دهنده متراکم شدن خطوط جریان در بالای استوانه و کشیده شدن گردابه‌ها در پشت استوانه است که این، مشابه رفتار استوانه نزدیک یک دیواره بدون لغزش است که مهرآبادی [۹] به آن اشاره می‌کند؛ توجه این موضوع را می‌توان تغییر شکل بسیار کوچک سطح در این عدد فرود و شباهت هندسی آن با سطح صلب بدون لغزش دانست. از طرفی افزایش قابل توجه در طول تشکیل گردابه، زمانی که نسبت فاصله کاهش می‌یابد، در تطابق با نتایج آزمایشگاهی شریدان و همکاران [۴] است. شایان ذکر است که بررسی کانتورها نزدیک سطح آزاد، به وجود یک موج دائمی به دلیل وجود استوانه اشاره دارد [۹]. برای درک بهتر نحوه رفتار خطوط جریان حول استوانه در نسبت فاصله‌های مختلف، خطوط جریان برای نسبت فاصله‌های  $0.25$ ،  $1/5$ ،  $0.185$  و  $0.25$  مطابق شکل ۶ ارائه می‌شوند. بررسی شکل‌های ۵ و ۶ بوضوح متراکم شدن خطوط جریان در بالای استوانه و کشیده شدن گردابه‌ها در پشت استوانه را نشان می‌دهند.

رفتار مرتب متوسط مجذور<sup>۱</sup> برای ضریب برآ، معیار بهتری برای درک و مقایسه رفتار در حالات مختلف مربوط به رهائش گردابه است، لذا اعتبارسنجی با نمودار مرتب متوسط مجذور ضریب برآی نرمالیزه شده بر حسب نسبت فاصله با تحقیق ریچل [۵] با دقت قابل قبول در هر نسبت فاصله در شکل ۸ ارائه شده است.

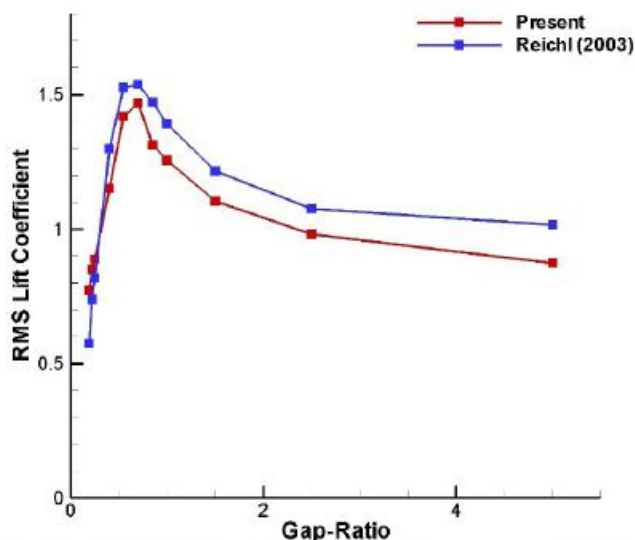


Fig. 8. Validation for flow at  $Re=180, Fr=0.2$  by comparing to Reichl et al. study [5]

شکل ۸: اعتبارسنجی مسئله جریان حول یک استوانه نزدیک سطح آزاد در فرود  $0.2$  و رینولدز  $180$  با مرجع [۵]

برای تعیین این نمودار، پس از کم کردن مقدار نیروی شناوری از نیروی برای کلی و سپس آرام‌اس‌گیری، مقادیر ضریب برآ نسبت به استوانه مرجع، نرمالیزه می‌شوند.

شکل ۹ نمودار ضریب پسای نرمالیزه شده نسبت به فاصله از سطح آزاد را برای بررسی نحوه رفتار آن نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییرات کیفی نمودارهای عدد استروهل و ضرایب پسا و برآی استوانه ثابت نزدیک سطح آزاد سیال نسبت به فاصله مشابه است. تغییرات قابل توجه ضرایب آیرودینامیکی در اطراف نسبت فاصله  $0.7$  نسبت به نسبت فاصله‌های کوچکتر و استوانه در سیال نامحدود را می‌توان بعلت تغییر در موقعیت زاویه‌ای نقطه سکون در جلوی استوانه و نقطه جدایش جریان در پشت استوانه در یک چرخه رهائش گردابه از آن دانست.

بررسی توزیع فشار محلی از موارد دیگری است که برای نسبت فاصله‌های مختلف می‌توان بررسی کرده و مقایسه نمود؛ فشار کل عبارتست از مجموع فشار استاتیک و دینامیک، توزیع فشار استاتیک همان توزیع فشار هیدرودینامیک است که بصورت خطی از صفر روی سطح آزاد تا حداکثر مقدار در کف تغییر می‌کند، فشار دینامیک نیز از رابطه (۸) پیروی می‌کند.

$$P_{dyn} = 0.5 \rho V^2 \quad (8)$$

1 Root Mean Square (RMS)

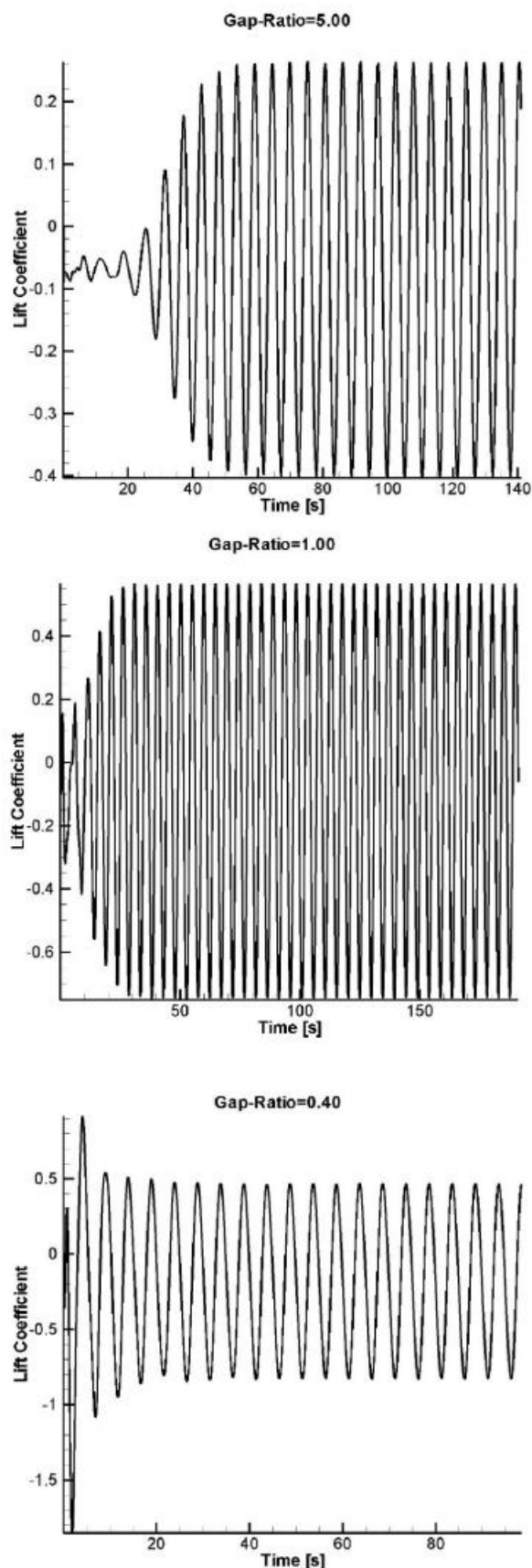


Fig. 7. Lift coefficients vs. time at  $Re=180, Fr=0.2$  and various Gap-Ratios

شکل ۷: تغییرات زمانی نیروی برآ در رینولدز  $180$  و فرود  $0.2$  در نسبت فاصله‌های  $5, 1$  و  $0.4$

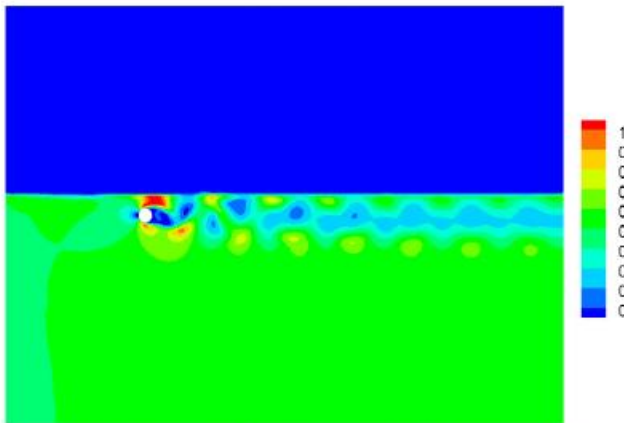


Fig. 11. Contour of dynamic pressure for Gap-Ratio=1.0

شکل ۱۱: کانتور فشار دینامیک برای نسبت فاصله برابر با ۱

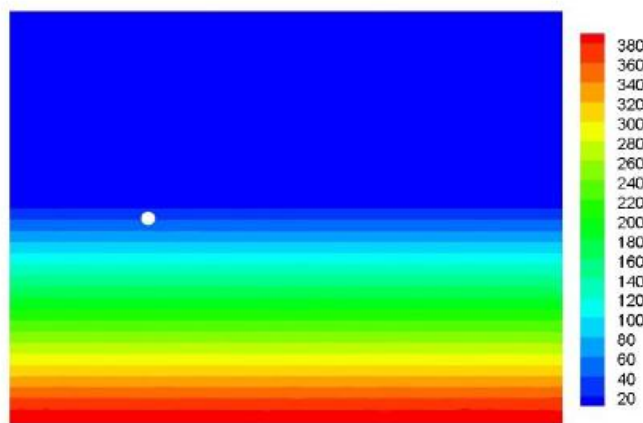
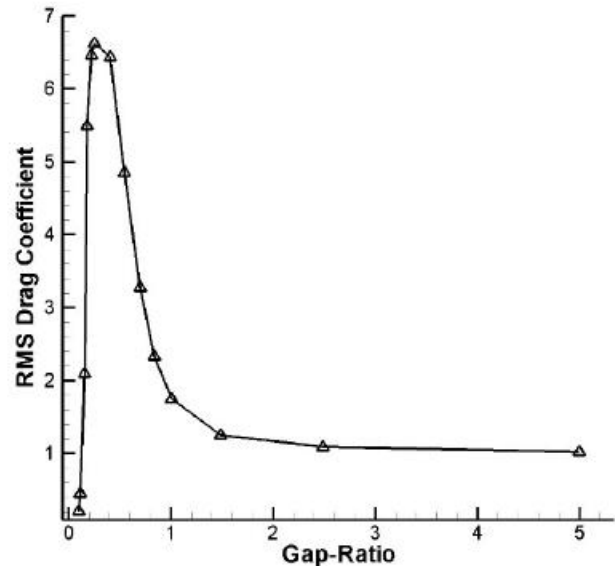


Fig. 12. Contour of total pressure for Gap-Ratio=1.0

شکل ۱۲: کانتور فشار کل برای نسبت فاصله ۱/۰۰

#### ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در جریان حول استوانه نزدیک سطح آزاد سیال بر خلاف جریان حول استوانه در عمق نامحدود که در آن به دلیل اینکه مرزها به اندازه کافی دور از استوانه اختیار می‌شوند تا گرادیان متغیرها در فاصله دور دست از استوانه برابر صفر شود، در این حالت یکی از مرزهای میدان جریان بسیار نزدیک استوانه بوده، تأثیرات متقابل گردابه‌ها و این مرز قابل توجه خواهد بود، با ملاحظه کانتورها مشخص است که اگرچه تشکیل گردابه‌ها از دو سوی استوانه صورت می‌گیرد، اما وجود سطح آزاد سبب متراکم شدن خطوط جریان در بالای استوانه و کشیده شدن گردابه‌ها در پشت استوانه می‌شود. لذا سطح آزاد مانند یک دیواره بدون لغزش عمل می‌کند. از طرفی وجود سطح آزاد نزدیک استوانه، نسبت به حالت قرارگیری استوانه در سیال نامحدود، باعث افزایش طول گردابه‌ها و نیز تا حدودی ایجاد امواج کوچک روی سطح می‌شود؛ از سوی دیگر با بررسی نمودارهای ضریب برآ ملاحظه می‌شود که وجود سطح آزاد باعث کاهش دامنه نوسانات ضریب برآ و افزایش مقدار نیروی برآ می‌گردد؛ ضمناً در این نوع جریان به ازای یک عدد رینولدز و فرود مشخص، نسبت فاصله‌ای وجود دارد که در مقادیر کوچکتر از آن، پدیده

Fig. 9. RMS Drag coefficients vs. Gap-Ratio at  $Re=180$ ,  $Fr=0.2$ 

شکل ۹: تغییرات آر.ام.اس ضریب پسا (نرمالیزه شده نسبت به استوانه مرجع) نسبت به نسبت فاصله در عدد فرود ۰/۲ و عدد رینولدز ۱۸۰

توزیع فشار استاتیک، دینامیک و فشار کل برای نسبت فاصله ۱ بررسی می‌شود. شکل ۱۰، کانتور فشار استاتیک و شکل ۱۱ کانتور فشار دینامیک را برای کل ناحیه در نسبت فاصله ۱ ارائه می‌دهد. صرف نظر از فاصله سطح آزاد از استوانه، کانتور فشار استاتیک برای تمامی نسبت فاصله‌ها تقریباً در همین محدوده است.

با توجه به اینکه فشار دینامیک تابع سرعت است و کانتورهای سرعت برای استوانه مرجع و استوانه در نسبت فاصله‌های مختلف بطور کامل در شکل ۵ بررسی شده است، از بررسی سایر کانتورهای فشار دینامیک صرف نظر می‌شود. با بررسی کانتورهای فشار استاتیک و دینامیک ملاحظه می‌شود که چون محدوده فشار استاتیک بسیار بیشتر از فشار دینامیک است، لذا فشار کل مطابق شکل ۱۲ تقریباً برابر فشار استاتیک است و این وضعیت برای تمام نسبت فاصله‌ها مشابه است.

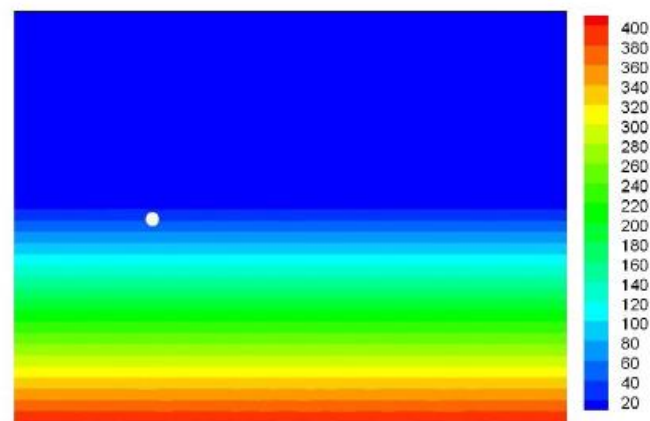


Fig. 10. Contour of static pressure for Gap-Ratio=1.0

شکل ۱۰: کانتور فشار استاتیک برای نسبت فاصله برابر با ۱

$\sigma$  کشش سطحی بین آب و هوا ( $\text{Nm}^{-1}$ )

## منابع

- [1] Bearman, P. W. and M. M. Zdravkovich, "Flow around a circular cylinder near a plane boundary", *J. Fluid Mech.* 89 (1978): 33–47.
- [2] Ḡoktun, S., "The drag and lift characteristics of a cylinder placed near a plane surface", Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 1975.
- [3] Sheridan, J., J. C. Lin, and D. Rockwell, "Flow past a cylinder close to a free surface", *J. Fluid Mech.* 330 (1997): 1–30.
- [4] Sheridan, J., J. C. Lin, and D. Rockwell, "Metastable states of a cylinder wake adjacent to a free surface", *Phys. Fluids*, 7 (1995): 2099–2101.
- [5] Reichl, P. J., K. Hourigan and M. C. Thompson, "The unsteady wake of a circular cylinder near a free surface", *Flow Turb. Combust.* 71 (2003): 347–359.
- [6] Reichl, P. J., "Flow past a cylinder close to a free surface", PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Monash University, 2001.
- [7] Warburton, T. C. and G. E. Karniadakis, "Spectral simulations of flow past a cylinder close to a free-surface", *In Proc. ASME Fluids Engng Div. Summer Meeting*, FEDSM97-3389, Vancouver, British Columbia, Canada, 1997.
- [8] Reichl, P., K. Hourigan and M.C. Thompson, "Flow past a cylinder close to a free surface", *Journal of Fluid Mechanics* 533 (2005): 269–296.
- [9] Mehrabadi, A., "Numerical Simulation of 2D cylinder oscillation beneath a free surface", PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, 2011.

رهایش گردابه، حداقل مقدار ممکن را دارد که برای فرود  $0.2$  و رینولدز  $180$ ، این نسبت فاصله،  $0.16$  است. نویسندگان این مقاله، تغییر سطح مقطع استوانه نزدیک سطح آزاد سیال را به بیضی یا مربع و مقایسه آن با مسئله در یک سیال نامحدود و ارائه نتایج مشابه برای مقایسه با سطح مقطع دایره‌ای را برای ادامه این تحقیق به پژوهشگران پیشنهاد می‌کنند.

## فهرست علائم

$D$	قطر استوانه (m)
$Fr$	عدد فرود
$f$	فرکانس بی‌بعد رهایش گردابه ( $s^{-1}$ )
$g$	شتاب گرانش ( $ms^{-2}$ )
Gap-Ratio	نسبت فاصله از سطح آزاد سیال
$h$	فاصله استوانه از سطح آزاد سیال (m)
$L$	طول استوانه (m)
$m$	جرم (Kg)
$P$	فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
$Re$	عدد رینولدز
$S$	یکی از خواص سیال
$St$	عدد استروهمال
$t$	زمان (s)
$\vec{U}(u,v)$	میدان سرعت ( $ms^{-1}$ )
$We$	عدد ووبر
علائم یونانی	
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\alpha$	کسر حجمی
$\nu$	لزجت سینماتیکی آب ( $m^2s^{-1}$ )

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. M. Hosseinalipoor and N. Haji Ghafoori Boukani, "Numerical Investigation of Flow Past a Circular Cylinder Beneath a Free Surface with Volume of Fluid Method", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 11-18.

DOI: 10.22060/mej.2016.751



