یادداشت فنی

بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر خطوط لوله فراساحلی سوار بر هم تحت جریان‌های دائمی

نازیلا کاردان*[۱]، حبیب حکیم زاده[۲]

[۱] استادیار، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان؛ n.kardan@azaruniv.ac.ir
[۲] استاد، دانشگاه صنعتی سهند؛ hakimzadeh@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۷

کلمات کلیدی:
خطوط لوله مرکب
نیروهای هیدرودینامیکی
شبیه‌سازی عددی
نرم‌افزار فلوئنت

چکیده

با توجه به اهمیت خطوط لوله انتقال نفت و گاز به عنوان سازه‌های فراساحلی مهم، در پژوهش حاضر جریان آشفته پیرامون خطوط لوله انتقال مرکب تحت جریان‌های دائمی به‌صورت عددی و با استفاده از نرم افزار فلوئنت مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی برای سرعت‌های مختلف جریان، قطرهای نسبی ۰/۲ تا ۰/۷ و فواصل نسبی صفر تا ∞ انجام شده و ضرایب دراگ و لیفت وارد بر خطوط لوله اصلی و فرعی ارائه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد افزایش سرعت جریان موجب افزایش ضریب دراگ وارد بر خط لوله اصلی و فرعی می‌گردد. تغییرات سرعت جریان در فواصل نسبی زیاد، بر مقدار ضریب لیفت خط لوله اصلی بی اثر بوده لیکن کاهش فاصله نسبی موجب افزایش ضریب لیفت خط لوله اصلی و فرعی می‌گردد. همچنین کاهش فاصله نسبی خطوط لوله موجب افزایش ضریب دراگ وارد بر دو خط لوله اصلی و فرعی شده، اما این تاثیر بر تغییرات ضریب دراگ خط لوله فرعی کم می‌باشد.

Investigation of the Hydrodynamic Forces Exerted on Offshore Piggyback Pipelines due to Steady Currents

Nazila Kardan[1*], Habib Hakimzadeh [2]

[1]Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, n.kardan@azaruniv.ac.ir
[2] Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, hakimzadeh@sut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 21 Jan. 2017
Accepted: 29 Oct. 2017

Keywords:
Piggyback Pipelin
Hydrodynamic forces
Numerical simulation
Fluent CFD solver

ABSTRACT

The oil and gas pipelines are among the most important offshore structures. In this study, the turbulent flow past piggyback pipelines and vortex shedding are numerically simulated under steady currents. Numerical simulation has been conducted for different values of the flow velocities, diameter ratios, and gap ratios; in order to investigate how the hydrodynamic forces of the small and large cylinders are affected. Evaluation of the numerical model revealed that the drag coefficient of small and large cylinder is increased as the flow velocity increase. For the large values of gap ratios, increasing of the flow velocity has less effect on the magnitude of the RMS lift force of the large cylinder whereas the RMS lift force of the large and small cylinders considerably increased by decreasing the gap ratio.

۱- مقدمه

گسترش جمعیت جهان و کمبود انرژی موجب شده است تا بشر به دنبال منابع جدید انرژی جهت استخراج و بهره‌برداری برآید. منابع سوخت‌های فسیلی از جمله پر مصرف‌ترین منابع انرژی در جهان به‌شمار می‌آیند، لذا نیاز روز افزون بشر به این سوخت‌ها باعث توسعه سریع صنایع فراساحلی گردیده است. قابلیت انتقال محصولات استخراجی از منابع سوختی فراساحلی یکی از موارد مؤثر در توسعه این منابع به‌شمار می‌رود. از جمله مهم‌ترین سازه‌های فراساحلی که به منظور انتقال نفت و گاز به‌میزان قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرند، خطوط لوله بستر دریا است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]

در اغلب موارد، جریان یک‌طرفه دائمی بیش از جریان رفت و برگشتی ناشی از موج می‌تواند پایداری این خطوط را تهدید نماید[۱]. به دلیل اینکه در مناطق فراساحلی، عمق آب زیاد بوده و موج سطح آب عملاً بستر دریا را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد، مطالعه الگوی جریان پیرامون خطوط لوله و نیروهای وارد بر آن در حالت جریان دائمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود.

به طور معمول خطوط لوله فراساحلی انتقال نفت، گاز و یا آب به‌صورت مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی که یک خط لوله بر روی بستر دریا قرار می گیرد، جدایی جریان پیرامون خط لوله رخ می‌دهد. جدایی جریان از مرزهای خطوط لوله موجب می‌گردد نیروی دراگ و نیروی لیفت قابل توجهی بر لوله وارد شود که در نهایت موجب عدم تعادل و ناپایداری آن خواهند شد.

بریکا و لنویل (۱۹۹۷) مطالعاتی را بر روی خط لوله واقع در ناحیه دنباله استوانه انجام داده و اثر گردابه فکنی بر نوسانات لوله را به‌دست آوردند[۲]. بروس (۱۹۹۹) جریان و فرسایش بستر را برای خطوط لوله به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داد. وی نشان داد با افزایش شدت آشفتگی جریان و عدد رینولدز، بر طول ناحیه جدایی لوله افزوده می‌شود[۳]. سومر و همکاران (۲۰۰۰) جریان پیرامون دو استوانه مجاور هم با قطر برابر را در آرایش‌های مختلف، فواصل نسبی و اعداد رینولدز مختلف را بررسی نموده و فرآیند جدایی لایه برشی، جدایی جریان و انتشار گردابه‌ها را ارائه نمودند[۴]. ژائو و همکاران (۲۰۰۵) به‌صورت عددی جریان پیرامون جفت استوانه با قطرهای مختلف را در شرایط جریان دائمی و اعداد رینولدز پایین شبیه‌سازی نموده و نشان دادند مؤلفه‌های اساسی که میدان جریان پیرامون جفت استوانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، فاصله بین دو استوانه، نسبت قطرها و زاویه برخورد جریان می‌باشد[۵]. ژائو و همکاران (۲۰۰۷) در ادامه کار قبلی، میدان جریان پیرامون جفت استوانه را در اعداد رینولدز بالا بررسی نمودند[۶].

وانگ و تان (۲۰۰۸) و لین و همکاران (۲۰۰۹) ناحیه دنباله لوله منفرد در نزدیکی مرز صلب را با تکنیک PIV در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار دادند[۸،۹]. زانگ و همکاران (۲۰۱۲) گردابه‌فکنی و ارتعاش ناشی از آن را برای خطوط لوله سوار بر هم در رژیم جریان دائمی و زیربحرانی بررسی نموده و نشان دادند برای لوله‌های سوار بر هم در نزدیک بستر، مشخصه‌های گردابه‌فکنی به نسبت فاصله از بستر و نیز فاصله نسبی دو لوله بستگی دارد[۱۰]. زانگ و همکاران (۲۰۱۳) انتشار گردابه پیرامون جفت لوله سوار بر هم در مجاورت بستر را در شرایط جریان دائمی و به‌صورت تجربی ارزیابی نمودند[۱۱]. مالک و کومار (۲۰۱۴) نیروی‌های دراگ و لیفت وارد بر استوانه منفرد در معرض جریان در شرایط دائمی را مورد بررسی قرار داده و اثر سرعت جریان و قطر نسبی بر تغییرات این نیروها را ارائه نمودند[۱۲]. پاکزاده و همکاران (۱۳۹۱) هیدرولیک جریان و طول دهانه‌ی آزاد مجاز خطوط لوله دریایی تحت اثر امواج دریا را به‌صورت عددی مطالعه نمودند. ایشان عنوان داشتند در اجرای خطوط لوله دریایی در منطقه‌ی خلیج فارس علاوه بر اثر جریان در پیش‌بینی طول دهانه‌ی آزاد مجاز، باید اثر امواج را نیز در نظر گرفت[۱۳]. مصاحبی و حکیم زاده (۱۳۹۴) پدیده جدایش جریان اطراف خطوط لوله با آرایش سوار بر هم را مورد ارزیابی قرار داده و اثر عدد رینولدز، فواصل کارگذاری و قطر نسبی بر الگوی جریان را ارائه نمودند[۱۴].

با توجه به پژوهش‌های انجام یافته، برآورد نیروهای دراگ و لیفت وارد بر خطوط لوله مرکب فراساحلی با آرایش سوار بر هم موضوعی است که کمتر به آن پرداخته شده است. در خطوط لوله مرکب با توجه به اینکه به‌صورت هم‌زمان، بر هر دو لوله تحتانی و فوقانی نیروهایی وارد می‌شود و امکان دارد که به‌دلیل وجود اندرکنش بین دو لوله، اثر نیروهای مزبور تشدید یابند، لذا عدم توجه به این نیروها در زمان طراحی ممکن است تعادل خطوط را بر هم زده و با مرور زمان موجب ناپایداری خطوط لوله مرکب گردد. از اینرو در پژوهش حاضر سعی گردیده تا با شبیه‌سازی عددی، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر خطوط لوله مرکب با آرایش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و اثر اعداد رینولدز، فاصله نسبی کارگذاری و قطر نسبی بر توزیع این نیروها و نیز ضریب فشار تعیین شود.

۲- توصیف فیزیک مساله

یک طرح شماتیکی از مساله مورد نظر در حالت خط لوله مرکب با آرایش سوار بر هم در شکل ۱ نشان داده شده است. در حالت لوله منفرد، جریان از روی استوانه به قطر D و در حالت دوم از روی دو استوانه موازی هم به ترتیب به قطرهای D و d عبور می‌کند. برای شبیه‌سازی میدان جریان پیرامون خطوط لوله، محدوده مستطیلی به طول ۲۸D و عرض ۱۶D در نظر گرفته شده است که استوانه‌ها به فاصله ۸D از ورودی محدوده قرار گرفته‌اند. مقادیر سرعت در نظر گرفته شده برای جریان ورودی برابر ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ متر بر ثانیه است. جدول ۱ مقادیر سرعت مورد بررسی و اعداد رینولدز حاصله برای استوانه‌های اصلی و فرعی را نشان می‌دهد.

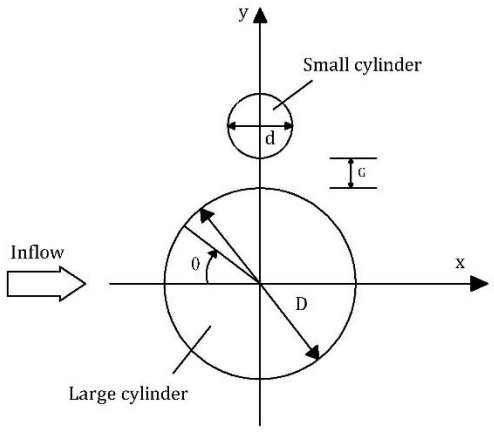
جدول ۱- اعداد رینولدز مورد بررسی

نام پارامتر	مقدار پارامتر			
سرعت جریان[m/s]	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
سرعت مبنا U_0[m/s]	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
نسبت $u/U_\circ$ ($\times 10^4$)	۱۲۵	۱۸۷/۵	۲۵۰	۳۱۲/۵
عدد رینولدز استوانه اصلی [D=50mm]($\times 10^4$)	۱	۱/۵	۲	۲/۵
عدد رینولدز استوانه فرعی [d=15mm]($\times 10^4$)	۰/۳	۰/۴۵	۰/۶	۰/۷۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]

فاصله نسبی استوانه اصلی از بستر کانال (e/D) برابر ۱ و فاصله نسبی بین استوانه‌ها (G/D) مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ∞ (خط لوله منفرد) می‌باشد. برای قطر نسبی دو استوانه نیز (d/D) مقادیر ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- جزئیات مدل‌های مورد بررسی

۳- صحت سنجی

۳-۱- شرایط مرزی

مرز سمت چپ (ورودی کانال): برای جریان سیال ورودی کانال مقدار میانگین سرعت وارد می‌شود. **مرز پایین (بستر کانال)**: برای مرز پایین که بستر کانال می‌باشد شرط عدم لغزش ($u=v=0$) برقرارمی‌باشد. **مرز بالا**: با توجه به عمق قابل توجه آب دریا در خطوط انتقال فراساحلی، عمق جریان به اندازه ۰/۵ متر در داخل کانال در نظر گرفته شده و شرط مرزی تقارن برای مرز بالا اعمال شده است. **مرز سمت راست (خروجی کانال)**: در خروجی کانال، شرط مرزی جریان خروجی وارد شده است.

۳-۲- صحت‌سنجی نتایج عددی

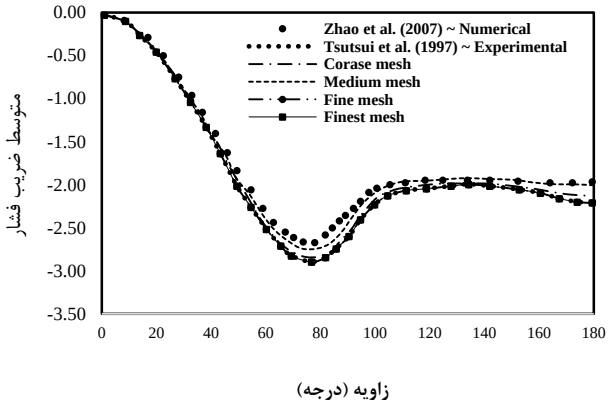
به‌منظور ارزیابی صحت نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی، نتایج مدل‌سازی عددی ژائو و همکاران (۲۰۰۷) مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. D قطر استوانه اصلی با مقدار ۴۰ میلی‌متر و d قطر استوانه فرعی با مقدار ۱۸ میلی‌متر می‌باشد. قطر نسبی d/D در این مورد برابر ۰/۴۵، و فاصله بین استوانه‌ها ۲/۵ میلی‌متر است. جریانی به سرعت ۱۶ متر بر ثانیه (U_0) با شدت آشفتگی کمتر از ۰/۵ درصد در کانال برقرار شده که به ازای آن عدد رینولدز استوانه اصلی $۴/۱\times۱۰^{۴}$ به‌دست می‌آید.

با توجه به حساسیت تمامی مدل‌های عددی به اندازه شبکه‌های میدان محاسباتی، چهار نوع شبکه‌بندی با ابعاد درشت تا بسیار ریز در پیرامون استوانه منفرد در نظر گرفته شده و متوسط زمانی ضریب فشار ($\bar{C}_p$) با مقدار حاصله از نتیجه عددی ژائو و همکاران (۲۰۰۷) و نتایج تجربی تسوسی و همکاران (۱۹۹۷) مقایسه گردیده است[۶،۱۵]. تعدادگره‌های شبکه برای سه نوع شبکه‌بندی در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۲ توزیع فشار پیرامون استوانه منفرد با مقادیر عددی ژائو و همکاران (۲۰۰۷) و نتایج تجربی تسوسی و همکاران (۱۹۹۷) مقایسه گردیده است.

جدول ۲- مشخصات چهار نوع شبکه‌بندی میدان محاسباتی

نوع شبکه‌بندی	تعداد کل گره‌های پیرامونی	اندازه سلول‌های پیرامون استوانه اصلی بر حسب متر	تعداد کل گره-ها
درشت **C**	۹۶	۰/۰۰۲	۹۳۳۸
متوسط **M**	۱۳۴	۰/۰۰۱۵	۱۱۴۵۱
ریز **F**	۱۷۶	۰/۰۰۱	۱۲۸۱۶
بسیار ریز **FS**	۲۰۵	۰/۰۰۰۸	۱۵۹۳۰

با توجه به توزیع ضریب فشار در شکل ۲، نتایج عددی برای دو نوع شبکه‌بندی ریز و بسیار ریز منطبق بر یکدیگر بوده، که این انطباق همچنین با نتایج تجربی تسوسی و همکاران (۱۹۹۷) نیز مشاهده می‌گردد. مقایسه کمی ضرایب دراگ و لیفت برای چهار نوع شبکه‌بندی با داده‌های تجربی و نتایج عددی سایر پژوهشگران در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۲- توزیع متوسط زمانی ضریب فشار پیرامون استوانه در عدد رینولدز $۴/۱\times۱۰^{۴}$

با توجه به نوسانات ضریب لیفت حول مقدار صفر، از پارامتر جذر میانگین مربعات (R.M.S) این ضریب استفاده می‌گردد که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C'_L = C_{L_{R.M.S}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} {C_{L_i}}^2}{n}} \qquad (۵)$$

مقدار R.M.S ضریب لیفت برای شبکه‌بندی نوع F برابر ۰/۵۳۴ به‌دست آمده است. این مقدار در مطالعه‌ی عددی ژائو و همکاران (۲۰۰۷) برابر ۰/۶۶۷ به‌دست آمده است. در نهایت با توجه به توزیع ضریب فشار، ضریب دراگ و ضریب لیفت، شبکه‌بندی نوع F برای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]

شبیه‌سازی سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه مقدار ضریب فشار پیرامون خطوط لوله مرکب نیز مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۳- مقایسه متوسط زمانی ضرایب نیروهای دراگ و لیفت

نوع شبکه‌بندی	متوسط زمانی ضریب فشار $\overline{C}_D$	مقدار R.M.S ضریب لیفت C'_L
Tsutsui et al.(1997)	۱/۲۱	--- [۱]
Zhao et al. (2007)	۱/۰۷۸	۰/۶۶۷
C	۰/۹۹۷	۰/۳۵۳
M	۱/۰۰۸	۰/۴۲۰
F	۱/۰۵۷	۰/۵۳۴
FS	۱/۰۶۶	۰/۵۴۶

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی اثر عدد رینولدز بر تغییرات ضریب دراگ و لیفت

بر اساس تحلیل‌های عددی، در حالتی که فاصله بین دو استوانه بی نهایت است (استوانه منفرد) ضریب دراگ از مقدار ۱/۰۸ در عدد رینولدز ۱×۱۰^۴، تا مقدار ۱/۱۱ در عدد رینولدز $۲/۵\times۱۰^۴$ تغییر می‌کند. ضریب دراگ استوانه منفرد ($G/D=\infty$) در اعداد رینولدز بالاتر نشان می‌دهد که این افزایش تقریباً تا عدد رینولدز ۸×۱۰^۴ ادامه یافته، و پس از آن شروع به کاهش می‌نماید. هر چند این تغییرات از بازه‌ی ۲×۱۰^۴ تا ۸×۱۰^۴ ناچیز می‌باشد. در حالت استوانه‌های سوار بر هم، روند متفاوتی نسبت به حالت استوانه منفرد مشاهده می‌شود. به‌ازای عدد رینولدز $۱/۵\times۱۰^۴$، ضریب دراگی که بر استوانه منفرد وارد می‌شود نسبت به سایر اعداد رینولدز کمترین مقدار را دارد، لیکن در حالت استوانه‌های مرکب، کمترین مقدار ضریب دراگ در عدد رینولدز ۲×۱۰^۴ ($u=۰/۴m/s$) دیده می‌شود.

۴-۲- بررسی اثر سرعت جریان بر تغییرات ضریب دراگ و لیفت

به‌منظور بررسی اثر سرعت جریان پیرامون استوانه‌ها، نتایج برای حالتی که قطر نسبی استوانه‌ها (d/D) برابر ۰/۴ است، در شکل ۳ ارائه شده است. محور قائم این نمودار مقدار متوسط زمانی ضرایب بی‌بعد دراگ و لیفت، و محور افقی آن پارامتر بی‌بعد سرعت نسبی u/U_0 انتخاب شده است. با توجه به این شکل، در تمامی حالات G/D، ضریب $\overline{C}_D$ استوانه اصلی به ازای سرعت نسبی ۱۲۵، ۱۸۷/۵ و ۲۵۰ تغییر قابل توجهی نمی‌کند. در حالت $G/D=۰$، $G/D=۰/۱$ و $G/D=۰/۲۵$، ضریب $\overline{C}_D$ افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود می‌رسد. با افزایش فاصله نسبی دو استوانه به مقادیر ۰/۵ و ۰/۷۵، ضریب $\overline{C}_D$ نسبتاً ثابت مانده و مقدار آن در سرعت‌های نسبی ۱۸۷/۵، ۲۵۰ و ۳۱۲/۵ تغییر نمی‌یابد.

با افزایش فاصله نسبی استوانه‌ها، ضریب دراگ استوانه اصلی افزایش می‌یابد. به ازای سرعت نسبی ۳۱۲/۵، ضریب $\overline{C}_D$ استوانه اصلی در حالتهای $G/D=۰$ و $G/D=۰/۱$، ۱/۵۸ برابر، در حالت $G/D=۰/۲۵$، ۱/۲۹ برابر، در حالت $G/D=۰/۵$، ۱/۱۳ برابر و در حالت $G/D=۰/۷۵$، ۱/۰۷ برابر ضریب دراگ استوانه منفرد ($G/D=\infty$) است. افزایش در مقدار ضریب دراگ با کاهش فاصله نسبی، ناشی از افزایش در مقدار فشار وارده در بالادست استوانه‌ها است که با کاهش فاصله دو استوانه سطح برخورد جریان نزدیک شونده نیز افزایش می‌یابد.

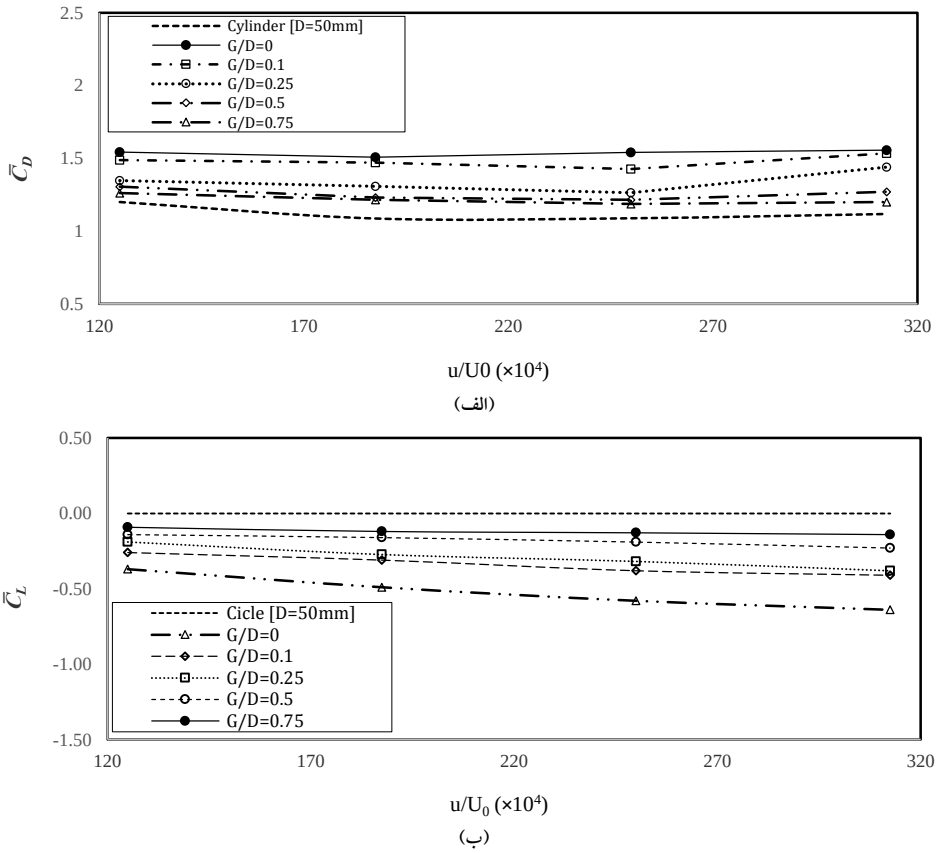
در حالتی که استوانه فرعی بر روی استوانه اصلی قرار دارد (استوانه‌های سوار بر هم) متوسط زمانی ضریب لیفت استوانه اصلی $\overline{C}_L$، دارای مقداری منفی است، که نشان می‌دهد نیروی لیفت به سمت پایین اثر می‌کند. متوسط ضریب لیفت استوانه اصلی در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان موجب تغییر محسوس در مقدار $\overline{C}_L$ بویژه در فاصله نسبی صفر می‌گردد. همچنین گرچه اثر سرعت جریان بر تغییرات $\overline{C}_L$، در فواصل نسبی زیاد، بسیار ناچیز بوده لیکن با کاهش فاصله اثر آن آشکار می‌گردد. در حالت $G/D=۰/۷۵$، ضریب لیفت $\overline{C}_L$، به ازای تمامی سرعت‌ها نسبتاً بدون تغییر مانده است. بیشترین تغییر در مقدار $\overline{C}_L$ با تغییر در مقدار سرعت، در فاصله نسبی $G/D=۰$ است که مقدار مطلق $\overline{C}_L$ استوانه اصلی در سرعت نسبی ۳۱۲/۵ حدود ۱/۵ برابر مقدار آن در سرعت نسبی ۱۲۵ است. این نکته بسیار حائز اهمیت است، زیرا با افزایش سرعت جریان انتظار می رود نوسانات خط لوله اصلی بسیار زیاد شده و خرابی های احتمالی ناشی از این نوسانات افزایش یابد. همچنین نتایج عددی نشان داد که ضریب دراگ وارده بر استوانه فرعی تا حدودی از تغییرات فاصله نسبی G/D تأثیر نمی‌پذیرد. در سرعت نسبی ۳۱۲/۵، ضریب $\overline{C}_D$ استوانه فرعی در حالت $G/D=۰$، تنها حدود ۸٪ بیشتر از مقدار آن در حالت $G/D=۰/۷۵$ است.

همچنین افزایش سرعت جریان، موجب افزایش ضریب دراگ استوانه فرعی در تمامی مقادیر G/D می‌شود. این تغییرات در $G/D=۰$ قابل توجه بوده لیکن در مقدار $G/D=۰/۷۵$ بسیار ناچیز است. با توجه به اینکه نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر استوانه اصلی و فرعی در سرعت نسبی ۳۱۲/۵ دارای بیشینه مقدار هستند، این سرعت مبنای سایر محاسبات قرار می‌گیرد

[۱] در این پژوهش مقدار آن ارائه نشده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]



شکل ۳ – تغییرات مقدار متوسط زمانی ضریب، (الف) دراگ (ب) لیفت وارد بر استوانه اصلی بر حسب تغییرات سرعت جریان نزدیک شونده *u*

۴-۳- بررسی ضریب فشار پیرامون استوانه‌های اصلی و فرعی

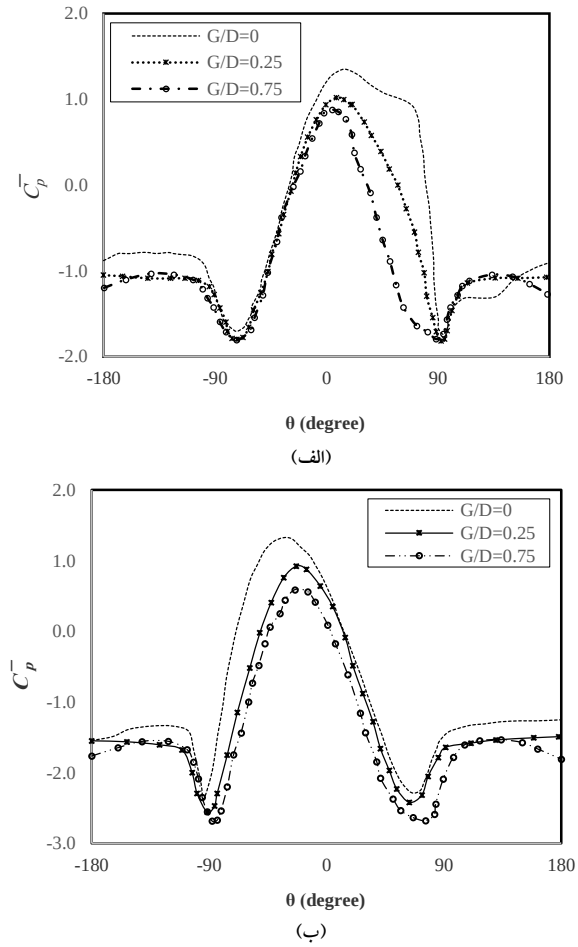
شکل ۴ (الف) توزیع مقدار متوسط زمانی ضریب فشار ($\overline{C}_p$) را پیرامون استوانه اصلی در سه حالت $G/D=0$، $G/D=0/2$ و $G/D=0/75$ نمایش می‌دهد. از روی شکل مشهود است که وجود استوانه فرعی، متوسط ضریب فشار استوانه اصلی را تحت تأثیر قرار داده است. همچنین استوانه فرعی زمانی که کمترین فاصله را با استوانه اصلی دارد، بیشترین تأثیر را بر روی ضریب فشار می‌گذارد. در حالت $G/D=0$، فرم نامتقارن منحنی توزیع فشار پیرامون استوانه اصلی نیز مشهود است، لیکن زمانی که فاصله بین دو استوانه افزایش می‌یابد، از فرم نامتقارنی منحنی توزیع فشار کاسته شده و در حالت $G/D=0/75$، منحنی توزیع فشار استوانه اصلی به منحنی توزیع فشار استوانه منفرد نزدیک می‌گردد. همین مساله ممکن است یکی از دلایلی باشد که موجب می‌گردد در حالت وجود کمترین فاصله بین دو استوانه، بیشترین نیروی لیفت بر استوانه اصلی وارد شود.

در شکل ۴ (ب) نیز توزیع مقدار متوسط زمانی ضریب فشار پیرامون استوانه فرعی در سه حالت $G/D=0$، $G/D=0/2$ و $G/D=0/75$ ارائه شده است. از روی نتایج حاصله می‌توان دریافت تأثیر فاصله نسبی دو استوانه بر منحنی توزیع فشار پیرامون استوانه فرعی، به مراتب بیش از تأثیر آن بر استوانه اصلی است. الگوی جریان نزدیک شونده به دو استوانه، در مجاورت استوانه فرعی بیش از استوانه اصلی دستخوش تغییر می‌شود، که عامل اول برخورد جریان به استوانه فرعی و عامل دوم جریانی است که پس از برخورد به استوانه اصلی منحرف شده و به استوانه فرعی برخورد می‌کند. در حالتی که فاصله بین دو استوانه کم است اثر جریان انحراف یافته از استوانه اصلی بسیار زیاد است و زمانی که این فاصله افزایش می‌یابد اثر عامل دوم کمتر شده و جریان پیرامون استوانه فرعی تنها متأثر از برخورد جریان به استوانه فرعی می‌گردد.

همچنین از روی شکل، فرم نامتقارنی منحنی توزیع فشار استوانه فرعی قابل مشاهده است. در حالتی که فاصله بین دو استوانه از هم کم است، بیشینه مقدار مثبت ضریب فشار ۱/۳ بوده و در زاویه حدود ۳۵ درجه قرار دارد که در حد فاصل صفر درجه و استوانه فرعی است. با زیاد شدن فاصله بین دو استوانه به مقدار $G/D=0/25$، همزمان با کاهش مقدار مثبت ضریب فشار، محل وقوع مقدار بیشینه آن نیز به ۲۴ درجه می‌رسد. در حالت وجود بیشینه فاصله بین دو استوانه، $G/D=0/75$، مقدار بیشینه ضریب فشار مثبت به ۰/۵۹ کاهش یافته و محل آن به ۲۰ درجه می‌رسد. چنانچه این فاصله بیشتر افزایش یابد، محل وقوع بیشینه ضریب فشار مثبت، به زاویه صفر درجه نزدیک می‌شود. محل بیشینه مقدار ضریب فشار استوانه منفرد در زاویه صفر درجه است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]



شکل ۴- توزیع مقدار متوسط ضریب فشار بر روی (الف) استوانه اصلی ($Re = ۲/۵\times۱۰^{۴}$) و (ب) استوانه فرعی ($Re = ۰/۷۵\times۱۰^{۴}$)

۴-۴- بررسی اثر قطر نسبی بر نیروهای هیدرودینامیکی

در این بخش، تأثیر قطر نسبی دو استوانه (d/D) بر روی ضرایب دراگ و لیفت بررسی شده است. فواصل نسبی، سه مقدار صفر، ۰/۲۵ و ۰/۷۵ بوده و پنج قطر نسبی ۰/۲ تا ۰/۶ با فواصل ۰/۱ در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز استوانه اصلی و فرعی نیز مشابه قسمت قبل به ترتیب $۲/۵\times۱۰^{۴}$ و $۰/۷۵\times۱۰^{۴}$ (به ازای سرعت نسبی ۳۱۲/۵) می‌باشد. شکل ۵ (الف) تغییرات مقدار متوسط ضریب دراگ استوانه اصلی بر حسب تغییرات قطر نسبی d/D و فاصله نسبی G/D را نمایش می‌دهد.

با توجه به اثرات استوانه فرعی بر الگوی جریان، متوسط ضریب دراگ استوانه اصلی در هر سه حالت G/D به مراتب بیشتر از ضریب دراگ در حالت $G/D = \infty$ می‌باشد. متوسط ضریب دراگ وارده بر استوانه اصلی ($G/D = \infty$) در حالت $d/D = ۰/۶$ برابر ۱/۱۹ می‌باشد؛ در حالی که به ازای $G/D = ۰$، مقدار آن تقریباً به ۱/۶۶، به ازای $G/D = ۰/۲۵$ به مقدار ۱/۵۴، و در فاصله $G/D = ۰/۷۵$ به مقدار نسبتاً ثابت ۱/۳ افزایش یافته است. با توجه به شکل فوق، با افزایش قطر نسبی d/D ، متوسط ضریب دراگ استوانه اصلی افزایش می‌یابد. افزایش فاصله نسبی G/D نیز موجب کاهش ضریب $\overline{C}_D$ می‌گردد؛ به‌طوری که در مقدار $G/D = ۰/۷۵$، متوسط ضریب دراگ نسبتاً ثابت مانده و با تغییر در مقدار d/D تغییر چندانی نمی‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت با افزایش فاصله بین دو استوانه، اثر استوانه فرعی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. شکل ۵ (ب) تغییرات مقدار متوسط ضریب لیفت استوانه اصلی را بر حسب تغییرات قطر نسبی *d/D* نشان می‌دهد.

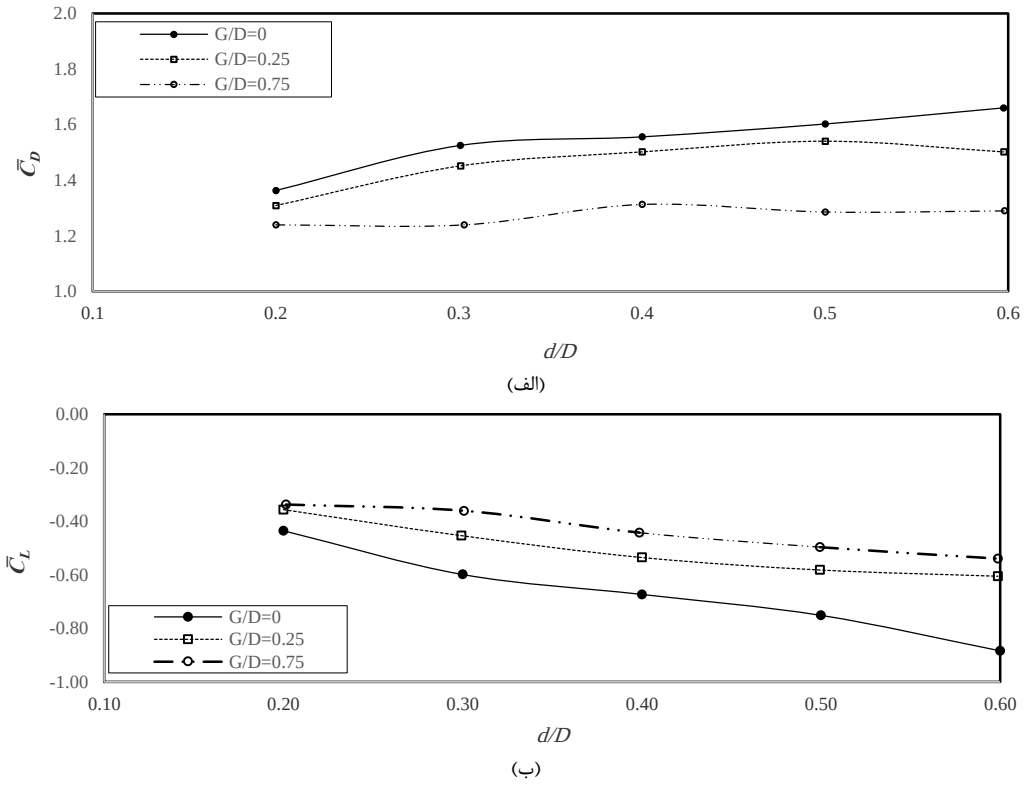
۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر میدان فشار پیرامون خطوط لوله انتقال مرکب با آرایش سوار بر هم به‌صورت عددی بررسی شده و به تحلیل مقدار و نحوه توزیع ضرایب فشار، دراگ و لیفت در حالات مختلف پرداخته شده است. نتایج حاصل شده ممکن است به صورت زیر جمع‌بندی شوند:

- افزایش سرعت جریان موجب افزایش ضریب دراگ وارد بر استوانه اصلی می‌گردد. زمانی که فاصله نسبی بین دو استوانه زیاد است، اثر سرعت بر ضریب دراگ کم بوده و زمانی که *G/D* کاهش می‌یابد، بر تأثیر سرعت جریان بر تغییرات ضریب دراگ افزوده می‌شود.
- کاهش فاصله بین دو استوانه به‌شدت بر مقدار ضریب دراگ مؤثر بوده و به ازای $G/D = ۰$ ضریب دراگ استوانه اصلی حدود ۱/۵ برابر مقدار آن در حالت $G/D = ۰/۷۵$ است.
- تغییرات مقدار متوسط زمانی ضریب لیفت استوانه اصلی نسبت به تغییرات سرعت جریان محسوس است به گونه ای که به ازای فاصله نسبی صفر بین دو لوله، ضریب لیفت با افزایش سرعت به لحاظ قدر مطلق افزایش می یابد. این امر می تواند به افزایش محسوس نوسانات لوله در مقادیر سرعت بالا و خرابی های ناشی از آن بیانجامد.
- تأثیر قطر نسبی d/D بر ضریب لیفت استوانه اصلی عکس ضریب دراگ است. با افزایش d/D مقدار ضریب لیفت استوانه اصلی بطور محسوسی به لحاظ قدرمطلق افزایش یافته و از اینرو بر نوسانات لوله افزوده می شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]



شکل ۵- اثر قطر نسبی بر تغییرات مقدار (الف) ضریب دراگ و (ب) ضریب لیفت وارده بر استوانه اصلی ($Re = ۲/۵\times۱۰^{۴}$)

کلید واژگان

1- Root – Mean – Square (R.M.S)

منابع

1- Sumer, B.M., Fredsoe, J. (1999), *Wave scour around structures*, Advances in Coastal and Ocean Engineering, Vol. 4, pp. 191-249.

2- Brika, D., Laneville, A. (1997), *Wake interference between two circular cylinders*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 72, pp. 61-70.

3- Brors, B. (1999), *Numerical modeling of flow and scour at pipelines*, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125(5), pp. 511-525.

4- Sumner, D., Price, S.J., Paidoussis, M.P. (2000). *Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross-flow*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 411, pp. 263-303.

5- Zhao, M., Cheng, L., Teng, B., Liang, D. (2005), *Numerical simulation of viscous flow past two circular cylinders of different diameters*, Applied Ocean Research, Vol. 27, pp. 39–55.

6- Zhao, M., Cheng, L., Teng, B., Dong, G. (2007), *Hydrodynamic forces on dual cylinders of different diameters in steady currents*, Journal of Fluids and Structures, Vol. 23, pp. 59-83.

7- Lin, W., Lin, C., Hsieh, S., Dey, S. (2009), *Flow characteristics around a circular cylinder placed horizontally above a plane boundary*, Journal of Engineering Mechanic (ASCE), Vol. 135(7), pp. 697-716.

8- Wang, X.K., Tan, S.K. (2008), *Near-wake flow characteristics of a circular cylinder close to a wall*, Journal of Fluids and Structures, Vol. 24, pp. 605-627.

9- Zang, Zh., Gao, F., Cui, J. (2012), *Vortex shedding and vortex-induced vibration of piggyback pipelines in steady currents*, In Proc 22th Int Offshore and Polar Eng Conf, pp. 565-571.

10- Zang, Zh.P., Gao, F.P., Cui, J.Sh. (2013), *Physical modeling and swirling strength analysis of vortex shedding from near-bed piggyback pipelines*, Applied Ocean Research, Vol. 40, pp. 50-59.

11- Mallick, M., Kumar, A. (2014), *Study on drag coefficient for the flow past a cylinder*, International Journal of Civil Engineering Research, Vol. 5(4), pp. 301-306.

12- Pakzadeh Masooleh, M., Yeganeh Bakhtiary, A., Kazeminezhad, M.H. (2012), *Investigation of flow hydraulic and free spanning length of marine pipelines subjected to sea waves*, Journal of Oceanography, Vol. 3(10), pp. 1-10 (In Persian).

13- Hakimzadeh, H., Mosahebi Mohammadi, M. (2016). *Experimental investigation on impact of Reynolds number, fitting distance and relative diameter on flow separation around piggyback pipelines*, International Journal of Maritime Technology, Vol. 11(22), pp. 109-117 (In Persian).

14- Tsutsui, T., Igarashi, T., Kamemoto, K. (1997), *Interactive flow around two circular cylinders of different diameters at close proximity, Experiment and numerical analysis by vortex method*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 69-71, pp. 279-291.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.6.4]