بررسی آزمایشگاهی تاثیر عدد رینولدز، فواصل کارگذاری و قطرنسبی در پدیده جدایش جریان اطراف خطوط لوله با آرایش سوار بر هم

مهران مصاحبی محمدی[۱]، حبیب حکیم‌زاده[۲]*

[۱] کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند؛ m_mossahebi@sut.ac.ir
[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند؛ hakimzadeh@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
خطوط لوله سوار بر هم
جدایش جریان
عدد رینولدز
مدل آزمایشگاهی

چکیده

در این مقاله الگوی جریان اطراف دو لوله با آرایش سوار بر هم به ازای فواصل، نسبت قطرها و اعداد رینولدز متفاوت به صورت تجربی در حالت جریان دایمی مورد بررسی قرار گرفته است. تعدادی آزمایش شامل ۶ آزمایش ارزیابی و ۵۰ آزمایش اصلی در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰متر، عرض ۰/۳متر و عمق ۰/۵متر و با استفاده از میله تفلون PTFE با قطرهای مختلف انجام گردیده است. جهت آشکارسازی جدایش جریان از ذرات پلی استایرن با چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب استفاده شده و از تمامی مراحل با دوربین دیجیتالی سرعت بالا فیلم‌برداری شده است. نتایج نشان داد که با افزودن لوله فرعی چسبیده به لوله اصلی، شکل متقارن جدایش در پایین دست لوله منفرد از بین رفته و طول ناحیه جدایی تا حد ۶۰٪ کاهش می یابد. همچنین با افزایش فاصله نسبی تا یک حد معین، طول ناحیه جدایش برای لوله اصلی افزایش و برای لوله فرعی کاهش می یابد، ولی پس از گذر از حد مذکور، الگوی جدایش در ناحیه دنباله به حالت متقارن درآمده و تاثیر دو لوله بر یکدیگر کمرنگ می شود.

Experimental Investigation on Impact of Reynolds Number, Fitting Distance and Relative Diameter on Flow Separation around Piggyback Pipelines

Mehran Mosahebi Mohammadi[1], Habib Hakimzadeh[2*]

[1] M.Sc. in Marine Structures, Sahand University of Technology; m_mossahebi@sut.ac.ir
[2] Professor, Faculty of Civil Eng., Sahand University of Technology; hakimzadeh@sut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 20 May. 2015
Accepted: 21 Feb. 2016

Keywords:
Piggyback Pipelines
Flow Separation
Reynolds Number
Experimental Model

ABSTRACT

In this paper, flow separations at downstream of piggyback pipelines due to the steady current have experimentally been investigated for various Reynolds numbers, gap ratios and relative diameters of the two pipes. A number of experiments including 6 verification tests and 50 main tests were conducted in a channel with length of 10m, width of 0.3m and 0.5m depth using Teflon rods (PTFE) with different diameters. To visualize the separation pattern, the polystyrene particles with a density of 1.05gr/cm^3 have been used and the whole processes of tests have been recorded using a digital camera. The experimental results have shown that with adding the secondary pipe stuck to the main pipe, the symmetrical separation pattern vanished and its length reduced up to 60%. Also, it was observed that with increasing the gap ratio to a certain extent, the separation lengths increased and decreased gradually for the main and secondary pipes, respectively. However, further increase in the gap ratio showed that the two pipes behaved separately and the separation or recirculation patterns became symmetrical and their effect to each other became negligible.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]

۱ - مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از خطوط لوله دریایی جهت انتقال نفت و گاز از میدان‌های نفتی فراساحلی و انتقال آب آشامیدنی و دیگر ملزومات از ناحیه ساحلی به محل سکو به دلیل مزایای فراوان این روش انتقال نسبت به سایر روش‌های مرسوم از جمله داشتن صرفه اقتصادی، امکان انتقال در همه‌ی شرایط جوی و داشتن آسیب کمتر به محیط زیست، به طور گسترده‌ای توسعه یافته است. ولی در کنار مزایای مذکور باید بدین نکته نیز توجه نمود که گسیختگی خطوط لوله دریایی ناشی از انتشار گردابه ها در پایین دست آنها می‌تواند پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی زیانباری را به همراه داشته باشد. از طرفی با توجه به کاربرد هر کدام از خطوط لوله برای انتقال نفت و گاز و یا آب، این خطوط اغلب به صورت مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند. خطوط لوله مرکب می‌توانند در دو آرایش مختلف پشت سر هم و کنار همدیگر طراحی بشوند. هنگامی که بیش از یک خط لوله در مجاورت همدیگر بر روی بستر دریا اجرا می‌گردند، با توجه به عدد رینولدز جریان، تعداد خطوط لوله و فاصله آن‌ها از همدیگر و بستر، الگوی جریان در اطراف آن‌ها تغییر یافته و به تبع آن جدایی جریان نیز دستخوش تغییر خواهد بود. در ارتباط با بحث الگوی جریان و گردابه فکنی در پایین دست پایه‌ها و خطوط لوله به ازای اعداد رینولدز مختلف، تحقیقات بسیار زیادی در دنیا انجام شده است که در این خصوص اثر سومر و فردسو در سال ۱۹۹۷ می‌تواند به عنوان یک مرجع کامل و ارزشمند در نظر گرفته شود که در طی دو دهه اخیر انتشار یافته است[۱]. ولی در رابطه با تحقیقات انجام گرفته در مورد خطوط لوله مرکب می‌توان به چند مورد زیر اشاره نمود. بریکا و لینویل در سال ۱۹۹۷ آزمایشاتی را بر روی خط لوله‌ای که در ناحیه دنباله استوانه دیگر قرار داشت، انجام داده و نوسانات ناشی از گردابه فکنی را بررسی کردند[۲]. سومنر و همکاران در سال ۱۹۹۹ میدان جریان اطراف دو و سه استوانه در کنار هم با قطرهای برابر در جریان دایمی را توسط آشکار ساز جریان، سرعت سنج سیم داغ و سرعت سنجی تصویر ذره (PIV) و برای فواصل نسبی ۱ تا ۶ و اعداد رینولدز ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ بررسی نمودند. مشاهدات آنها نشان داد که برای فواصل نسبی کوچک، دو استوانه مانند یک جسم عمل می‌کنند و برای فواصل نسبی متوسط، جریان جهت‌دار با گردابه فکنی هماهنگ بوجود می‌آید و برای نسبت‌های بزرگ الگوی جریان متقارنی با گردابه فکنی هماهنگ بوجود می‌آید[۳]. همچنین سومنر و همکاران در سال ۲۰۰۰ جریان اطراف دو استوانه با قطرهای برابر و در آرایش‌های متفاوت را توسط آشکار سازهای جریان و سیستم PIV در فواصل نسبی ۱ تا ۵ و زوایای ۰ تا ۹۰ درجه در اعداد رینولدز ۸۵۰ تا ۱۹۰۰ بررسی نمودند. در مجموع ۹ الگوی جریان شناسایی و فرآیند جدایی لایه برشی، جدایی جریان، هماهنگی جفت گردابه‌ها و برخورد گردابه‌ها مشاهده گردید[۴]. چنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ آزمایشی بر روی دو لوله با قطرهای مختلف و با آرایش سوار بر هم تحت اثر امواج منظم و نامنظم انجام دادند. آزمایشات در کانالی به طول و عرض ۵۰ و ۳ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شد. عمق آب در کانال ۰/۳ متر و قطر نسبی دو لوله ۰/۴ انتخاب شده بود، سیستم لوله‌ها نیز در وسط کانال قرار گرفته بودند. در این تحقیق مقایسه‌ای بین نیروهای وارده بر لوله‌های بزرگ و کوچک انجام گرفت[۵]. زنک و همکاران در سال ۲۰۱۲ گردابه فکنی و ارتعاش ناشی از آن را برای خطوط لوله سوار بر هم در رژیم جریان دایمی و زیربحرانی بررسی کردند. سیستم اندازه گیری PIV در این آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش برای عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ نشان داد که برای لوله‌های سوار بر هم نزدیک بستر، مشخصه‌های گردابه فکنی به نسبت فاصله از بستر و نیز فاصله نسبی دو لوله بستگی دارد و چهار نوع الگوی دنباله مشاهده گردید[۶]. همچنین یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک بررسی عددی بر روی جریان اطراف جفت خط لوله با قطرهای متفاوت انجام دادند و تاثیر حضور لوله کوچکتر بر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله بزرگتر را تحت جریان نوسانی بررسی نمودند[۷]. سرانجام زنک و همکاران در سال ۲۰۱۳ گردابه فکنی از یک جفت لوله سوار بر هم نزدیک بستر را در جریان دایمی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این آزمایشات نیز از دستگاه PIV جهت آشکار سازی جریان و مولفه‌های آن استفاده نمودند. ابتدا آزمایشات برای لوله منفرد و اعداد رینولدز مختلف انجام و نتایج حاصله با نتایج انتشار یافته سایر پژوهشگران مورد مقایسه قرار گرفتند و سپس آزمایشات اصلی برای جفت لوله سوار بر هم در یک عدد رینولدز مشخصی (۳۰۰۰۰) انجام پذیرفت[۸]. همچنین با توجه به این که جریان یک سویه دایمی در مقایسه با جریان رفت و برگشتی ناشی از موج می تواند تهدید جدی‌تری برای پایداری سازه باشد[۹] و نیز به دلیل این که در مناطق فراساحلی عملاً موج بستر دریا را حس نمی‌کند از اینرو لزوم مطالعه پدیده جدایش جریان اطراف خطوط لوله سوار بر هم در اعداد رینولدز و آرایش مختلف در حالت جریان دایمی محسوس بوده و از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود. همانگونه که از بررسی منابع مذکور بر می‌آید جهت آشکارسازی جریان و ثبت مسیرهای آن در آزمایشات مختلف می توان از دستگاه PIV و یا ذرات پلی‌استایرین و دوربین دیجیتالی استفاده نمود که روش دوم نیز توسط بسیاری از پژوهشگران از جمله هاتیپ اوقلو و آوکی در سال ۲۰۰۳ برای خط لوله‌ای واقع بر بستر و نیز به صورت نیمه مدفون مورد استفاده قرار گرفته است[۱۰].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]

۲- مطالعه آزمایشگاهی

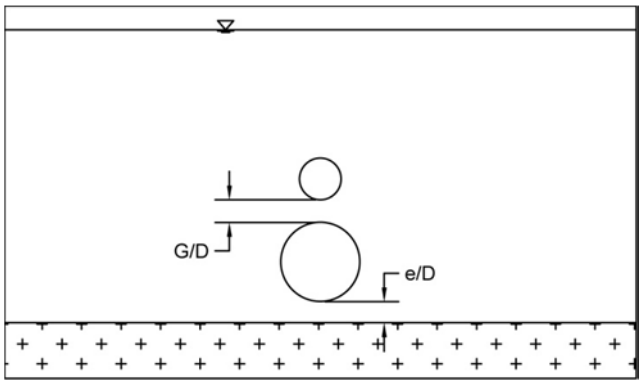
در این پژوهش هدف از انجام آزمایشات بر روی مدل‌های فیزیکی یافتن طول نواحی جدایی در پایین دست خطوط لوله سوار بر هم به ازای اعداد رینولدز، فاصله و قطر نسبی متفاوت و نیز بررسی تغییرات الگوی جریان مورد نظر بوده است. در این راستا تعداد ۵۶ آزمایش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک ترتیب داده شد.

۲-۱- مشخصات کانال و مدل های آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانالی آزمایشگاهی به طول ۱۰، عرض۰/۳ و عمق ۰/۵ متر (شکل۱) و با استفاده از میله‌هایی از جنس تفلون با قطرهای مختلف و در شرایط جریان دایمی برای اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. فاصله کارگذاری لوله اصلی از کف کانال به اندازه همان قطر لوله اصلی بوده تا از اثرات کف جلوگیری شود. با توجه به کارهای پژوهشگران پیشین، ابعاد مدل فیزیکی به گونه ای انتخاب شده است که بتوان نتایج بدست آمده را با نتایج سایر پژوهشگران مقایسه نمود. به منظور ثبت مشاهدات آزمایشگاهی، ابتدا کانال تا عمق مورد نظر پر شده و پس از تنظیم دبی و برقراری جریان دایمی، برداشت‌های تصویری صورت می‌گرفت. طرح شماتیکی از مدل آزمایشگاهی همراه با علایم اختصاری مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۱- کانال آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل۲- طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

در ابتدا تعداد ۶ آزمایش جهت اطمینان از صحت انجام آزمایشات برای ۳ عدد رینولدز و دو قطر لوله متفاوت انجام شده و نتایج حاصله این گروه از آزمایشها با نتایج متناظر سایر پژوهشگران مورد مقایسه قرار گرفتند. مشخصات آزمایشات انجام یافته در این مرحله از تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ – مشخصات آزمایشات صحت سنجی

آزمایش	قطر لوله (mm)	عدد رینولدز
آزمایش صحت سنجی ۱	۵۰	۱۰۰۰۰
		۱۵۰۰۰
		۲۰۰۰۰
آزمایش صحت سنجی ۲	۶۰	۱۰۰۰۰
		۱۵۰۰۰
		۲۰۰۰۰

دبی کانال آزمایشگاهی مورد استفاده از مقدار صفر تا ۳۰ لیتر بر ثانیه قابل تنظیم بوده است. دیواره‌های کانال از جنس پلکسی-گلاس و کف آن پلاستیک فشرده می‌باشد. جریان توسط پمپی از مخازن ذخیره آب به داخل کانال پمپاژ می‌گردد. برای مقادیر سرعت جریان بالا به دلیل اغتشاشات زیاد جریان خروجی از پمپ در قسمت ورودی کانال، سطح جریان در داخل کانال موجدار می-شود که به منظور جلوگیری از این پدیده یک شبکه طوری شکل در بخش ورودی کانال تعبیه گردیده است به گونه ای که آشفتگی-ها و نوسان‌های موجود در سطح جریان ورودی به حداقل رسیده و سبب یکنواخت شدن سرعت و شکل جریان می‌گردد. در مرز خروجی کانال نیز، یک صفحه‌ی فلزی به صورت متحرک مانند سرریز به منظور تنظیم عمق آب تعبیه شده است. همچنین مقیاس‌هایی در قسمت‌های مختلف کانال جهت تنظیم ارتفاع آب درون کانال در نظر گرفته شده اند. به منظور کمینه نمودن تاثیر مرزهای ورودی و خروجی کانال، لوله‌ها در وسط کانال و در فواصل ۵ متری نسبت به مرزهای ورودی و خروجی قرار داده شده‌اند.

پس از انجام آزمایشات صحت سنجی، تعداد ۵۰ آزمایش اصلی برای پنج عدد رینولدز، دو نسبت قطر لوله فرعی به اصلی (d/D) و پنج فاصله نسبی بین دو لوله (G/D) مختلف انجام شده‌اند و در مجموع با لحاظ نمودن آزمایشات مربوط به گروه صحت سنجی تعداد آنها به ۵۶ مورد رسیده است. مشخصات آزمایشات انجام یافته در مرحله دوم تحقیق در جداول ۲-الف و ۲-ب آورده شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]

جدول ۲-الف – مشخصات آزمایشات انجام شده برای d/D=۰/۲۵

شماره آزمایش	فاصله نسبی (G/D)	قطر لوله اصلی (mm)	قطر لوله فرعی (mm)	عدد رینولدز
۱				۹۰۰۰
۲				۱۰۰۰۰
۳	۰	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۴				۱۵۰۰۰
۵				۱۷۵۰۰
۶				۹۰۰۰
۷				۱۰۰۰۰
۸	۰/۱	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۹				۱۵۰۰۰
۱۰				۱۷۵۰۰
۱۱				۹۰۰۰
۱۲				۱۰۰۰۰
۱۳	۰/۲۵	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۱۴				۱۵۰۰۰
۱۵				۱۷۵۰۰
۱۶				۹۰۰۰
۱۷				۱۰۰۰۰
۱۸	۰/۵	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۱۹				۱۵۰۰۰
۲۰				۱۷۵۰۰
۲۱				۹۰۰۰
۲۲				۱۰۰۰۰
۲۳	۰/۷۵	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۲۴				۱۵۰۰۰
۲۵				۱۷۵۰۰

جدول ۲-ب – مشخصات آزمایشات انجام شده برای d/D=۰/۳

شماره آزمایش	فاصله نسبی (G/D)	قطر لوله اصلی (mm)	قطر لوله فرعی (mm)	عدد رینولدز
۱				۹۰۰۰
۲				۱۰۰۰۰
۳	۰	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۴				۱۵۰۰۰
۵				۱۷۵۰۰
۶				۹۰۰۰
۷				۱۰۰۰۰
۸	۰/۱	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۹				۱۵۰۰۰
۱۰				۱۷۵۰۰
۱۱				۹۰۰۰
۱۲				۱۰۰۰۰
۱۳	۰/۲۵	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۱۴				۱۵۰۰۰
۱۵				۱۷۵۰۰
۱۶				۹۰۰۰
۱۷				۱۰۰۰۰
۱۸	۰/۵	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۱۹				۱۵۰۰۰
۲۰				۱۷۵۰۰
۲۱				۹۰۰۰
۲۲				۱۰۰۰۰
۲۳	۰/۷۵	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰
۲۴				۱۵۰۰۰
۲۵				۱۷۵۰۰

۲-۲- مشخصات مواد مورد استفاده جهت مشاهده الگوی جریان

از بین روش‌های موجود جهت آشکارسازی الگوی جریان، در این بررسی از ذرات پلی‌استایرن با چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و یک دستگاه دوربین دیجیتالی استفاده شده است. این ذرات به دلیل داشتن چگالی بسیار نزدیک به چگالی آب، نتایج نسبتاً دقیقی را در اندازه گیری طول نواحی جدایی اطراف خطوط لوله به دست می‌دهند. همچنین علت استفاده از این ذرات به جای مواد رنگی، عدم پخش شدگی آن‌ها در ورود به محیط آب و قابلیت ردیابی آن-ها در حین جریان است. این روش پیش از این توسط بسیاری از پژوهشگران دیگر مانند هاتیپ اوغلو و آوکی در سال ۲۰۰۳ مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۳- روند انجام آزمایشات

همانگونه که پیش از این بیان گردید در انجام آزمایش‌های این پژوهش تغییرات سه پارامتر موثر بر الگوی جریان اطراف خطوط لوله سوار بر هم مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از:- عدد رینولدز جریان بر مبنای قطر اصلی لوله، فاصله نسبی دو لوله از همدیگر و نسبت قطر دو لوله. در ابتدا میله‌ها در فواصل نسبی مورد نظر کارگذاشته شده و بعد از آن با استفاده از چسب به دیواره های کانال تثبیت می گردیدند. سپس پمپ روشن شده و دبی جریان به آرامی به مقدار مورد نظر بر اساس عدد رینولدز لوله اصلی رسانده شده و عمق آب نیز با استفاده از سرریز انتهایی کانال تنظیم می-گشت. پس از گذشت زمان اندک و رسیدن نوسانات دبی به مقدار صفر، عمق آب ثابت شده و جریان دایمی در کانال برقرار شده و آزمایش اصلی آغاز می‌شده است. پس از آن جهت آشکارسازی الگوی جریان ذرات پلی‌استایرن از فاصله مناسبی در بالادست

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]

جریان بر روی سطح آب رها می‌گردیده است. همچنین برای ثبت مشاهدات آزمایشگاهی از کلیه مراحل انجام آزمایش بوسیله یک دوربین دیجیتالی فیلم‌برداری صورت گرفته و طول نواحی جدایی در اطراف خطوط لوله اندازه گیری می‌شده است.

در این آزمایشات عدد رینولدز مطابق رابطه ذیل تعریف می گردد:

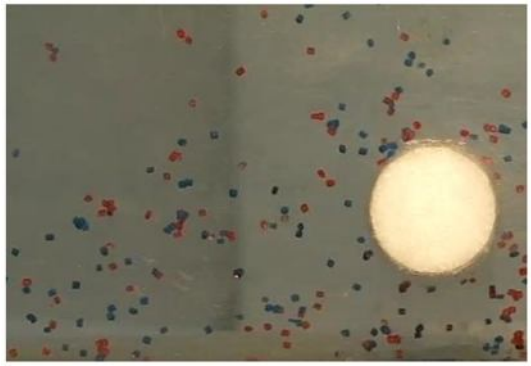
$$\mathrm{Re} = UD/\nu \qquad (۱)$$

که در آن U سرعت متوسط جریان آب در کانال، D قطر لوله اصلی و ν ویسکوزیته سینماتیکی آب می‌باشد که در مورد آب در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برابر ۱ میلی متر مربع بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

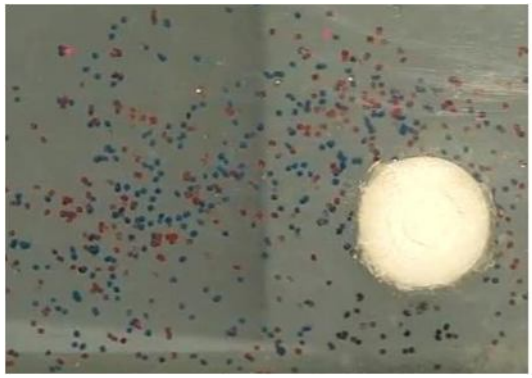
۳- نتایج مطالعه آزمایشگاهی

بر اساس مطالب پیشین ابتدا جهت ارزیابی روند انجام آزمایشات، آزمایش‌هایی بر اساس اطلاعات زنگ و همکاران مطابق جدول ۱ ترتیب داده شد. این آزمایشات برای لوله منفرد انجام یافته و در شکل ۳ دو نمونه از تصاویر برداشتی برای دو قطر لوله متفاوت نشان داده شده است. جهت جریان در این تصاویر از راست به چپ بوده است.

(الف)

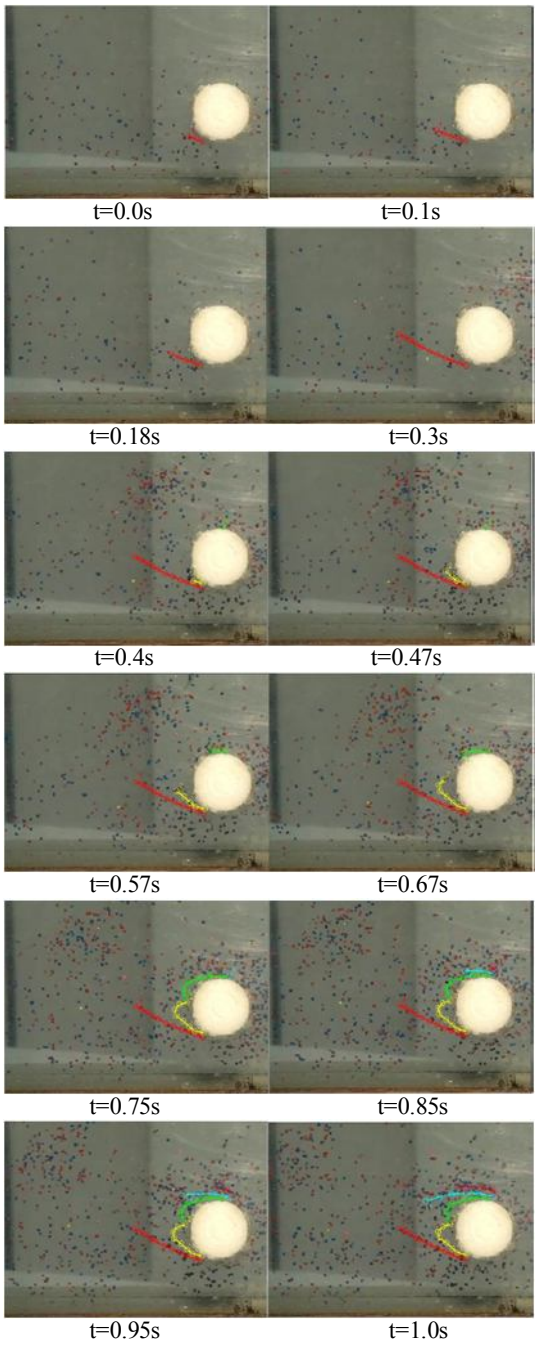


(ب)



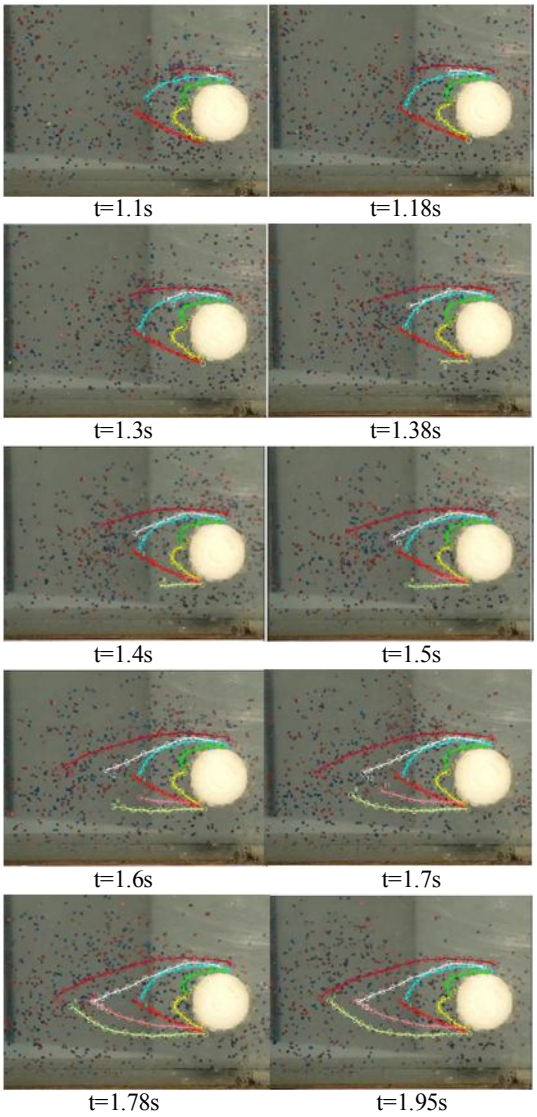
شکل۳- نمونه برداشت‌های تصویری برای لوله منفرد، (الف): قطر ۵۰ میلی متر، (ب): قطر ۶۰ میلی متر

پس از انجام آزمایشها و فیلم‌برداری با سرعت بالا، تصاویر برداشت شده در نرم افزار پردازش تصویر Image-J مورد آنالیز قرار گرفته و مسیر حرکت تعدادی از ذرات در مجاورت لوله و در ناحیه پایین دست مشخص گردیده است. پس از بدست آمدن مسیر ذرات و نمایان شدن گردابه‌ها در پایین دست لوله، طول این گردابه‌ها با کمک مختصات موجود در نرم افزار بدست آمده و میانگین این طول‌ها به عنوان طول جدایش و یا بازگردش در پایین دست لوله محاسبه شده است. شکل ۴ چند نمونه از تصاویر برداشت شده و شناسایی مسیر ذرات را نشان می‌دهد.



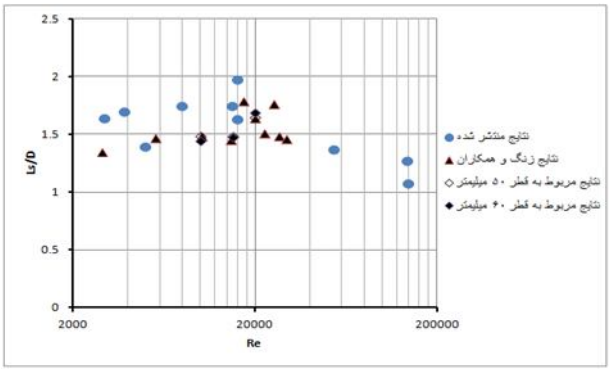
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]



شکل۴- نمونه‌هایی از تصاویر ردیابی ذرات توسط نرم افزار

در این بررسی طول ناحیه جدایش فاصله میان لبه پایین دست لوله تا انتهای ناحیه بازچرخش جریان و جایی که مقدار میانگین سرعت صفر می‌گردد، در نظر گرفته شده است. شکل ۵ طول نواحی جدایش جریان اطراف خط لوله منفرد را بر حسب عدد رینولدز نشان می دهد.



شکل۵- طول ناحیه جدایش جریان برای لوله منفرد بر حسب عدد رینولدز

در این شکل نتایج مربوط به آزمایشات زنک و همکاران و نیز سایر نتایج انتشار یافته توسط پژوهشگران آورده شده است. همان‌طور که از روی شکل ۵ ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده در این تحقیق مطابقت قابل قبولی با نتایج انتشار یافته سایر پژوهشگران دارند. همچنین در جدول ۳ طول نواحی جدایش جریان برای لوله منفرد به ازای اعداد رینولدز و قطرهای مختلف آورده شده است.

جدول ۳ –نتایج طول نواحی جدایش آزمایشات صحت سنجی

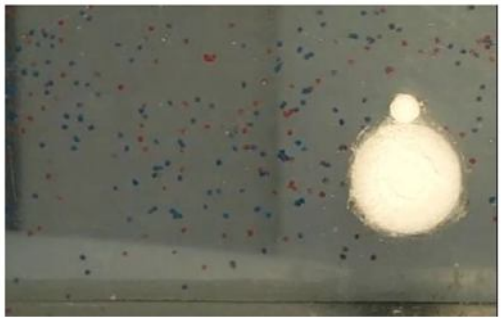
آزمایش	قطر لوله (mm)	عدد رینولدز	طول جدایش (L_s/D)
آزمایش صحت سنجی ۱	۵۰	۱۰۰۰۰	۱/۴۸۸
		۱۵۰۰۰	۱/۴۹
		۲۰۰۰۰	۱/۶۵
آزمایش صحت سنجی ۲	۶۰	۱۰۰۰۰	۱/۴۴۵
		۱۵۰۰۰	۱/۴۸
		۲۰۰۰۰	۱/۶۹

همچنین با توجه به نتایج تصویری حاصل شده از روی آزمایش‌ها می توان دریافت که نقاط جدایش نزدیک لوله در دو بخش بالایی و تحتانی لوله مورد آزمایش اندکی متفاوت بوده و از حدود مقدار ۸۰ درجه (در بخش بالایی لوله) تا حدود ۱۰۰ درجه (در بخش تحتانی لوله) تغییر می‌یابد. این نتایج آزمایشگاهی با نتایج تجربی و عددی سایر پژوهشگران همخوانی نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد [۱۱ و ۱۲]. تغییرات عدد استروهال نیز برای آزمایشات مشابه انجام یافته توسط عده ای از پژوهشگران به صورت عددی بررسی شده است [۱۳]. در این رابطه اطلاعاتی با تغییر عمق استغراق لوله و برای سه عدد رینولدز و دو عدد فرود داده شده است ولی اعداد رینولدز مورد استفاده توسط این پژوهشگران کمتر بوده و قابل قیاس با نتایج حاضر نمی باشند. اما با توجه به نمودار تغییرات عدد استروهال در مقابل عدد رینولدز ارائه شده توسط سامر و فردسو [۱]، در مورد آزمایش مبنای بررسی حاضر با در نظر گرفتن محدوده جریان زیربحرانی، مقدار عدد استروهال در حدود ۰/۲ پیش بینی می‌گردد و بر اساس نتایج تصویری ارائه شده برای آزمایش مبنا، این مقدار بطور تقریبی برابر ۰/۱۸ برآورد می‌شود که قابل قیاس با نتایج متناظر سایر پژوهشگران است [۱۲]. از طرفی با توجه به فاصله مناسب لبه پایینی لوله از بستر به اندازه قطر لوله تغییری در عدد استروهال بوجود نخواهد آمد.

در ادامه تصاویر برداشتی برای فواصل نسبی مختلف دو لوله از همدیگر با قطر نسبی ۰/۲۵ در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

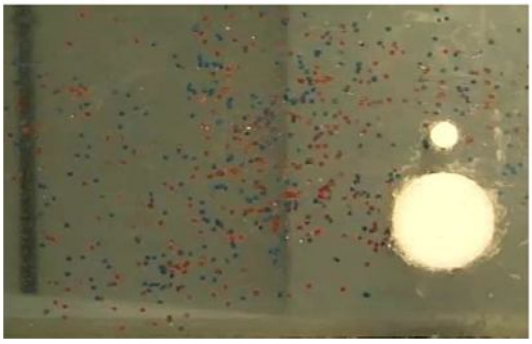
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]



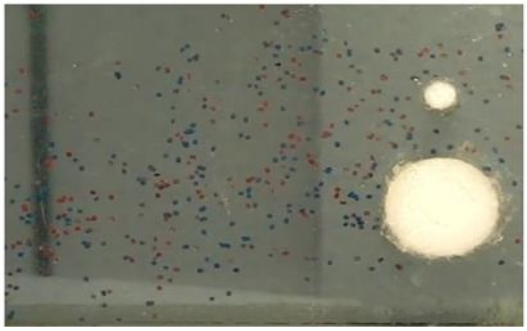
الف) G/D=0.



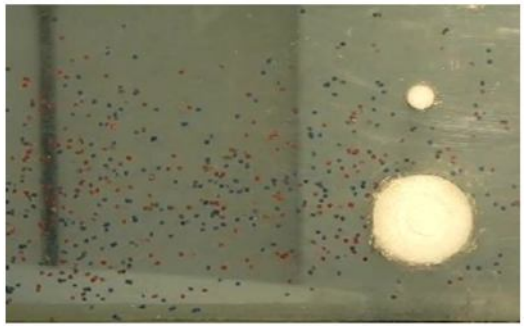
ب) G/D=0.1



پ) G/D=0.25



ت) G/D=0.5



ث) G/D=0.75

شکل۶- نمونه‌هایی از تصاویر برداشتی به ازای فواصل مختلف دو لوله از یکدیگر

همانگونه که از روی این تصاویر ملاحظه می شود اندازه گیری طول جدایش در لحظات مختلف آزمایشات در ابتدا اندکی دشوار به نظر می‌رسد ولی با روی هم گذاری تصاویر مختلف و دنبال نمودن مسیر حرکت ذرات در فیلم‌برداری‌های انجام شده طی آزمایشات مختلف می‌توان با دقت نسبتاً خوبی طول جدا شده را برآورد نمود. آزمایشات مشابهی نیز برای نسبت قطر ۰/۳۳ انجام شده است. همانند روش ذکر شده پیشین، در این گروه‌های آزمایشی نیز تصاویر برداشتی با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر Image-J مورد آنالیز قرار گرفته و مسیر حرکت تعدادی از ذرات در مجاورت لوله و در ناحیه پایین دست معلوم گردید. پس از بدست آمدن مسیر ذرات و نمایان شدن گردابه‌ها در پایین دست لوله، طول این گردابه‌ها با کمک مختصات موجود در نرم افزار بدست آمده و میانگین طول‌های مزبور به عنوان طول جدایش در پایین دست لوله محاسبه شد. بدین ترتیب نتایج تجربی طول نسبی (بر حسب قطر لوله اصلی) نواحی جدایش جریان در پایین‌دست لوله اصلی و فرعی به ازای اعداد رینولدز، فواصل نسبی مختلف بین دو لوله به ترتیب برای دو قطر نسبی ۰/۲۵ و ۰/۳۳ در جداول ۴ و ۵ آورده شده‌اند.

جدول ۴ –نتایج طول نواحی جدایش آزمایشات برای قطر نسبی ۰/۲۵

شماره آزمایش	فاصله نسبی (G/D)	قطر لوله اصلی (mm)	قطر لوله فرعی (mm)	عدد رینولدز	طول جدایش پایین دست لوله اصلی (L_s/D)	طول جدایش پایین دست لوله فرعی (L_s/D)
۱				۹۰۰۰		۰/۵۱
۲				۱۰۰۰۰		۰/۵۷
۳	۰	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰		۰/۶
۴				۱۵۰۰۰		۰/۶۲
۵				۱۷۵۰۰		۰/۶۸
۶				۹۰۰۰	۰/۸	۰/۴۶
۷				۱۰۰۰۰	۰/۸۵	۰/۵
۸	۰/۱	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۰/۸۶	۰/۵۲
۹				۱۵۰۰۰	۰/۸۸	۰/۵۵
۱۰				۱۷۵۰۰	۰/۹۷	۰/۵۹
۱۱				۹۰۰۰	۰/۸۷	۰/۴
۱۲				۱۰۰۰۰	۰/۹	۰/۴۶
۱۳	۰/۲۵	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۰/۹۴	۰/۴۷
۱۴				۱۵۰۰۰	۱	۰/۴۷
۱۵				۱۷۵۰۰	۱/۲	۰/۵
۱۶				۹۰۰۰	۱/۳۸	۰/۳۱
۱۷				۱۰۰۰۰	۱/۴۱	۰/۳۴
۱۸	۰/۵	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۱/۴۵	۰/۳۵
۱۹				۱۵۰۰۰	۱/۴۸	۰/۳۶
۲۰				۱۷۵۰۰	۱/۵۴	۰/۳۸
۲۱				۹۰۰۰	۱/۳۵	۰/۳۳
۲۲				۱۰۰۰۰	۱/۴۴	۰/۳۴
۲۳	۰/۷۵	۶۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۱/۴۸	۰/۳۴
۲۴				۱۵۰۰۰	۱/۴۹	۰/۳۵
۲۵				۱۷۵۰۰	۱/۶۵	۰/۳۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]

ابتدا از روی نتایج جداول ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود در حالتی که دو لوله به هم چسبیده شده باشند، مجموعه مانند یک لوله منفرد عمل نموده ولی طول جدایش در مقایسه با طول متناظر لوله منفرد کاهش می‌یابد. برای نمونه درصد کاهش طول جدایش برای لوله های مرکب به هم چسبیده در مقایسه با لوله منفرد در مورد عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و نسبت قطر ۲۵/۰ دو لوله حدود ۵۸ درصد و برای نسبت قطر ۳۳/۰ بیش از ۶۰ درصد بوده است. کاهش این طول و سرکوب گردابه های پشت لوله در عمل می تواند به کاهش ارتعاشات خطوط لوله مذکور کمک شایانی بکند و از تبعات ناشی از نوسانات لوله مانند پدیده قفل شدگی و خستگی بکاهد. این نتیجه به نوعی با نتایج زنک و همکاران[۸] هم سویی دارد. اگرچه با افزایش عدد رینولدز طول ناحیه جدایش در حالت دو لوله به هم چسبیده افزایش می‌یابد، ولی در هر حال در مقایسه با لوله منفرد، طول مزبور کاهش قابل ملاحظه ای را از خود نشان می‌دهد.

جدول ۵–نتایج طول نواحی جدایش آزمایشات برای قطر نسبی ۰/۳۳

شماره آزمایش	فاصله نسبی (G/D)	قطر لوله اصلی (mm)	قطر لوله فرعی (mm)	عدد رینولدز	طول جدایش پایین دست لوله اصلی (L_s/D)	طول جدایش پایین دست لوله فرعی (L_s/D)
۱				۹۰۰۰	۰/۴۳	
۲				۱۰۰۰۰	۰/۵۴	
۳	۰	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۰/۵۷	
۴				۱۵۰۰۰	۰/۵۹	
۵				۱۷۵۰۰	۰/۶۴	
۶				۹۰۰۰	۰/۷۲	۰/۵
۷				۱۰۰۰۰	۱	۰/۵۱
۸	۰/۱	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۱/۰۸۳	۰/۵۴۸
۹				۱۵۰۰۰	۱/۱	۰/۵۲
۱۰				۱۷۵۰۰	۱/۱۴	۰/۵۵
۱۱				۹۰۰۰	۰/۸	۰/۴۳
۱۲				۱۰۰۰۰	۱/۱۲	۰/۵
۱۳	۰/۲۵	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۱/۱۸	۰/۵
۱۴				۱۵۰۰۰	۱/۲	۰/۵۲
۱۵				۱۷۵۰۰	۱/۳	۰/۵۵
۱۶				۹۰۰۰	۱/۰۲	۰/۵
۱۷				۱۰۰۰۰	۱/۱۵	۰/۵۷
۱۸	۰/۵	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۱/۲۶	۰/۶۲
۱۹				۱۵۰۰۰	۱/۵	۰/۶۶
۲۰				۱۷۵۰۰	۱/۶۹	۰/۷۳
۲۱				۹۰۰۰	۰/۸۸	۰/۴۵
۲۲				۱۰۰۰۰	۱/۳۵	۰/۴۶
۲۳	۰/۷۵	۵۰	۱۵	۱۲۵۰۰	۱/۴۲	۰/۵۷
۲۴				۱۵۰۰۰	۱/۵۵	۰/۶۱
۲۵				۱۷۵۰۰	۱/۶۶	۰/۷۶

همچنین با افزایش فاصله نسبی دو لوله، اثرات آن‌ها به تدریج بر یکدیگر کم شده و طول جدایش به ازای اعداد رینولدز مختلف، با ازدیاد فاصله نسبی دو لوله از هم‌دیگر تا مقدار ۰/۵ افزایش می‌یابد. در این حالت طول جدایش در پایین دست لوله اصلی به مقدار متناظر منفرد نزدیک می‌شود. به علاوه برای فواصل نسبی بیش از ۰/۲۵ اثر دو لوله بر یکدیگر بسیار کمرنگ شده و دو لوله بصورت مجزا عمل می‌کنند. ولی با افزایش فاصله نسبی بین دو لوله از مقدار ۰/۵ به ۰/۷۵ تغییر طول جدایش برای عدد رینولدز ۹۰۰۰ اندکی متفاوت از سایر اعداد رینولدز بوده است و تا حدودی کاهش یافته است. همچنین با افزایش نسبت قطرها از مقدار ۰/۲۵ به ۰/۳۳، در مورد عدد رینولدز ۹۰۰۰ و برای تمامی فواصل نسبی مورد آزمایش طول جدایش برای لوله اصلی کاهش و برای لوله فرعی افزایش یافته است. این امر در مورد اعداد رینولدز بالاتر برای فواصل نسبی ۰/۵ و ۰/۷۵ نیز کم و بیش حفظ شده است. در مورد لوله منفرد و هنگامی که فواصل لوله‌ها از یکدیگر زیاد است، الگوی جریان تقریباً یکسان و متقارنی مشاهده می‌شود اما زمانی که لوله‌ها به یکدیگر نزدیک هستند، گردابه فکنی متداول مشاهده نمی‌شود.

۴ – نتیجه گیری

انتقال مواد نفتی و آب به ترتیب از سکوهای دریایی و نواحی ساحلی امری اجتناب ناپذیر در صنعت نفت فراساحلی بشمار می‌آید. از اینرو خطوط لوله در برخی مواقع به صورت دو تایی و سوار بر هم و با قطرهای مختلف بزرگ و کوچک طراحی و اجرا می‌شوند. در این صورت کاربرد آن‌ها متفاوت بوده و هر کدام از آن‌ها انتقال مواد نفتی (مانند لوله اصلی) و یا آب (مانند لوله فرعی) را عهده دار هستند. با توجه به پیچیدگی جریان در اطراف این نوع چیدمان‌ها و اهمیت این خطوط در صنعت نفت فراساحلی، بررسی الگوی جریان اطراف خطوط لوله مزبور از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده به گونه ای که بتوان آرایش مناسبی را با توجه به تاثیر دو لوله بر یکدیگر شناسایی نمود. در این پژوهش جدایش جریان در پایین دست دو لوله با آرایش سوار بر هم به ازای اعداد رینولدز مختلف، فواصل نسبی و قطر نسبی متفاوت دو لوله به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های گذشته نتایج به‌دست آمده می‌توانند به صورت زیر جمع بندی شوند:

۱- الگوی عمومی جریان متوسط زمانی برای ناحیه دنباله خط لوله اصلی منفرد در اعداد رینولدز مختلف مورد آزمایش به صورت جفت گردابه متقارن می‌باشد.

۲- با اضافه شدن خط لوله فرعی به اصلی و در حالتی که فاصله نسبی بین آنها صفر بوده است، شکل متقارن جریان در ناحیه دنباله از بین رفته و طول نواحی جدایی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]

۳- درصد کاهش طول جدایش برای لوله‌های مرکب به هم چسبیده در مقایسه با لوله منفرد در مورد عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و نسبت قطر ۲۵/۰ دو لوله حدود ۵۸ درصد و برای نسبت ۳۳/۰ بیش از ۶۰ درصد بوده است.

۴- اگرچه با افزایش عدد رینولدز طول ناحیه جدایش در حالت دو لوله به هم چسبیده افزایش می یابد، ولی در هر حال در مقایسه با لوله منفرد، طول مزبور کاهش قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می-دهد.

۵- با افزایش فاصله نسبی بین دو لوله، طول نواحی جدایش جریان برای لوله اصلی افزایش و برای لوله فرعی کاهش می‌یابد.

۶- با فراتر رفتن فاصله نسبی از مقدار ۰/۲۵، الگوی جدایش جریان در ناحیه دنباله به حالت متقارن درآمده و تاثیر دو لوله بر یکدیگر کم‌رنگ می‌شود. با رسیدن فاصله نسبی به مقدار ۰/۵، طول جدایش در پایین دست لوله اصلی به مقدار متناظر منفرد نزدیک می‌شود.

۵ - تشکر و قدردانی

بی شک انجام آزمایشات این تحقیق بدون همکاری تکنسین های آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشگاه صنعتی سهند امکان‌پذیر نبوده است، بدینوسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدرانی خود را از ایشان اعلام می‌دارند.

۶ - مراجع

1- Sumer, B.M. and Fredsoe, J., (1997), *Hydrodynamics around Cylindrical Structures*, World scientific, Vol. 12, p. 1-121.

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

3- Sumner, D., Wong, S.S.T, Price, S.J. and Paidoussis, M.P., (1999), *Fluid behavior of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow*, Journal of Fluid and Structures, Vol. 13, Issue 3, p. 309-338.

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

5- Cheng, X., Wang, Y. and Wang, G., (2012), *Hydrodynamic forces on a large pipeline and a small pipeline in piggyback configuration under wave action*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 138, No.5, p. 394-405.

6- Zang, Z., Gao, F. and Gui, J., (2012), *Vortex shedding and vortex-induced vibration of piggyback pipelines in steady currents*, Proceeding of 22th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Rhodes, Greece, June 17-22.

7- Yang, K., Cheng, L., An, H., Bassom, A.P. and Zhao, M., (2013), *The effect of piggyback cylinder on the flow characteristics in oscillatory flow*, Journal of Ocean Engineering, Vol. 62. p. 45-55.

8- Zang, Z.P, Gao, F.P and Cui, J.S., (2013), *Physical modeling and swirling strength analysis of vortex shedding from near-bed piggyback pipelines*, Journal of Applied Ocean Research, Vol. 40. p. 50-59.

9- Chiew, Y.M., (1991), *Prediction of Maximum Scour at Submarine pipelines*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 4, p. 452-466.

10- Hatipoglu, F. and Avci, I., (2003), *Flow around a Partly Buried Cylinder in a Steady Current*, Journal of Ocean Engineering, Vol. 30. p. 239-249.

11- Akoz, M.S. and Kirkgoz, M. S., (2009), *Numerical and Experimental Analysis of the Flow around a Horizontal Wall-Mounted Circular Cylinder*, Transaction of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 33, No.2, p. 189-215

12- Tutar, M. and Holdo, A.E., (2001), *Computational Modelling of Flow around a Circular Cylinder in Sub-critical Flow Regime with Various Turbulence Models*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 35, p.763-784.

13- Reichl, P., Hourigan, K. and Thompson, M., (2003), *The Unsteady Wake of a Circular Cylinder near a Free Surface*, Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 71. p. 347-359.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.10.6]