# بررسی تاثیر فواصل کارگذاری خطوط لوله فراساحلی بر جدایش جریان اطراف آن ها با استفاده از مدل های آزمایشگاهی و عددی

**بهمن ارشد شب خانه[۱]، حبیب حکیم زاده[۲*]**

۱- کارشناس ارشد سازه های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

**چکیده**

در این مقاله به منظور کمک به درک بهتر اندرکنش لوله- جریان، تغییرات به وجود آمده در جدایش جریان اطراف خطوط لوله فراساحلی به ازای نسبت های متفاوت فاصله کارگذاری به قطر لوله به صورت آزمایشگاهی و عددی در حالت جریان دایمی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدلسازی آزمایشگاهی، آزمایش هایی در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک ترتیب داده شد. آزمایش ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰متر، عرض ۰/۳متر و عمق ۰/۵متر و با استفاده از لوله PVC به قطر ۶/۳۵ سانتی متر (به ازای نسبت های متفاوت فاصله کارگذاری به قطر لوله) انجام گرفته است. جهت مشاهده جدایی جریان از ذرات پلی استایرن که دارای چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب بوده، استفاده شده است. همچنین به منظور کمک به درک هر چه بهتر پدیده از کلیه مراحل انجام آزمایش ها به وسیله دوربین دیجیتالی فیلمبرداری صورت گرفته است. در بخش شبیه سازی عددی نیز میدان جریان با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی "FLUENT" تحلیل شده است. سرانجام نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی این پژوهش مقایسه شده و تطابق خوبی حاصل شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله بین دو لوله، طول ناحیه جدایی در پایین دست لوله دوم کاهش می یابد ولی پس از فاصله معینی دو لوله بطور مستقل از هم عمل می کنند.

**کلمات کلیدی:** جدایش جریان، خطوط لوله فراساحلی، مدل آزمایشگاهی، شبیه سازی عددی، روش حجم محدود

# Investigation on Impact of Offshore Pipelines Fitting Distances on Flow Separation around them Using Experimental and Numerical Models

**B. Arshad Shabkhaneh[1], H. Hakimzadeh[2]**

1- M.Sc. in Marine Structures, Sahand University of Technology
2- Associate Professor, Faculty of Civil Eng., Sahand University of Technology

**Abstract**

In this paper, in order to understand the flow-pipe interaction more clearly, the variations on flow separation around offshore pipelines with different ratios of fitting distances due to the steady current have experimentally and numerically been investigated. For the experimental modeling, a number of experiments have been conducted in the Hydraulic Research Laboratory. The experiments have been carried out in a flume with 10 meters length, 0.3 meters width and 0.5 meters depth using P.V.C pipe with 6.35 centimeters in diameter (for different distances to diameter ratios of fitting). To visualize the flow separation, the polystyrene particles having 1.05gr/cm$^3$ in density were used. Also, in order to understand the phenomenon as well as possible, the whole processes of tests have been recorded using a digital camera. For the numerical simulation section, the flow fields have been analyzed using a computational fluid

* نویسنده مسوول مقاله hakimzadeh@sut.ac.ir



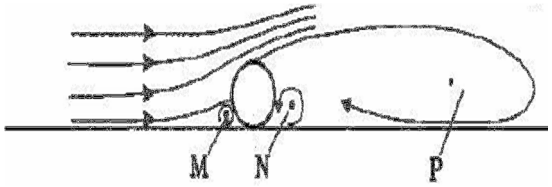
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

dynamics software "FLUENT". Finally, the results of numerical and experimental models were compared with one to another and good agreements were achieved between them. The results showed that with increasing the fitting distance between pipes, the separation length at downstream of the second pipe was gradually decreased, however, after a given distance the two pipes behaved separately.

**Keywords**: Flow Separation, Offshore Pipelines, Experimental Model, Numerical Simulation, Finite Volume Method.

**۱- مقدمه**

نیاز روز افزون بشر به سوخت های فسیلی باعث توسعه سریع صنایع فراساحلی گردیده است. از جمله مهم ترین سازه های فراساحلی که در صنعت نفت و گاز به منظور انتقال این فرآورده ها به میزان زیادی مورد استفاده قرار می گیرند، خطوط لوله بستر دریا می باشند. گسیختگی خطوط لوله پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی بسیار زیادی به دنبال خواهد داشت. هنگامی که سازه ای در محیط دریا قرار می گیرد، حضور سازه باعث تغییر الگوی جریان در فاصله نزدیکی از سازه شده که یک یا چند مورد از پدیده هایی نظیر انقباض جریان، شکل گیری گردابه های نعل اسبی در جلوی سازه، شکل گیری گردابه های چرخکی (با یا بدون گردابه فکنی) در پشت سازه و نیز تولید آشفتگی را به همراه خواهد داشت[۱]. این تغییرات می تواند منجر به خستگی سازه و یا آبشستگی در اطراف آن گردد و نهایتاً پایداری سازه را تهدید نماید[۲]. با توجه به این که جریان یک سویه دایمی در مقایسه با جریان رفت و برگشتی ناشی از موج می تواند تهدید جدی تری برای پایداری سازه باشد[۳] و نیز به دلیل این که در مناطق فراساحلی عملاً موج بستر دریا را حس نمی کند و از سوی دیگر به دلیل همراه شدن بسیاری از رودخانه های کشور با شبکه های وسیع انتقال نفت خام، گاز طبیعی، آب و فاضلاب، لزوم مطالعه پدیده جدایش جریان اطراف خطوط لوله در حالت جریان دایمی محسوس بوده و از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود. تحقیقاتی نیز در ارتباط با جدایش جریان اطراف خطوط لوله دریایی و یا استوانه های دایره ای انجام شده است. بیرمن و زدراکویچ در سال ۱۹۷۸ برای خط لوله واقع بر بستری که در معرض جریان قرار داشت، سه ناحیه جدایی یکی در بالادست لوله و دو تا در پایین دست آن مشاهده نمودند (شکل۱) که در آن P ناحیه جدایی اصلی و یا اولیه پایین دست، N ناحیه جدایی ثانویه پایین دست در خلاف جهت پیچک اصلی P و M ناحیه جدایی بالادست می باشد[۴].




**شکل ۱- طرح شماتیک نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خط لوله واقع بر بستر [٤]**

سامر و فردسو در سال ۱۹۹۷ مرجع کاملی را در ارتباط با رژیم های جریان اطراف یک استوانه دایره ای تحت جریان دایمی به ازای اعداد رینولدز مختلف ارائه نمودند [۵]. برارز در سال ۱۹۹۹ جریان و آبشستگی را برای خطوط لوله به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داد[۶]. وی به صورت تجربی برای $Re= 0.6\times10^4$ طول ناحیه جدایی در بالادست استوانه را برابر 1D و طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست استوانه را برابر 8D برآورد نمود. همچنین برای $Re= 10\times10^4$ نیز به صورت تجربی طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست استوانه را به ترتیب برابر با 1.5D و 10D بدست آورد. ایشان در یک فرآیند شبیه سازی عددی نیز در $Re= 1.5\times10^4$ طول ناحیه جدایی در بالادست استوانه را برابر با 0.77D و در پایین دست برابر با 7D پیش بینی نمود. هاتیپ اوقلو و آوکی در سال ۲۰۰۳ به صورت عددی و تجربی الگوی جریان را برای خط لوله ای واقع بر بستر و نیز نیمه مدفون مورد بررسی قرار داده و نتایج آن را ارائه نمودند[۷]. در سال ۲۰۰۵ لیانگ و چنگ کارایی مدل های آشفتگی مختلف را



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

برای شبیه سازی جریان و آبشستگی اطراف لوله ای که به اندازه ۰/۳۷ برابر قطر خود بالای بستر صلب قرار گرفته بود، بررسی نمودند[۸ و ۹]. آنها دریافتند که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ برای کاربرد های مهندسی قابل اعتمادتر می باشد. همچنین زنگانه و یگانه در سال ۱۳۸۹ با توسعه یک مدل عددی بر مبنای روش عددی حجم محدود و استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ به بررسی تنش برشی بستر به ازای نسبت های مختلف فاصله لوله از بستر پرداختند و دریافتند که با افزایش فاصله مذکور تنش برشی بطور موثری کاهش می یابد [۱۰]. در سال ۱۳۸۷ عمرانی و حکیم زاده، الگوی جریان اطراف خط لوله منفرد نیمه مدفون را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند[۱۱]. آنها به صورت تجربی برای $Re = 1.27\times10^4$ طول ناحیه جدایی در بالادست خط لوله را برابر 0.9D و طول ناحیه جدایی اولیه و ثانویه در پایین دست خط لوله را به ترتیب برابر با 7.1D و 0.7D برآورد نمودند. وقتی که بیش از یک خط لوله در مجاورت همدیگر بر روی بستر دریا اجرا می گردد، با توجه به تعداد خطوط لوله و فاصله آن ها از همدیگر الگوی جریان در اطراف آن ها تغییر یافته و بالطبع جدایی جریان نیز دستخوش تغییر خواهد بود، از اینرو در این مقاله به بررسی تاثیر فواصل کارگذاری خطوط لوله فراساحلی بر جدایی جریان اطراف آن ها پرداخته شده است.

## ۲- مطالعه آزمایشگاهی

به طور عموم هدف از انجام آزمایشات بر روی مدل فیزیکی یافتن طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری به قطر لوله (L/D) و همچنین بررسی تغییرات الگوی جریان مورد نظر بوده است. به همین منظور یک سری آزمایش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشگاه صنعتی سهند ترتیب داده شد.

### ۲-۱- مشخصات کانال آزمایشگاهی

در این تحقیق آزمایش ها در کانالی آزمایشگاهی به طول ۱۰متر، عرض۰/۳ متر و عمق ۰/۵ متر(شکل۲) و با استفاده از لوله PVC به قطر ۶/۳۵ سانتی متر (به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری به قطر لوله) و در شرایط جریان دایمی انجام شده است. مهمترین بخش کارهای آزمایشگاهی انجام دقیق آزمایشها و ثبت مشاهدات و نتایج می باشد. بدین منظور ابتدا یک مقیاس با دقتی در حد میلی متر در پشت دیواره جانبی کانال و در زیر خطوط لوله نصب گردیده به طوری که محور X در امتداد طولی کانال باشد. دبی کانال از صفر تا ۳۰ لیتر بر ثانیه قابل تنظیم بوده است. دیواره های کانال از جنس پلکسی گلاس و کف آن پلاستیک فشرده می باشد. جریان آب توسط پمپی از مخزن به داخل کانال پمپاژ می گردد. در سرعت های بالا به دلیل ضربه های جریان خروجی از پمپ به قسمت ورودی کانال، سطح جریان در داخل کانال موجدار می شود که به منظور جلوگیری از این پدیده شبکه طوری شکل در بخش ورودی کانال تعبیه گردیده است به گونه ای که آشفتگی ها و نوسان های موجود در سطح جریان ورودی به حداقل رسیده و باعث یکنواخت شدن سرعت و شکل جریان می گردد. به منظور کمینه نمودن تاثیر مرزهای ورودی و خروجی کانال، لوله ها دقیقاً در وسط کانال و در فواصل ۵ متر نسبت به مرزهای ورودی و خروجی قرار داده شده است.

**شکل۲- کانال آزمایشگاهی**

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

جهت مشاهده الگوی جریان از ذرات پلی استایرن با چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب، استفاده شده است. این ذرات به دلیل داشتن چگالی بسیار نزدیک به



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

چگالی آب، نتایج نسبتاً دقیقی را در اندازه گیری طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله به دست می دهند. همچنین علت استفاده از این ذرات بجای مواد رنگی آن است که مواد رنگی بلافاصله پس از ورود به آب در آن پخش شده، لذا جهت ردیابی و اندازه گیری طول نواحی جدایی مناسب نمی باشند.

## ۲-۳- روش انجام آزمایش ها و مشخصات مدل های مورد آزمایش

روش انجام آزمایش های این پژوهش در حالت عمومی به صورت زیر بوده است: ابتدا لوله ها به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری به قطر لوله (L/D های مختلف) بر روی کف صاف هیدرولیکی کانال و نیز به منظور ممانعت از حرکت جانبی لوله ها به دیواره های جانبی کانال ثابت می گردیدند، که شرایط مرزی دو سر لوله به صورت گیردار می باشد. پس از آن که لوله ها به دیواره های جانبی کانال ثابت شد، پمپ روشن شده و مقدار دبی به ۱۸ لیتر بر ثانیه رسانده می شود، که در این صورت سرعت متوسط جریان در کانال برابر ۲۰ cm/s می باشد. بلافاصله پس از آن به وسیله سرریز که به منظور تنظیم عمق آب در قسمت مرز خروجی کانال تعبیه شده است، عمق آب به ۳۰ سانتی متر رسانده می شود. پس از گذشت زمان اندکی که نوسانات دبی به صفر رسید، عمق آب ثابت شده، جریان دایمی در کانال تثبیت شده و آزمایش اصلی آغاز می شود. اکنون ذرات پلی استایرن جهت پی بردن به فیزیک پدیده از فاصله مناسبی در بالادست جریان بر روی سطح آب رها می شوند. همچنین برای ثبت مشاهدات آزمایشگاهی از کلیه مراحل انجام آزمایش بوسیله یک دوربین دیجیتالی فیلمبرداری صورت گرفته و طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری به قطر لوله اندازه گیری می گردید (شکل۳).

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

$$Re=UD/\nu \qquad (۱)$$

که در آن $U$ سرعت متوسط جریان آب در کانال، $D$ قطر لوله و $\nu$ ویسکوزیته سینماتیکی آب می باشد که در مورد آب در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برابر $10^{-6}$ $m^2/s$ در نظر گرفته می شود.

## ۲-۴- نتایج مطالعه آزمایشگاهی

در اغلب موارد جهت اتصال سکوهای فراساحلی به تاسیسات ساحلی از دو یا چند خط لوله استفاده می شود تا در صورتی که یکی از آنها به هر دلیلی دچار آسیب گردید، وقفه ای در کار تاسیسات ساحلی به وجود نیاید. وقتی که بیش از یک خط لوله در مجاورت همدیگر بر روی بستر دریا اجرا می گردند، با توجه به تعداد خطوط لوله و فاصله آنها از همدیگر الگوی جریان اطراف آنها تغییر می کند.

در آزمایشات انجام شده، ذرات پلی استایرن رها شده در مسیر جریان، در فواصل مشخصی از بالادست و پایین دست خط لوله دچار پیچش می شوند. این پیچش ها معرف نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله می باشد.

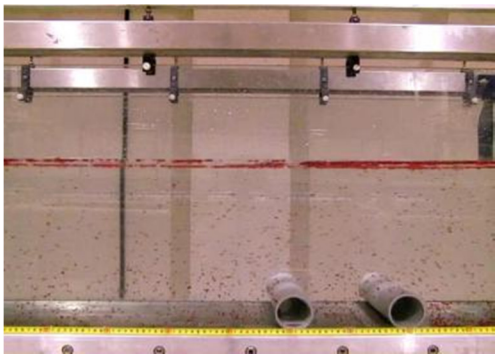
به طور کلی سه ناحیه جدایی، دو مورد در پایین دست و یک مورد در بالادست خطوط لوله قابل مشاهده بودند. همچنین برای فواصل کارگذاری متفاوت، فاصله خطوط لوله از همدیگر تعیین کننده بوده و بر الگوی جریان اطراف لوله ها تاثیر می گذارد.

در جدول ۱ مقادیر طول نواحی جدایی اندازه گیری شده در بالادست و پایین دست خطوط لوله به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری به قطر لوله (L/D) آمده است. از روی نتایج جدول۱ مشاهده می شود که طول ناحیه جدایی در بالادست لوله اول و نیز طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست لوله دوم برای فواصل کارگذاری متفاوت، تقریباً برابر بوده ولی با افزایش فاصله بین دو خط لوله، طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست لوله دوم کاهش می یابد و این کاهش تا L/D=6 ادامه پیدا می کند، به طوری که برای $L/D\geq 7$ دو خط لوله بطور مستقل از هم عمل کرده به گونه ای که برای هر کدام از خطوط لوله سه ناحیه جدایی مستقل از هم خواهیم داشت.



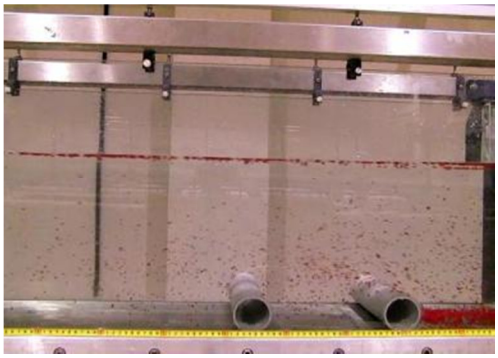
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

L/D=0



L/D=2

L/D=0.5

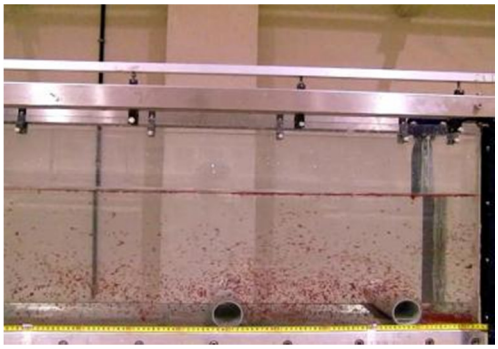


L/D=3

L/D=1

L/D=4

L/D=1.5



L/D=5

**شکل۳- تصاویر آزمایش های انجام شده به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری به قطر لوله(L/D)**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

**جدول۱- طول نواحی جدایی اطراف خطوط لوله به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری**

| طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست لوله دوم | طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست لوله دوم | طول ناحیه جدایی در بالادست لوله اول | $Re=UD/\nu$ | $L/D$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.75D | 5.8D | 1.1D | 12700 | 0 |
| 0.6D | 5.2D | 1D | 12700 | 0.5 |
| 0.6D | 4.9D | 1D | 12700 | 1 |
| 0.6D | 4.8D | 1D | 12700 | 1.5 |
| 0.6D | 4.4D | 1D | 12700 | 2 |
| 0.6D | 4.2D | 1D | 12700 | 3 |
| 0.6D | 4.1D | 1D | 12700 | 4 |
| 0.6D | 3.9D | 1D | 12700 | 5 |
| 0.6D | 3.7D | 1D | 12700 | 6 |

از روی نتایج آزمایشات مشاهده می شود که علاوه بر سه ناحیه جدایی ذکر شده در فاصله بین دو خط لوله نیز گردابه هایی تشکیل می گردد که با افزایش فاصله بین خطوط لوله این گردابه نیز بزرگتر می گردد.

## ۳- مطالعه عددی

جهت شبیه سازی عددی برای کاهش زمان محاسبات قسمتی از طول کانال آزمایشگاهی را به عنوان ناحیه محاسباتی در نظر می گیرند.

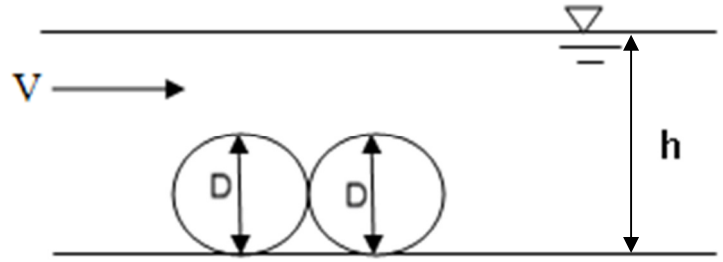
فرض بر این است که در این طول، جریان پیش از رسیدن به مانع به حالت توسعه یافته رسیده باشد. در این تحقیق نصف طول کانال مورد نظر به عنوان ناحیه محاسباتی انتخاب شده است.

شکل۴ بخشی از محیط محاسباتی مورد نظر را به صورت شماتیک نمایش می دهد.

شبکه بندی اولیه مدل بوسیله پیش پردازنده "GAMBIT" صورت گرفته و پس از ورود به نرم افزار "FLUENT" تکمیل گردیده است. شبکه های به کار رفته در مدل از نوع مثلثی بی ساختار می باشند. در نواحی که نیاز به اطلاعات بیشتری از الگوی جریان می باشد شبکه ها ریزتر انتخاب شده اند.

### ۳-۱- شرایط مرزی مدل

شرایط مرزی، تعیین کننده ویژگی های جریان در مرزها با توجه به فیزیک مساله می باشد. شرایط مرزی اجزای بسیار مهم و تعیین کننده ای در نرم افزار شبیه ساز "FLUENT" می باشد.




L/D=0

D: قطر لوله که برابر ۶/۳۵ cm می باشد.
V: سرعت متوسط جریان در کانال آزمایشگاهی که برابر ۲۰cm/s در نظر گرفته شده است.
L: فاصله دو خط لوله از همدیگر
h: عمق آب که برابر ۳۰cm می باشد.

**شکل٤- طرح شماتیک محیط محاسباتی**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

**۳-۱-۱- شرط مرزی سرعت ورودی**

از این شرط در مرز ورودی کانال استفاده می شود. در این قسمت باید اطلاعات مربوط به سرعت جریان ورودی در کانال و پارامترهای آشفتگی اعمال گردند. مشخصه های آشفتگی با استفاده از روش شدت و مقیاس طول تعریف شده اند.

شدت آشفتگی به صورت نسبتی از سرعت نوسانی به سرعت جریان متوسط تعریف می شود. در صورتی که جریان توسعه یافته باشد می توان از رابطه تجربی ذیل مقدار آن را برآورد نمود:

$$I=\frac{u'}{u_{ave}} \cong 0.16(Re_{DH})^{-0.125} \qquad (۲)$$

$u'$: سرعت جریان نوسانی

$u_{ave}$: سرعت جریان متوسط

$Re$: عدد رینولدز مربوطه

بر همین اساس مقادیر آشفتگی بر پایه عدد رینولدز مربوطه در محدوده ۴/۹٪ می باشد.

مقیاس طول آشفتگی یک کمیت فیزیکی است که به اندازه بزرگی گردابه هایی که نقل و انتقال انرژی را در جریان آشفته بر عهده دارند، مربوط می شود. در جریان کاملاً توسعه یافته در یک کانال، طول آشفتگی $l$ با رابطه ای به ابعاد کانال مربوط می شود و از آنجائی که گردابه ها و چرخک های آشفتگی نمی توانند بزرگتر از ابعاد کانال باشند، رابطه فیزیکی بین $l$ و ابعاد فیزیکی کانال وجوددارد:

$$l=0.07L \qquad (۳)$$

که $L$ بعد مناسبی از کانال می باشد. در کانال های با مقاطع غیر دایروی می توان قطر هیدرولیکی را برای این پارامتر در نظر گرفت. مقدار مقیاس طول آشفتگی برای مدل های مذکور با توجه به ابعاد کانال برابر ۰/۰۲۱ می باشد.

**۳-۱-۲- شرط مرزی فشار خروجی**

این شرط در مرز خروجی کانال بکار رفته که نیاز به بیان فشار و پارامترهای آشفتگی دارد، که بر اساس روابط (۲) و (۳) بدست می آیند.

**۳-۱-۳- شرط مرزی دیوار**

شرط مرزی دیوار برای محدود کردن نواحی سیال با مرز جامد بکار می رود. در این تحقیق دیواره های کف کانال و لوله به عنوان دیوار تعریف شده و شرط مرزی عدم لغزش نیز برای آن ها لحاظ گشته است. مقدار زبری لوله نیز برابر ۰/۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

**۳-۱-۴- شرط مرزی متقارن**

از این شرط هنگامی استفاده می گردد که هندسه فیزیکی و الگوی مورد نظر از تحلیل در مورد جریان سیال دارای تقارن آینه ای باشد. در این تحقیق سطح آزاد آب به عنوان مرز متقارن تعریف شده است. این بدان معنی است که از نوسانات آن صرفنظر شده است.

**۳-۲- انتخاب مدل آشفتگی**

اگرچه مدل های آشفتگی مرتبه دوم مانند مدل تنش رینولدز یا جبری می توانند تا حدود بسیار زیادی مقادیر تنش های رینولدز را دقیق برآورد نمایند ولی استفاده از این مدلها به جهت افزایش تعداد معادلات دیفرانسیل مستلزم صرف زمان بسیار زیاد محاسباتی است. از طرفی بر اساس مطالعات پژوهشگران پیشین از بین مدل های آشفتگی $k-\omega$ ، $k$ - $\varepsilon$ و SGS مدل $k$ - $\varepsilon$ بویژه در مورد بررسی حاضر نتایج بسیار خوبی را بدست داده است [۸ و ۹]. از اینرو مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق، مدل دو معادله ای *k-ε-RNG* بوده است. این مدل قادر به توصیف نسبتاً دقیق تنش های رینولدز است.

**۳-۳- روند تحلیل**

در این پژوهش از روش حل تفکیکی و خطی سازی ضمنی جهت حل معادلات استفاده شده است و روش های بکار رفته جهت گسسته سازی به شرح جدول۲ می باشد. فاکتورهای زیر تخفیف برای معادلات مورد نظر برابر اعداد پیش فرض نرم افزار انتخاب شده است که مطابق با مقادیر جدول۳ است.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

جدول۲- روش های گسسته سازی انتخاب شده

| معادله | روش گسسته سازی |
|---|---|
| Pressure | Body Force Weighted |
| Pressure – Velocity Coupling | Simple |
| Momentum | Second Order Upwind |
| Turbulence Kinetic Energy | Second Order Upwind |
| Turbulence Dissipation Rate | Second Order Upwind |

جدول۳- فاکتورهای زیرتخفیف انتخاب شده

| معادله | فاکتور زیر تخفیف |
|---|---|
| Pressure | 0.3 |
| Density | 1 |
| Momentum | 0.7 |
| Turbulence Kinetic Energy | 0.8 |
| Turbulence Dissipation Rate | 0.8 |

### ۳-۴- صحت سنجی مدل عددی

هاتیپ اوقلو و آوکی در سال ۲۰۰۳ به صورت تجربی و عددی الگوی جریان را برای خط لوله واقع بر بستر و همچنین نیمه مدفون مورد بررسی قرار داده و نتایج آن را ارائه نمودند[۷]. نتایج آن ها جهت صحت سنجی نتایج عددی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳-۴-۱- مدل تجربی هاتیپ اوقلو و آوکی

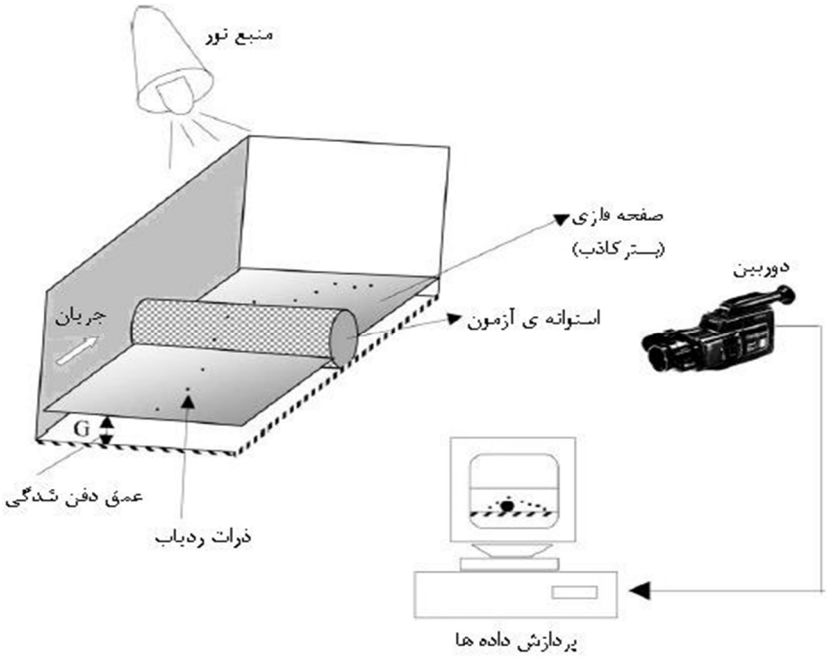
آزمایش ها در کانالی به طول ۲۷ متر، ارتفاع ۸۵ سانتی متر و عرض ۸۹ سانتی متر انجام گرفت. لوله مورد استفاده از جنس P.V.C می باشد. قطر لوله ۸/۹ سانتی متر و زبری معادل آن ۰/۵ میلی متر بوده و عمق آب ۴۰ سانتی متر و سرعت جریان ۲۳ سانتی متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین جهت ایجاد عمق دفن شدگی مورد نظر در دو طرف لوله از صفحه فلزی تختی استفاده شده است. جهت مشاهده الگوی جریان از ذرات پلی استایرن با چگالی ۱/۰۴ $gr/cm^3$ استفاده شده و از مراحل انجام آزمایشات توسط دوربین، فیلمبرداری به عمل آمده و طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست لوله اندازه گیری شده است. در شکل ۵ نحوه چیدمان آزمایشگاهی آورده شده است[۷].

### ۳-۴-۲- مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی هاتیپ اوقلو و آوکی

در جدول ۴ نتایج عددی این پژوهش با نتایج تجربی و عددی هاتیپ اوقلو و آوکی مقایسه شده است. از روی نتایج جدول ۴ ملاحظه می شود نتایج شبیه سازی عددی انجام شده نسبت به نتایج عددی هاتیپ اوقلو و آوکی، تطابق مناسب تری با نتایج تجربی آن ها دارد.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]




**شکل۵- چیدمان آزمایشگاهی[۷]**

**جدول ٤- مقایسه نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج تجربی هاتیپ اوقلو و آوکی[۷]**

| مقایسه نتایج | G/D | Re | طول ناحیه جدایی ثانویه در بالادست | | | طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست | | | طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | آزمایشگاهی | عددی | | آزمایشگاهی | عددی | | آزمایشگاهی | عددی | |
| | | | هاتیپ اوقلو | هاتیپ اوقلو | این پژوهش | هاتیپ اوقلو | هاتیپ اوقلو | این پژوهش | هاتیپ اوقلو | هاتیپ اوقلو | این پژوهش |
| | 0 | 26700 | 1D | 1.3D | 0.95D | 6.7D | 8.9D | 5.9D | - | 1.1D | 0.6D |

### ۳-۵- نتایج شبیه سازی عددی

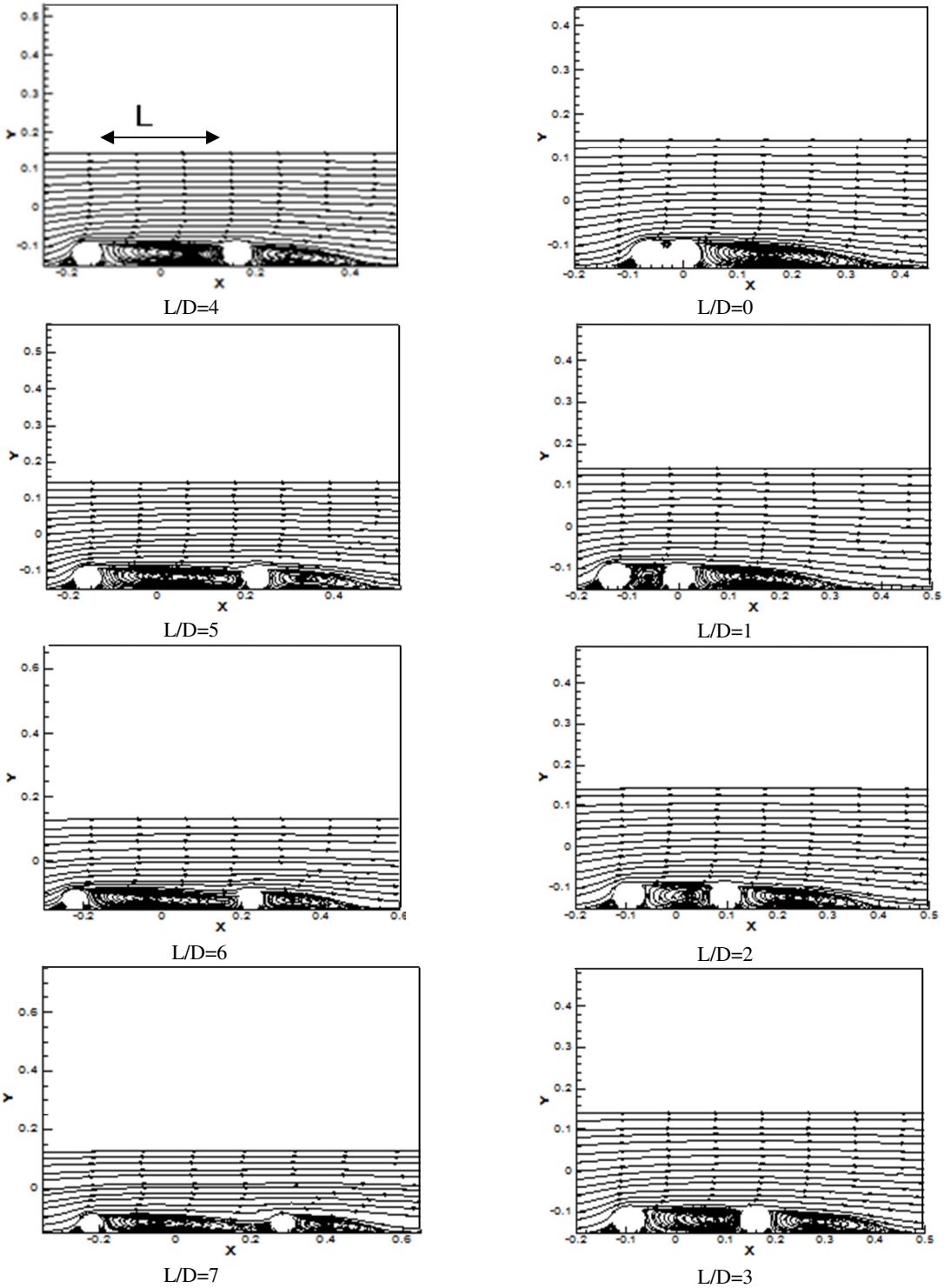
در شکل ۶ نتایج شبیه سازی بدست آمده از مدل عددی برای خطوط جریان اطراف خطوط لوله به ازای تعدادی از نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری آورده شده است. با توجه به نتایج حاصله می توان مشاهده نمود که با افزایش فاصله بین دو خط لوله، طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست خط لوله دوم کاهش می یابد و این کاهش تا L/D=6 ادامه پیدا می کند به طوریکه برای L/D ≥7 دو خط لوله بطور مستقل از هم عمل کرده و برای هر کدام از لوله ها سه ناحیه جدایی مستقل از هم خواهیم داشت. در حالت لوله های موازی برای L/D<7 علاوه بر سه ناحیه جدایی (یک مورد در بالا دست لوله اول و دو مورد در پایین دست لوله دوم) در فاصله بین دو لوله نیز یک گردابه بزرگ و دو چرخاب ثانوی در زیر هر یک از خطوط لوله تشکیل می‌گردد که با افزایش فاصله بین لوله ها برای L/D<7 طول این گردابه نیز بزرگتر می شود.

در شکل ۷ مقایسه‌ای میان پروفیل های سرعت جریان، روی خط لوله اول و دوم آورده شده است.

از روی شکل ۷ نتیجه گیری می شود که مقادیر سرعت روی خط لوله دوم نسبت به مقادیر سرعت روی خط لوله اول کوچکتر می‌باشد. در ضمن مقادیر سرعت روی هر یک از خطوط لوله به ازای فواصل کارگذاری متفاوت ثابت بوده و با افزایش فاصله بین خطوط تغییر چندانی در مقادیر سرعت مشاهده نمی شود.

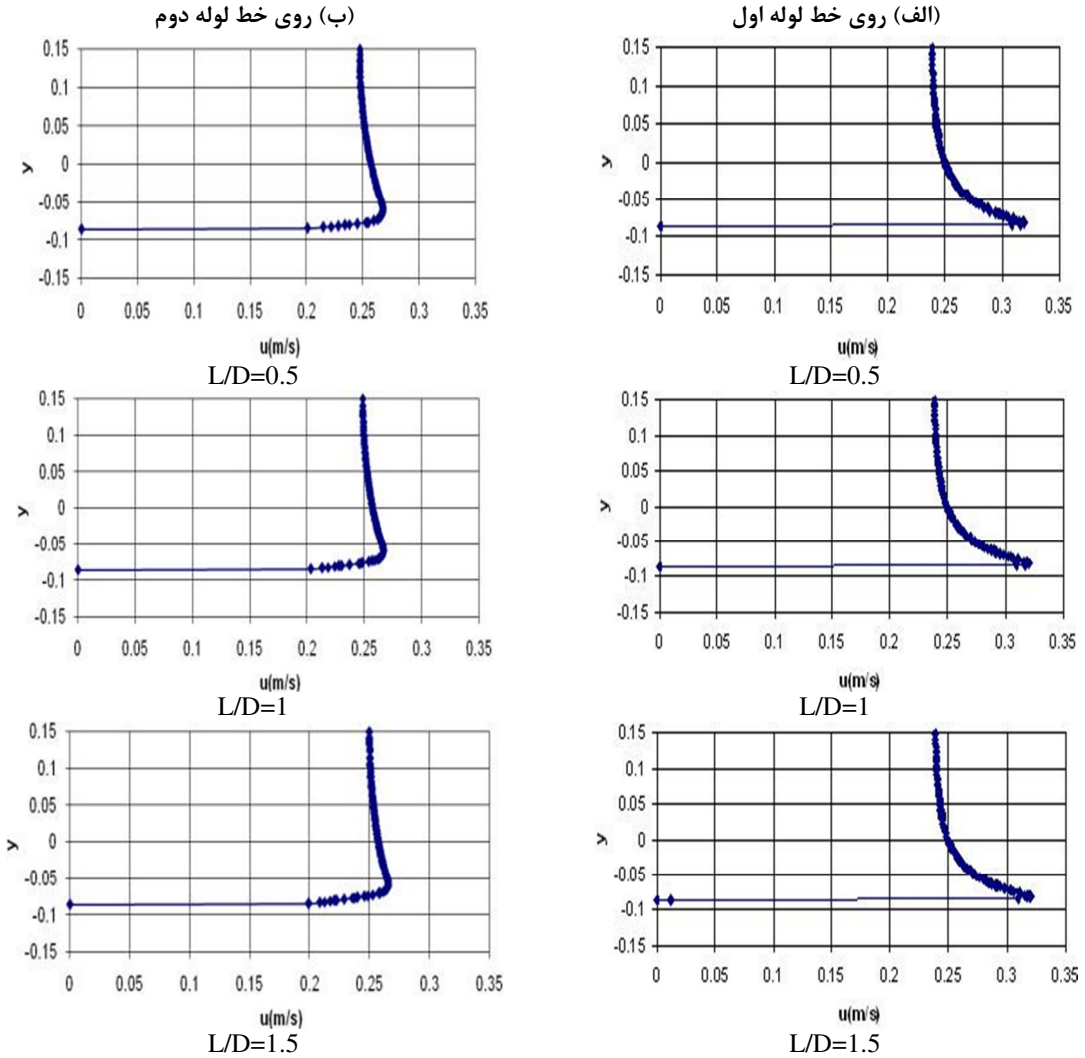


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]




**شکل ۶- طرح شماتیک نواحی جدایی اطراف خطوط لوله به ازای نسبت های متفاوت فواصل کارگذاری**

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]




**شکل ۷- تغییرات سرعت نسبت به عمق آب اطراف خطوط لوله**

در جدول ۵ مقادیر طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله موازی، حاصل از شبیه سازی عددی به ازای نسبت‌های متفاوت فواصل کارگذاری به قطر لوله (L/D) آورده شده است.

در جدول ۶ موقعیت مرکز گردابه در فاصله بین دو خط لوله آورده شده است. از روی مقادیر جدول ۶ ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله بین لوله‌ها موقعیت مرکز گردابه از لوله اول دورتر و به لوله دوم نزدیکتر می‌گردد و این روند تا L/D=4 ادامه پیدا می‌کند برای L/D>4، با افزایش فاصله بین لوله‌ها موقعیت مرکز گردابه به لوله اول نزدیک و از لوله دوم دور می‌شود. جدول ۷ مقادیر طول نواحی جدایی مستقل از هم اطراف هر یک از خطوط لوله موازی را به ازای L/D=7 نشان می‌دهد.

از روی جدول ۷ مشخص می‌شود که طول نواحی جدایی اطراف خط لوله دوم نسبت به طول نواحی جدایی اطراف خط لوله اول کوچکتر می‌باشد.

همچنین در جدول ۸ مقایسه‌ای میان طول نواحی جدایی اطراف خط لوله منفرد و طول نواحی جدایی اطراف خط لوله اول در حالت لوله‌های موازی و برای L/D=7 آورده شده است.

از روی نتایج جدول ۸ مشخص می‌شود اختلاف ناچیزی میان طول نواحی جدایی برای خط لوله منفرد و خط لوله اول در حالت لوله‌های موازی به ازای L/D=7 وجود دارد. این بدان معنی است که در این حالت دو خط لوله به طور مستقل از هم عمل می‌کنند.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

**جدول ۵- طول نواحی جدایی اطراف خطوط لوله موازی به ازای نسبت های متفاوت فاصله کارگذاری به قطر لوله**

| طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست لوله دوم | طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست لوله دوم | طول ناحیه جدایی در بالادست لوله اول | $Re=UD/v$ | $L/D$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.63D | 5.7D | 0.92D | 12700 | 0 |
| 0.52D | 5.35D | 0.85D | 12700 | 0.5 |
| 0.52D | 5.1D | 0.85D | 12700 | 1 |
| 0.52D | 4.96D | 0.85D | 12700 | 1.5 |
| 0.52D | 4.64D | 0.85D | 12700 | 2 |
| 0.52D | 4.42D | 0.85D | 12700 | 3 |
| 0.52D | 4.26D | 0.85D | 12700 | 4 |
| 0.52D | 4.2D | 0.85D | 12700 | 5 |
| 0.52D | 4.1D | 0.85D | 12700 | 6 |

**جدول٦- موقعیت مرکزگردابه در فاصله بین دو خط لوله**

| موقعیت مرکز گردابه از مرکز خط لوله اول | $Re=UD/v$ | $L/D$ |
|---|---|---|
| $0.53L^*$ | 12700 | 0.5 |
| $0.53\ L^*$ | 12700 | 1 |
| $0.57\ L^*$ | 12700 | 1.5 |
| $0.64\ L^*$ | 12700 | 2 |
| $0.69\ L^*$ | 12700 | 3 |
| $0.72\ L^*$ | 12700 | 4 |
| $0.46\ L^*$ | 12700 | 5 |
| $0.4\ L^*$ | 12700 | 6 |
| $0.35\ L^*$ | 12700 | 7 |
| $0.3\ L^*$ | 12700 | 8 |
| $0.27\ L^*$ | 12700 | 9 |

$L^*$: فاصله مرکز به مرکز دو خط لوله

**جدول ۷- طول نواحی جدایی مستقل از هم اطراف هر یک از خطوط لوله موازی به ازای L/D=7**

| اطراف خط لوله دوم | | | اطراف خط لوله اول | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| طول جدایی ثانویه در پایین دست | طول جدایی اولیه در پایین دست | طول جدایی در بالادست | طول جدایی ثانویه در پایین دست | طول جدایی اولیه در پایین دست | طول جدایی در بالادست | $Re= 12700$ |
| 0.52D | 4.2D | 1D | 0.6D | 6.6D | 0.85D | $L/D=7$ |

### ۳-۶- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

جهت صحت سنجی نتایج مدل عددی، مقایسه ای میان کار تجربی و شبیه سازی عددی مطابق جدول ۹ انجام شده است.

از بررسی نتایج جدول ۹ ملاحظه می گردد که مدل عددی طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خط لوله را بسیار مطلوب برآورد می نماید. به طوری که مقدار بیشینه اختلاف در برآورد طول ناحیه جدایی اولیه کمتر از ۱۰٪ بوده و تنها در دو مورد برای طول ناحیه جدایی در بالادست لوله اول و همچنین طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست لوله دوم، این اختلاف به حدود ۱۶٪ می رسد. این امر ممکن است ناشی از خطای اندازه گیری آن در آزمایشگاه، به دلیل کوچک بودن طول آن باشد.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

**جدول ۸- مقایسه طول نواحی جدایی اطراف خط لوله منفرد و خط لو له اول در حالت لوله های موازی و برای L/D=7**

| | $L/D$ | $Re=UD/\nu$ | طول جدایی در بالادست | طول جدایی اولیه در پایین دست | طول جدایی ثانویه در پایین دست |
|---|---|---|---|---|---|
| اطراف خط لوله منفرد | _ | 12700 | 0.92D | 6.5D | 0.63D |
| اطراف خط لوله اول در حالت لوله های موازی | 7 | 12700 | 0.85D | 6.6D | 0.6D |

**جدول ۹- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در برآورد طول نواحی جدایی به ازای $L/D$ های متفاوت**

| $L/D$ | $Re=UD/\nu$ | طول جدایی در بالادست لوله اول | | طول جدایی اولیه در پایین دست لوله دوم | | طول جدایی ثانویه در پایین دست لوله دوم | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | آزمایشگاهی | عددی | آزمایشگاهی | عددی | آزمایشگاهی | عددی |
| 0 | 12700 | 1.1D | 0.92D | 5.8D | 5.7D | 0.75D | 0.63D |
| 0.5 | 12700 | 1D | 0.85D | 5.2D | 5.35D | 0.6D | 0.52D |
| 1 | 12700 | 1D | 0.85D | 4.9D | 5.1D | 0.6D | 0.52D |
| 1.5 | 12700 | 1D | 0.85D | 4.8D | 4.96D | 0.6D | 0.52D |
| 2 | 12700 | 1D | 0.85D | 4.4D | 4.64D | 0.6D | 0.52D |
| 3 | 12700 | 1D | 0.85D | 4.2D | 4.42D | 0.6D | 0.52D |
| 4 | 12700 | 1D | 0.85D | 4.1D | 4.26D | 0.6D | 0.52D |
| 5 | 12700 | 1D | 0.85D | 3.9D | 4.2D | 0.6D | 0.52D |
| 6 | 12700 | 1D | 0.85D | 3.7D | 4.1D | 0.6D | 0.52D |

## ۴-نتیجه گیری

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های گذشته نتایج به دست آمده می‌تواند به صورت زیر جمع بندی شود:

۱- به طور کلی سه ناحیه جدایی اطراف خطوط لوله (یک مورد در بالادست و دو مورد در پایین دست) مشاهده گردید.

۲- در حالت لوله‌های موازی علاوه بر سه ناحیه جدایی، گردابه هایی نیز در فاصله بین دو لوله تشکیل می شود.

۳- با افزایش فاصله بین دو خط لوله (L)، طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست لوله دوم کاهش می‌یابد و این کاهش تا L/D=6 ادامه پیدا می‌کند.

۴- برای L/D≥7 دو خط لوله به طور مستقل از هم عمل کرده و برای هر یک از خطوط لوله سه ناحیه جدایی مستقل از هم خواهیم داشت.

۵- با افزایش فاصله بین دو خط لوله (L)، طول گردابه میان آن ها بزرگتر شده و موقعیت مرکز گردابه با افزایش فاصله بین خطوط لوله، به لوله دوم نزدیک می شود و این روند تا L/D=4 ادامه پیدا می کند. برای L/D>4 موقعیت مرکز گردابه با افزایش فاصله بین خطوط لوله، به لوله اول نزدیک تر می گردد.

۶- برای حالات L/D≥7، نواحی جدایی در اطراف هر یک از خطوط لوله بطور مستقل از هم تشکیل شده و طول نواحی جدایی اطراف خط لوله دوم نسبت به طول نواحی جدایی اطراف خط لوله اول کوچکتر می‌باشد.

۷- مقادیر سرعت روی خط لوله دوم نسبت به مقادیر سرعت روی خط لوله اول کوچکتر می باشد. در ضمن مقادیر سرعت روی هر یک از خطوط لوله به ازای فواصل کارگذاری متفاوت تقریباً ثابت بوده و با افزایش فاصله بین خطوط تغییر چندانی در مقادیر سرعت مشاهده نمی شود.

۸- شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی "FLUENT" با استفاده از مدل آشفتگی دو معادله ای $k$-$\varepsilon$ قابلیت مناسبی را در برآورد طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله نشان می دهد.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]

## ۵- مراجع

1- Sumer, B.M., 2004, Physical & Mathematical Modeling of Scour, Proc., 2th ICSE, Singapore.

2- Sumer, B.M. and Fredsoe, J., 1999, Wave Scour around Structures, Advances in Coastal and ocean Engineering, Vol. 4, pp. 191-249.

3- Chiew, Y.M., 1991, Prediction of Maximum Scour at Submarine pipelines, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 452-466.

4- Bearman, P.W. and Zdravkovich, M.M., 1978, Flow around a Circular Cylinder near a Plane Boundary, Journal of Fluid Mechanics, 89(1), pp. 33-47.

5- Sumer, B.M. and Fredsoe, 1997, Hydrodynamics around Cylindrical Structures, World scientific, Vol. 12, pp. 1-121.

6- Brors, B., 1999, Numerical Modeling of Flow and Scour at Pipelines, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 511-525.

7- Hatipoglu, F. and Avci, I., 2003, Flow around a Partly Buried Cylinder in a Steady Current, J. Ocean Engineering, Vol. 30. pp. 239-249.

8- Liang, D. and Cheng, L. 2005, Numerical Modeling of Flow and Scour below a pipeline in Currents, part I. Flow Simulation, Journal of Coastal Engineering, Vol. 52, pp. 25-42.

9- Liang, D., and Cheng, L. and Li, F. 2005, Numerical Modeling of Flow and Scour below a pipeline in Currents, part II. Scour Simulation, Journal of Coastal Engineering, Vol. 52, pp. 43-62.

۱۰- زنگانه، م و یگانه بختیاری، ع. ۱۳۸۹ "مدلسازی عددی الگوی جریان اطراف لوله های فراساحلی تحت جریان یکطرفه"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۱۱- عمرانی، ش و حکیم زاده، ح. ۱۳۸۷ "بررسی عددی و تجربی پدیده جدایش جریان در اطراف خطوط لوله نیمه مدفون تحت جریا نهای دائمی"، نشریه مهندسی دریا، سال چهارم، شماره هشتم، پاییز و زمستان ۸۷، صفحات ۶۵ تا ۷۵.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-05-22 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.4.7 ]