بررسی تأثیر عمق دفن‌شدگی خطوط لوله فراساحلی در حالت تاندوم بر جدایش جریان با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

بهمن ارشد شب‌خانه [۱]، حبیب حکیم‌زاده [۲*]

[۱] کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند

[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

وجود خطوط لوله در محیط بستر دریا سبب تغییر الگوی جریان در مجاورت آن‌ها شده و نیز موجب به وجود آمدن گردابه‌هایی در قسمت های جلو و پشت لوله گردیده که همراه با افزایش شدت آشفتگی است. این تغییرات می‌توانند منجر به خستگی سازه و یا آبشستگی در اطراف آن گردند و نهایتاً پایداری سازه را تهدید نمایند. در این مقاله، به منظور بررسی کنش لوله روی جریان، تغییرات به وجود آمده در الگوی جریان اطراف خطوط لوله فراساحلی نیمه مدفون به صورت آزمایشگاهی و عددی در حالت جریان دائمی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جهت مدل‌سازی تجربی، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک انجام شده است. آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی و با استفاده از یک لوله PVC برای نسبت‌های متفاوت عمق دفن-شدگی به قطر لوله انجام گرفته است. جهت مشاهده الگوی جریان از ذرات پلی‌استایرن استفاده شده و نیز به منظور کمک به درک فیزیکی پدیده از کلیه مراحل انجام آزمایش‌ها به وسیله دوربین دیجیتال، فیلم‌برداری شده است. در بخش شبیه‌سازی عددی نیز از روش حجم محدود استفاده شده و میدان جریان با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT تحلیل شده است. ایجاد هندسه و شبکه‌بندی مدل نیز به وسیله پیش-پردازنده GAMBIT صورت گرفته است. سرانجام نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی این پژوهش و سایر پژوهشگران مقایسه شده‌اند که تطابق نسبتاً خوبی حاصل شده است. نتایج تجربی و عددی نشان دادند که با افزایش نسبت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله، مقادیر طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله در حالت منفرد و تاندوم کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق دفن شدگی، از مقدار سرعت‌های بیشینه مثبت در بالای خط لوله و نیز از سرعت‌های بیشینه منفی در محل تشکیل گردابه‌ها کاسته می‌شود که نتیجه امر کاهش تنش برشی بستر را در پی خواهد داشت. بنابر این می‌توان پیش‌بینی نمود که با افزایش عمق دفن‌شدگی مشکلات ناشی از فرسایش و آبشستگی کاهش خواهند یافت.

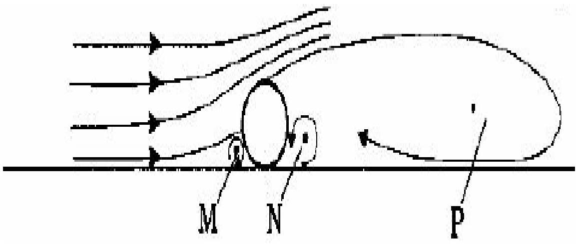
واژگان کلیدی: الگوی جریان، خطوط لوله فراساحلی، شرایط تاندوم، مدل آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی، روش حجم محدود.

۱- مقدمه

نیاز روزافزون بشر به سوخت‌های فسیلی باعث توسعه سریع صنایع فراساحلی گردیده است. از جمله مهم‌ترین سازه‌های فراساحلی که در صنعت نفت و گاز به منظور انتقال این فرآورده-ها به میزان زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، خطوط لوله بستر دریا می‌باشند. گسیختگی خطوط لوله پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی بسیار زیادی به دنبال خواهد داشت. به طور کلی هنگامی که سازه‌ای در محیط دریا قرار می‌گیرد، حضور سازه باعث تغییر الگوی جریان در فاصله نزدیکی از سازه شده که یک یا چند مورد از پدیده‌هایی نظیر انقباض جریان، شکل‌گیری گردابه‌های نعل اسبی در جلوی سازه، شکل‌گیری گردابه‌های چرخکی (با یا بدون گردابه‌فکنی) در پشت سازه و نیز تولید آشفتگی را به همراه خواهد داشت [۱]. این تغییرات می‌توانند منجر به خستگی سازه و یا آبشستگی در اطراف آن گردند و نهایتاً پایداری سازه را تهدید نمایند [۲]. در غالب موارد، جریان یک سویه دائمی در مقایسه با جریان رفت و برگشتی ناشی از موج می‌تواند تهدید جدی‌تری برای پایداری سازه باشد [۳]. همچنین به دلیل این که در مناطق فراساحلی عملاً موج بستر دریا را حس نمی‌کند و نیز به علت همراه شدن بسیاری از رودخانه‌های طویل کشور با شبکه‌های وسیع انتقال نفت خام، گاز طبیعی و آب و فاضلاب، لزوم مطالعه الگوی جریان اطراف خطوط لوله در حالت جریان دائمی محسوس بوده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. تحقیقاتی نیز در ارتباط با الگوی جریان اطراف خطوط لوله دریایی و یا استوانه‌های دایره‌ای انجام شده است. Bearman و Zdravkovich [۴] برای خط لوله واقع بر بستری که در معرض جریان قرار داشت، سه ناحیه جدایی یکی در بالادست لوله و دو تا در پایین‌دست آن مشاهده نمودند (شکل (۱)).

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۲/۱۱/۲۰ پذیرش ۹۳/۶/۳



P: ناحیه جدایی اصلی و یا اولیه پایین‌دست
N: ناحیه‌جدایی ثانویه پایین‌دست در خلاف جهت پیچک اصلی p
M: ناحیه جدایی بالادست

شکل ۱- طرح شماتیک نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خط لوله واقع بر بستر [۴]

Sumer و Fredsoe [۵] مرجع کاملی را در ارتباط با رژیم‌های جریان اطراف یک استوانه دایره‌ای تحت جریان دائمی به ازای اعداد رینولدز مختلف ارائه نمودند.

Brors [۶] جریان و آبشستگی را برای خطوط لوله به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داد. 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 پایین‌دست استوانه را برابر 8D برآورد نمود. همچنین برای $Re= 10\times10^4$ نیز به صورت تجربی طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست استوانه را به ترتیب برابر با 1.5D و 10D به دست آورد. همچنین وی در یک فرآیند شبیه‌سازی عددی در $Re= 1.5\times10^4$ طول ناحیه جدایی در بالادست استوانه را برابر با 0.77D و در پایین‌دست برابر با 7D پیش‌بینی نمود. همچنین Hatipoglu و Avci [۷]، به صورت عددی و تجربی الگوی جریان را برای خط لوله واقع بر بستر و نیز نیمه مدفون مورد بررسی قرار داده و نتایج آن را ارائه نمودند. Liang و Cheng [۸، ۹]، کارایی مدل‌های آشفتگی مختلف را برای شبیه‌سازی جریان و آبشستگی اطراف لوله‌ای که به اندازه ۰/۳۷ برابر قطر خود بالای بستر صلب قرار گرفته بود بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ برای کاربردهای مهندسی قابل اعتمادتر می‌باشد. عمرانی و حکیم‌زاده [۱۰]، الگوی جریان اطراف اطراف خط لوله منفرد نیمه‌مدفون را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. 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 پایین‌دست خط لوله را به ترتیب برابر با 7.1D و 0.7D برآورد نمودند. به مرور زمان ممکن است بخشی از خطوط لوله‌ای که بر بستر دریا قرار می‌گیرد، در اثر تغییر در نیم‌رخ بستر، در خاک مدفون شده و الگوی جریان اطراف آن‌ها دستخوش تغییر گردد، از این‌رو در این مقاله به بررسی تأثیر دفن‌شدگی خطوط لوله فراساحلی در حالت تاندوم بر جدایش جریان پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی

به طور کلی هدف از انجام آزمایشات در این پژوهش بر روی مدل فیزیکی، یافتن طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله در حالت تاندوم به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/D) مورد نظر بوده است. به همین منظور یک سری آزمایش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشگاه صنعتی سهند انجام یافته است.

۲-۱- مشخصات کانال آزمایشگاهی

در این تحقیق آزمایش‌ها در کانالی آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض۰/۳ متر و عمق ۰/۵ متر (شکل (۲)) و با استفاده از لوله PVC به قطر ۶/۳۵ سانتی‌متر (به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله) و در شرایط جریان دائمی انجام شده است. مهم‌ترین بخش کارهای آزمایشگاهی انجام دقیق آزمایش‌ها و ثبت مشاهدات و نتایج می‌باشد. به همین منظور یک مقیاس با دقتی در حد میلی‌متر در پشت دیواره جانبی کانال و در زیر خطوط لوله نصب گردیده است به طوری که محور X در امتداد محور طولی کانال باشد. دبی کانال از صفر تا ۳۰ لیتر بر ثانیه قابل تنظیم می‌باشد. دیواره‌های کانال از جنس پلکسی گلاس و کف آن پلاستیک فشرده می‌باشد. جریان آب توسط پمپی از مخزن به داخل کانال پمپاژ می‌گردد.

شکل ۲- کانال آزمایشگاهی

در سرعت‌های بالا، به دلیل ضربه‌های جریان خروجی از پمپ به قسمت ورودی کانال، سطح جریان در داخل کانال موج‌دار می‌شود که به منظور جلوگیری از این پدیده شبکه توری شکل در ورودی کانال تعبیه گردیده است؛ به گونه‌ای که

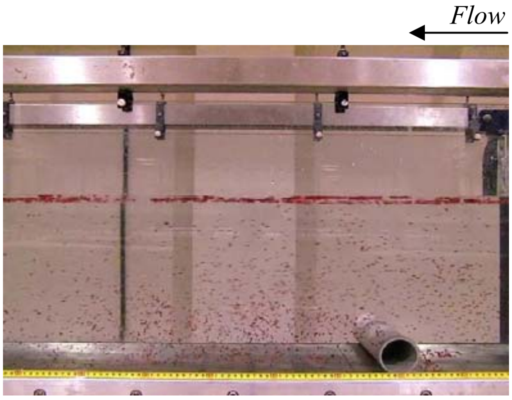
آشفتگی‌ها و نوسان‌های موجود در سطح جریان ورودی حذف و باعث یکنواخت شدن سرعت و شکل جریان می‌گردد. به منظور کمینه نمودن تأثیر مرزهای ورودی و خروجی کانال، لوله‌ها دقیقاً در وسط کانال و در فواصل ۵ متر نسبت به مرزهای ورودی و خروجی قرار داده شده‌اند.

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

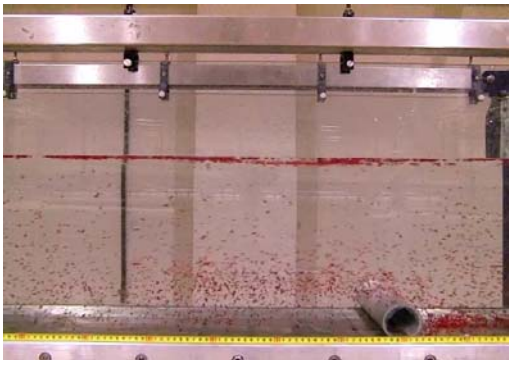
جهت مشاهده الگوی جریان از ذرات پلی‌استایرن با چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتیمتر مکعب، استفاده شده است. این ذرات به دلیل داشتن چگالی بسیار نزدیک به چگالی آب نتایج نسبتاً دقیقی را در اندازه‌گیری طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله به دست می‌دهند. همچنین علت استفاده از این ذرات به جای مواد رنگی آن است که مواد رنگی بلافاصله پس از ورود به آب در آن پخش شده، لذا جهت ردیابی و اندازه‌گیری طول نواحی جدایی مناسب نمی‌باشد.

۲-۳- روش انجام آزمایش‌ها و مشخصات مدل‌های مورد آزمایش

روش انجام آزمایش‌های این پژوهش در حالت عمومی به صورت زیر بوده است: ابتدا جهت ایجاد نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/Dهای مختلف) لوله‌ها در ارتفاع‌های متفاوت برش زده شده و بر روی کف هیدرولیکی صاف کانال و نیز به دیواره‌های جانبی کانال ثابت می‌گردند. پس از آن که لوله‌ها به دیواره‌های جانبی کانال ثابت شدند، پمپ روشن شده و مقدار دبی به ۱۸ لیتر بر ثانیه رسانده می‌شود. بلافاصله پس از آن به‌وسیله سرریز که به منظور تنظیم عمق آب در قسمت پشت مرز خروجی کانال تعبیه شده است، عمق آب به ۳۰ سانتی‌متر رسانده می‌شود. پس از گذشت زمان اندکی که نوسانات دبی به صفر رسید، عمق آب ثابت گردید و جریان دایمی در کانال تثبیت شده و آزمایش اصلی آغاز می‌شود. اکنون ذرات پلی-استایرن جهت پی بردن به فیزیک پدیده از فاصله مناسبی در بالادست جریان بر روی سطح آب رها می‌شوند. همچنین برای ثبت مشاهدات آزمایشگاهی از کلیه مراحل انجام آزمایش، به‌وسیله دوربین دیجیتال فیلم‌برداری صورت می‌گردد و طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی به قطر لوله اندازه‌گیری می‌گردد (شکل (۳)).



G/D=0



G/D=0.15

G/D=0.35

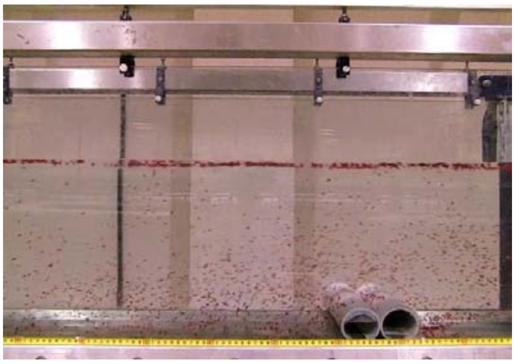
G/D=0.5

(الف)

شکل ۳- تصاویر آزمایش‌های انجام شده برای نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/D): الف) خط لوله منفرد، ب) خطوط لوله دوتایی در حالت تاندوم

Flow ←

G/D=0



G/D=0.15

G/D=0.35

G/D=0.5

(ب)

شکل ۳- (ادامه)

در این آزمایشات عدد رینولدز مطابق رابطه ذیل تعریف می‌گردد:

$$Re=U(D-G)/\nu \qquad (۱)$$

U: سرعت متوسط جریان آب در کانال

D: قطر لوله

G: عمق دفن‌شدگی

ν: ویسکوزیته سینماتیکی آب که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر $10^{-6}\ m^2/s$ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴- نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی

در آزمایشات انجام شده، ذرات پلی‌استایرن رها شده در مسیر پمپاژ جریان، در فواصل مشخصی از بالادست و پایین‌دست خط لوله دچار پیچش می‌شوند. این پیچش‌ها معرف نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله می‌باشند. به طور کلی سه ناحیه جدایی، دو مورد در پایین‌دست و یک مورد در بالادست خطوط لوله قابل مشاهده بودند. همچنین در حالت لوله‌های موازی علاوه بر سه ناحیه ذکر شده، در فاصله بین دو لوله نیز گردابه‌ای تشکیل می‌گردد.

در جدول (۱) مقادیر طول نواحی جدایی اندازه‌گیری شده در بالادست و پایین‌دست خط لوله منفرد به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/D) آمده است.

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

در جدول (۲) مقادیر طول نواحی جدایی اندازه‌گیری شده در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله دوتایی در حالت تاندوم به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/D) آمده است.

از روی نتایج جداول (۱) و (۲) مشاهده می‌شود با افزایش نسبت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/D)، طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله کاهش می‌یابد.

جدول ۱- طول نواحی جدایی اطراف خط لوله منفرد به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی

G/D	*Re*	طول ناحیه جدایی در بالادست	طول ناحیه جدایی اولیه در پایین‌دست	طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین‌دست
۰	۱۲۷۰۰	۱/۱ D	۷ D	۰/۷۵ D
۰/۱۵	۱۰۷۹۵	۰/۹ D	۵/۸ D	۰/۶ D
۰/۳۵	۸۲۵۵	۰/۷ D	۴/۶ D	_
۰/۵	۶۳۵۰	_	۲/۹۵ D	_

جدول ۲- طول نواحی جدایی اطراف خطوط لوله دوتایی در حالت تاندوم به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی

G/D	*Re*	طول ناحیه جدایی در بالادست	طول ناحیه جدایی اولیه در پایین‌دست	طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین‌دست
۰	۱۲۷۰۰	۱/۱ D	۵/۸ D	۰/۷۵ D
۰/۱۵	۱۰۷۹۵	۰/۹ D	۴/۷ D	۰/۶ D
۰/۳۵	۸۲۵۵	۰/۷ D	۳/۵ D	_
۰/۵	۶۳۵۰	_	۲/۵ D	_

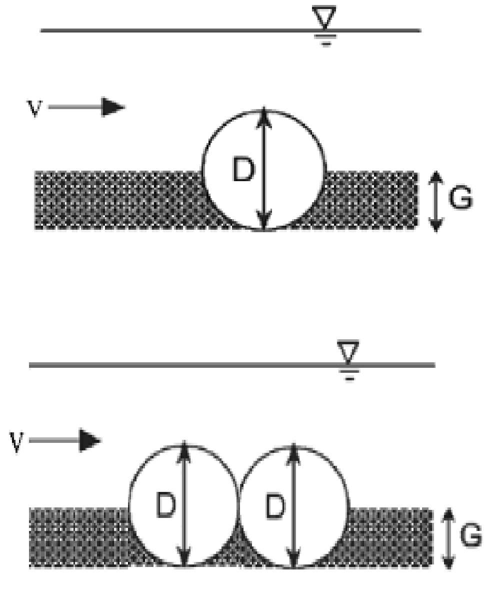
همچنین با افزایش عمق دفن‌شدگی، نرخ کاهش طول جدایی در ناحیه پایین‌دست قابل ملاحظه بوده، به گونه‌ای که با افزایش عمق دفن‌شدگی تا نصف قطر لوله (G/D=0.5)، طول ناحیه جدایی در پایین‌دست به کمتر از نصف مقدار اولیه کاهش می‌یابد.

از مقایسه نتایج جداول (۱) و (۲) مشاهده می‌شود که طول ناحیه جدایی در بالادست و همچنین طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین‌دست هم برای لوله منفرد و هم برای لوله‌های دوتایی در حالت تاندوم برابر بوده، ولی طول ناحیه جدایی اولیه در ناحیه پایین‌دست در حالت لوله دوتایی نسبت به حالت لوله منفرد کوچک‌تر است. همچنین در حالت لوله دوتایی علاوه بر سه ناحیه جدایی ذکر شده در فاصله بین دو لوله نیز گردابه‌ای تشکیل می‌شود.

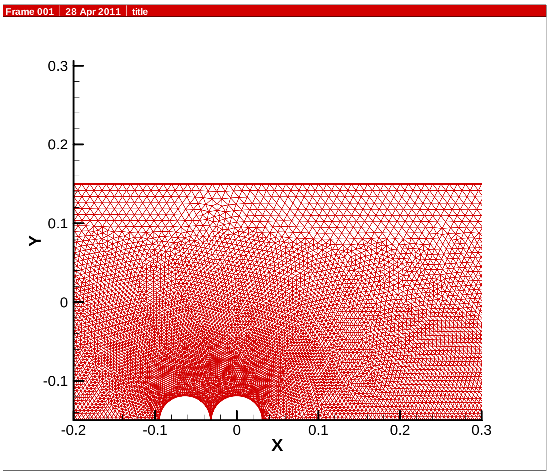
۳- شبیه‌سازی عددی

جهت شبیه‌سازی عددی، قسمتی از طول کانال آزمایشگاهی را به عنوان ناحیه محاسباتی در نظر می‌گیرند. با فرض این 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. همچنین عمق آب برابر با ۳۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۶/۳۵ سانتی‌متر و سرعت متوسط جریان در کانال برابر با ۲۰ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. شکل (۴) بخشی از محیط محاسباتی مورد نظر را نمایش می‌دهد که در آن D قطر لوله، G عمق دفن‌شدگی و V سرعت جریان دایمی در کانال آزمایشگاهی است. شبکه‌بندی اولیه مدل به وسیله پیش پردازنده GAMBIT صورت گرفته و پس از ورود به نرم‌افزار FLUENT تکمیل گردیده است. شبکه‌های به کار رفته در مدل از نوع مثلثی بی‌ساختار بوده است. در نواحی‌ای که نیاز به اطلاعات بیشتری از الگوی جریان بوده، شبکه‌ها ریزتر انتخاب شده‌اند. شکل (۵) جزئیات شبکه‌بندی خطوط لوله نیمه مدفون را نشان می‌دهد.



شکل ۴- طرح شماتیک محیط محاسباتی



شکل ۵- جزئیات شبکه‌بندی خطوط لوله نیمه مدفون

۳-۱- شرایط مرزی مدل

شرایط مرزی، تعیین کننده ویژگی‌های جریان در مرزها با توجه به فیزیک مسأله می‌باشند. شرایط مرزی اجزای بسیار مهم و تعیین کننده‌ای در نرم‌افزار شبیه‌ساز FLUENT می‌باشند.

۳-۱-۱- شرط مرزی سرعت ورودی

از این شرط در مرز ورودی کانال استفاده می‌شود. در این قسمت باید اطلاعات مربوط به سرعت جریان ورودی در کانال و پارامترهای آشفتگی اعمال گردند. مشخصه‌های آشفتگی با استفاده از روش شدت و مقیاس طول تعریف شده‌اند.

شدت آشفتگی به صورت نسبتی از سرعت نوسانی به سرعت جریان متوسط تعریف می‌شود. در صورتی که جریان توسعه یافته باشد، می‌توان 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 خطوط لوله به ازای عمق-های مختلف دفن‌شدگی و بر پایه عدد رینولدز مربوطه در محدوده ۴/۹٪ تا ۵/۳۵٪ می‌باشند.

مقیاس طول آشفتگی یک کمیت فیزیکی است که به اندازه بزرگی گردابه‌هایی که نقل و انتقال انرژی را در جریان آشفته بر عهده دارند، مربوط می‌شود. در جریان کاملاً توسعه یافته در یک کانال، طول آشفتگی l با رابطه‌ای به ابعاد کانال مربوط می‌شود و از آن‌جائی که گردابه‌ها و چرخک‌های آشفتگی نمی‌توانند بزرگ-تر از ابعاد کانال باشند، رابطه فیزیکی بین l و ابعاد فیزیکی کانال وجود دارد:

$$l=0.07L \qquad (۳)$$

که L بعد مناسبی از کانال می باشد.

در کانال‌های با مقاطع غیر دایروی می‌توان قطر هیدرولیکی را برای این پارامتر در نظر گرفت. مقدار مقیاس طول آشفتگی برای مدل‌های مذکور با توجه به ابعاد کانال برابر ۰/۰۲۱ می‌باشد.

۳-۱-۲- شرط مرزی فشار خروجی

این شرط در مرز خروجی کانال به کار رفته که نیاز به بیان فشار و پارامترهای آشفتگی دارد که بر اساس روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند.

۳-۱-۳- شرط مرزی دیوار

شرط مرزی دیوار برای محدود کردن نواحی سیال با مرز جامد به کار می‌رود. در این تحقیق، دیواره‌های کف کانال و لوله به عنوان دیوار تعریف شده و شرط مرزی عدم لغزش نیز برای آن‌ها لحاظ گشته است. مقادیر زبری نیز در این قسمت تعریف می‌گردند.

۳-۱-۴- شرط مرزی متقارن

از این شرط هنگامی استفاده می‌شود که هندسه فیزیکی و الگوی مورد نظر از تحلیل در مورد جریان سیال دارای تقارن آینه‌ای باشد. در این تحقیق، سطح آزاد آب به عنوان مرز متقارن تعریف شده است. این بدان معنی است که از نوسانات آن صرف نظر گردیده است.

۳-۲- انتخاب مدل آشفتگی

مطالعات بسیار زیادی توسط پژوهشگران پیشین روی کارایی مدل‌های مختلف آشفتگی و حساسیت شبکه به آن‌ها صورت گرفته است. بر اساس این مطالعات، از بین مدل‌های آشفتگی k-ω، k-ε و SGS مدل k-ε به‌ویژه در مورد بررسی حاضر نتایج بسیار خوبی را به دست داده است [۸، ۹]. از این‌رو مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق، مدل دو معادله‌ای RNG -k-ε بوده

است. این مدل قادر به توصیف نسبتاً دقیق تنش‌های رینولدز می‌باشد.

۳-۳- روند تحلیل

در این پژوهش از روش حل تفکیکی و خطی‌سازی ضمنی جهت حل معادلات استفاده شده است و روش‌های به کار رفته جهت گسسته‌سازی به شرح جدول (۳) می‌باشند.

فاکتورهای زیر تخفیف برابر اعداد پیش‌فرض نرم‌افزار انتخاب شده‌اند که مطابق با مقادیر جدول (۴) است.

جدول ۳- روش‌های گسسته‌سازی انتخاب شده

معادله	روش گسسته‌سازی
فشار	نیروی کالبدی وزین
هم‌بندی فشار- سرعت	ساده
مومنتم	جهت‌مند مرتبه دوم
انرژی جنبشی آشفتگی	جهت‌مند مرتبه دوم
نرخ هدر رفت آشفتگی	جهت‌مند مرتبه دوم

جدول ۴- فاکتورهای زیر تخفیف انتخاب شده

	ضریب زیر تخفیف
فشار	۰/۳
دانسیته	۱
مومنتم	۰/۷
انرژی جنبشی آشفتگی	۰/۸
نرخ هدر رفت آشفتگی	۰/۸

۳-۴- صحت‌سنجی مدل عددی

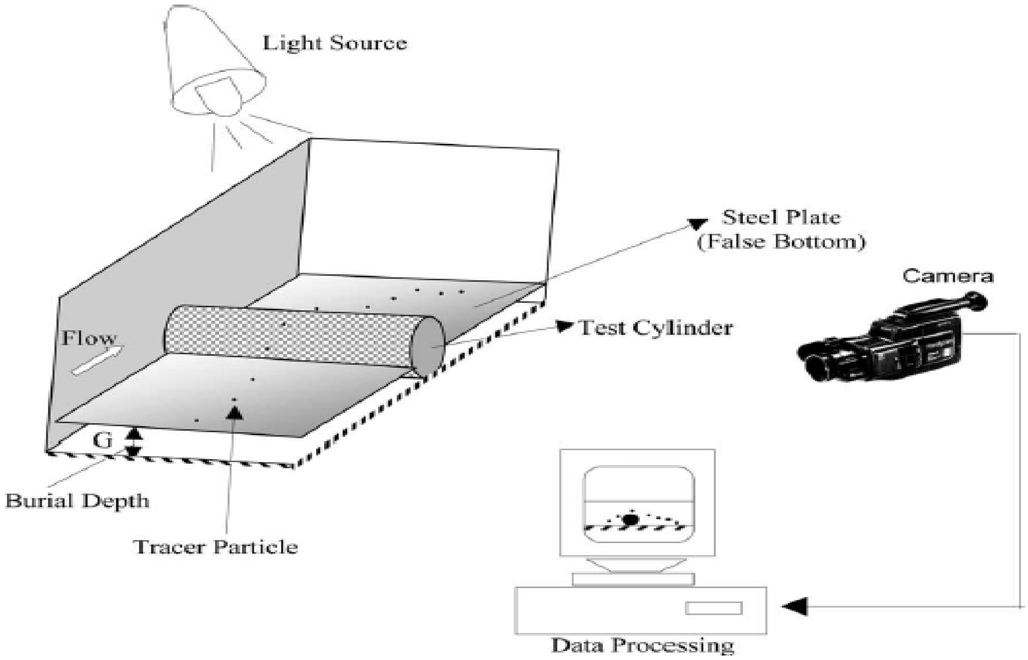
Hatipoglu و Avci [۷]، به صورت تجربی و عددی الگوی جریان را برای خط لوله واقع بر بستر و همچنین نیمه‌مدفون مورد بررسی قرار داده و نتایج آن را ارائه نمودند. نتایج آن‌ها جهت صحت‌سنجی نتایج عددی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۴-۱- مدل تجربی Hatipoglu و Avci [۷]

آزمایش‌ها در کانالی به طول ۲۷ متر، ارتفاع ۸۵ سانتی‌متر و عرض ۸۹ سانتی‌متر انجام گرفت. لوله مورد استفاده از جنس P.V.C می‌باشد. قطر لوله ۸/۹ سانتی‌متر و زبری معادل آن ۰/۵ میلی‌متر بوده و عمق آب ۴۰ سانتی‌متر و سرعت جریان ۲۳ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین جهت ایجاد عمق دفن‌شدگی مورد نظر در دو طرف لوله از صفحه فلزی تخت استفاده شده است. جهت مشاهده الگوی جریان از ذرات پلی‌استایرن 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 پایین‌دست لوله اندازه‌گیری شده است. در شکل (۶) نحوه چیدمان آزمایشگاهی آورده شده است [۷].

۳-۴-۲- صحت‌سنجی نتایج

در جدول (۵) نتایج عددی این پژوهش با نتایج تجربی و عددی Hatipoglu و Avci [۷] مقایسه شده است. از روی نتایج جدول (۵) ملاحظه می‌شود نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده نسبت به نتایج عددی Hatipoglu و Avci [۷]، تطابق مناسب‌تری با نتایج تجربی آن‌ها دارد.



شکل ۶- چیدمان آزمایشگاهی [۷]

جدول ۵- مقایسه نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج تجربی Hatipoglu و Avci [۷]

مقایسه نتایج	G/D	Re	طول ناحیه‌جدایی ثانویه در بالادست			طول ناحیه‌جدایی اولیه در پایین‌دست			طول ناحیه‌جدایی ثانویه در پایین‌دست		
			آزمایشگاهی	عددی		آزمایشگاهی	عددی		آزمایشگاهی	عددی	
			Hatipoglu و Avci [۷]	Hatipoglu و Avci [۷]	پژوهش حاضر	Hatipoglu و Avci [۷]	Hatipoglu و Avci [۷]	پژوهش حاضر	Hatipoglu و Avci [۷]	Hatipoglu و Avci [۷]	پژوهش حاضر
	۰	۲۶۷۰۰	۱ D	۱/۳ D	۰/۹۵ D	۶/۷ D	۸/۹ D	۵/۹ D	-	۱/۱ D	۰/۶ D
	۰/۵	۱۳۳۵۰	-	۰/۶ D	-	۲/۸ D	۲/۱ D	۲/۱ D	-	-	-

۳-۵- نتایج شبیه‌سازی عددی

شکل (۷) نتایج شبیه‌سازی به دست آمده از مدل عددی را برای خطوط جریان اطراف خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصله می‌توان مشاهده نمود که با افزایش عمق دفن‌شدگی طول ناحیه جدایی در ناحیه پایین‌دست کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق دفن‌شدگی، چرخاب‌های ثانوی در قسمت‌های بالادست و پایین‌دست خطوط لوله به‌تدریج از بین رفته‌اند، به گونه‌ای که برای دفن‌شدگی برابر صفر، دو چرخاب ثانوی در قسمت‌های بالادست و پایین‌دست خطوط لوله کاملاً مشهود بوده ولی در حالت دفن‌شدگی پنجاه درصد، اندازه آن‌ها به حداقل مقدار خود رسیده و تقریباً از بین می‌روند.

همچنین شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی به دست آمده از مدل عددی را برای نیم‌رخ سرعت جریان اطراف خطوط لوله در حالت منفرد و تاندوم نشان می‌دهد. با مراجعه به نتایج حاصله می‌توان دریافت که با افزایش عمق دفن‌شدگی، میدان سرعت جریان در اطراف لوله‌ها به طور محسوسی کاهش می‌یابد.

در شکل (۹) مقایسه‌ای میان نیم‌رخ‌های سرعت جریان در پایین‌دست خطوط لوله و در مرکز طول جدایش اصلی، به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله نمایش داده شده است.

از روی شکل (۹) نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش عمق دفن‌شدگی، سرعت‌های بیشینه کاهش می‌یابد. در نتیجه تنش برشی نیز کاهش می‌یابد، این بدان معنی است که با افزایش عمق دفن‌شدگی، مشکلات ناشی از فرسایش و آبشستگی کاهش می‌یابد.

در جداول (۶) و (۷)، مقادیر طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن-

شدگی به قطر لوله (*G/D*)، حاصل از شبیه‌سازی عددی به ترتیب برای خط لوله منفرد و خطوط لوله دوتایی در حالت تاندوم آورده شده است.

در جدول (۸)، جهت ارزیابی نتایج مدل عددی، مقایسه‌ای میان کار تجربی و شبیه‌سازی عددی صورت گرفته است.

۳-۶- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

از بررسی نتایج جدول (۸) ملاحظه می‌گردد که مدل عددی، طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خط لوله را بسیار مطلوب برآورد می‌نماید. به طوری که مقدار بیشینه اختلاف در برآورد طول نواحی جدایی کمتر از ۱۷٪ بوده و تنها در دو مورد برای خط لوله منفرد به ازای نسبت دفن‌شدگی برابر ۰/۳۵ و ۰/۵ این اختلاف به حدود ۲۵٪ می‌رسد. این امر ممکن است ناشی از خطای اندازه‌گیری این طول در آزمایشگاه باشد.

جدول ۶- طول نواحی جدایی اطراف خط لوله منفرد به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی

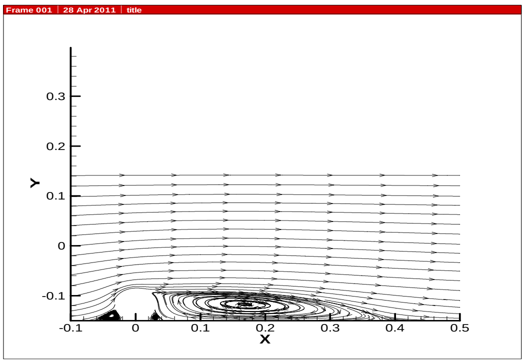
G/D	*Re*	طول ناحیه جدایی در بالادست	طول ناحیه جدایی اولیه در پایین‌دست	طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین‌دست
۰	۱۲۷۰۰	۰/۹۲ D	۶/۵ D	۰/۶۳ D
۰/۱۵	۱۰۷۹۵	۰/۷۵ D	۴/۹ D	۰/۵۴ D
۰/۳۵	۸۲۵۵	۰/۶۵ D	۳/۵ D	_
۰/۵	۶۳۵۰	_	۲/۲ D	_

جدول ۷- طول نواحی جدایی اطراف خطوط لوله دوتایی در حالت تاندوم به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی

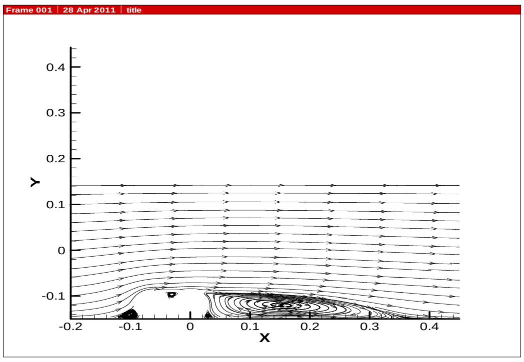
G/D	*Re*	طول ناحیه جدایی در بالادست	طول ناحیه جدایی اولیه در پایین‌دست	طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین‌دست
۰	۱۲۷۰۰	۰/۹۲ D	۵/۷ D	۰/۶۳ D
۰/۱۵	۱۰۷۹۵	۰/۷۵ D	۴/۴ D	۰/۵۴ D
۰/۳۵	۸۲۵۵	۰/۶۵ D	۳/۱ D	_
۰/۵	۶۳۵۰	_	۲/۱D	_

جدول ۸- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در برآورد طول نواحی جدایی به ازای *G/D*های متفاوت

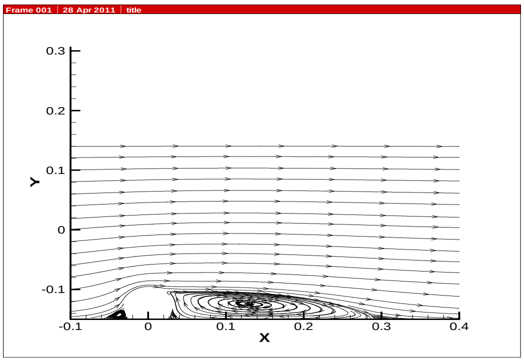
مقایسه‌ها	*G/D*	*Re*	طول ناحیه جدایی ثانویه در بالادست		طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست		طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست	
			آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی	عددی
بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برای خط لوله منفرد	۰	۱۲۷۰۰	۱/۱ D	۰/۹۲ D	۷ D	۶/۵ D	۰/۷۵ D	۰/۶۳D
	۰/۱۵	۱۰۷۹۵	۰/۹D	۰/۷۵ D	۵/۸ D	۴/۹ D	۰/۶ D	۰/۵۴D
	۰/۳۵	۸۲۵۵	۰/۷ D	۰/۶۵D	۴/۶ D	۳/۵ D	-	-
	۰/۵	۶۳۵۰	-	-	۲/۹۵ D	۲/۲D	-	-
بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برای دو خط لوله	۰	۱۲۷۰۰	۱/۱ D	۰/۹۲ D	۵/۸ D	۵/۷D	۰/۷۵D	۰/۶۳D
	۰/۱۵	۱۰۷۹۵	۰/۹ D	۰/۷۵D	۴/۷D	۴/۴D	۰/۶D	۰/۵۴D
	۰/۳۵	۸۲۵۵	۰/۷D	۰/۶۵D	۳/۵ D	۳/۱D	-	-
	۰/۵	۶۳۵۰	-	-	۲/۵ D	۲/۱ D	-	-



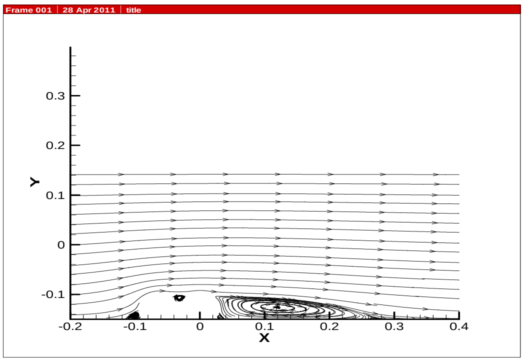
G/D=0



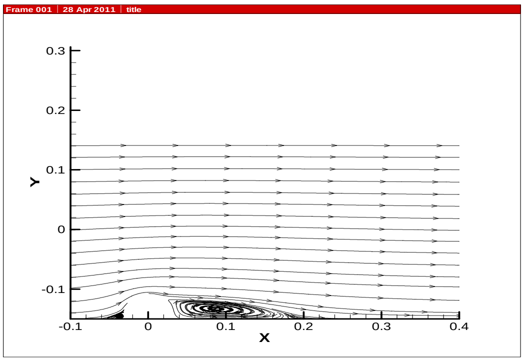
G/D=0



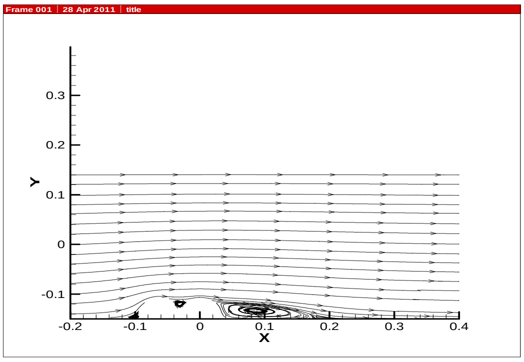
G/D=0.15



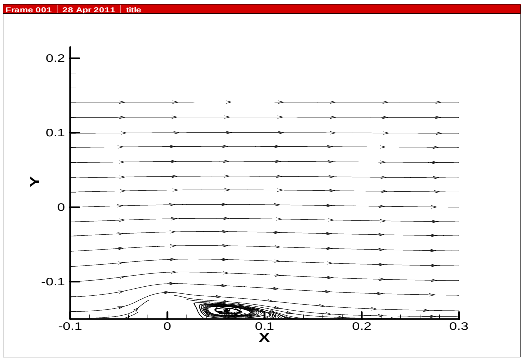
G/D=0.15



G/D=0.35

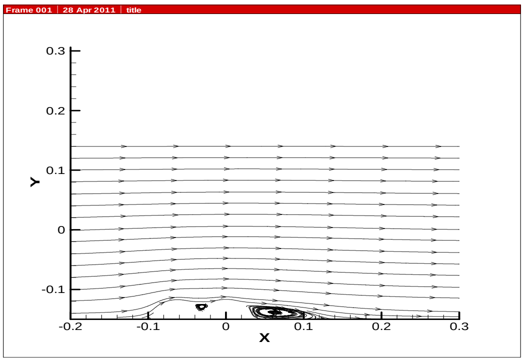


G/D=0.35



G/D=0.5

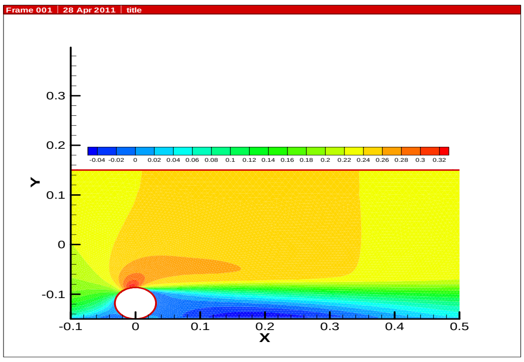
(الف)



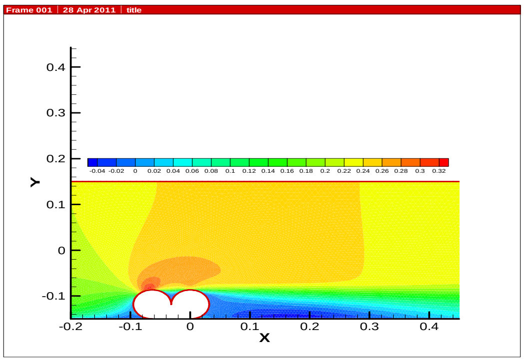
G/D=0.5

(ب)

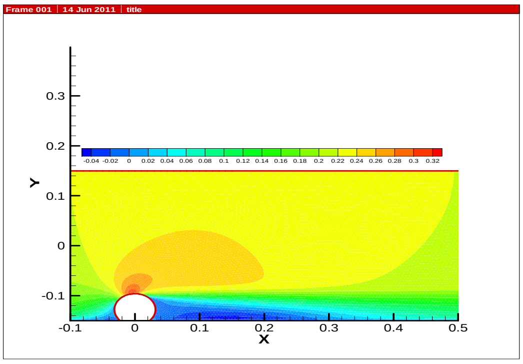
شکل ۷- طرح شماتیک نواحی جدایی اطراف خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی: الف) خطوط جریان اطراف خط لوله منفرد، ب) خطوط جریان اطراف خطوط لوله دوتایی



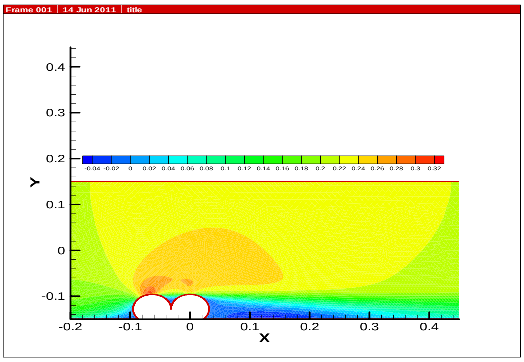
G/D=0



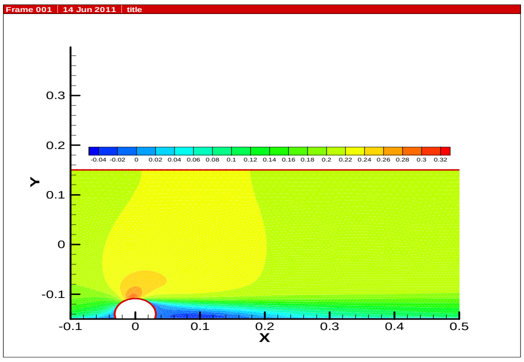
G/D=0



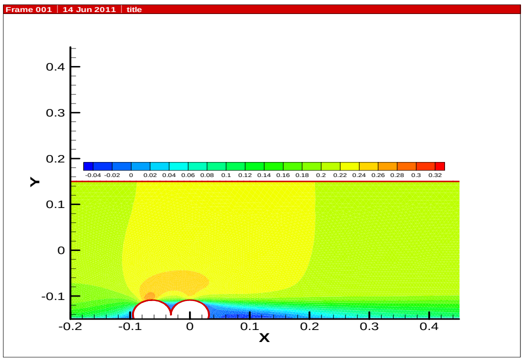
D=0.15



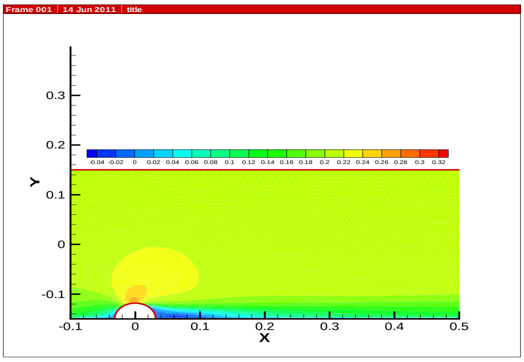
G/D=0.15



G/D=0.35

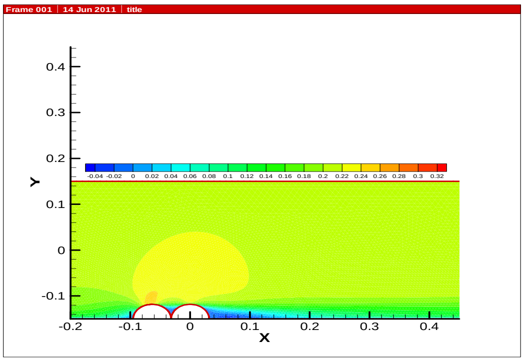


G/D=0.35



G/D=0.5

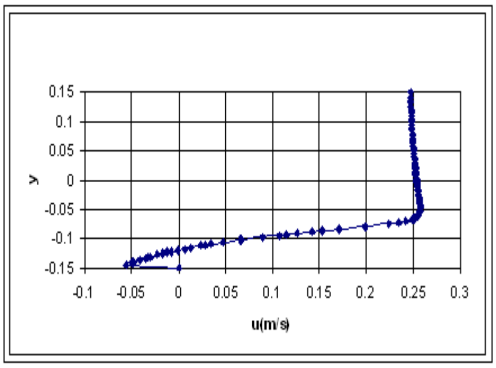
(الف)



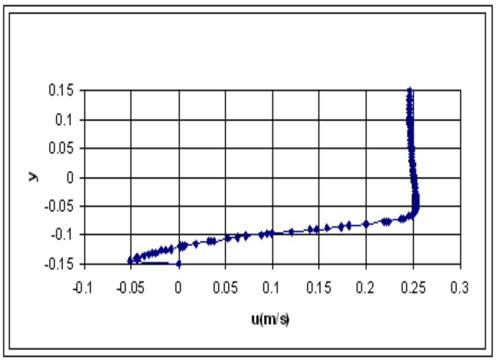
G/D=0.5

(ب)

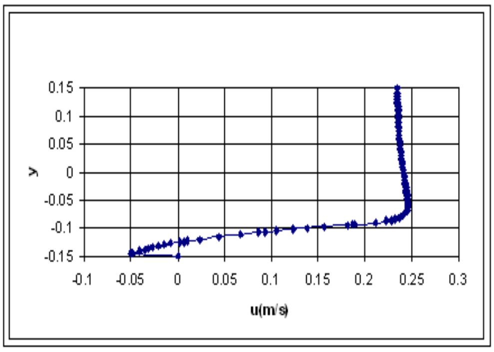
شکل ۸- پروفیل سرعت جریان اطراف خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی: الف) خطوط هم‌تراز سرعت اطراف خط لوله منفرد، ب) خطوط هم‌تراز سرعت اطراف خطوط لوله دوتایی



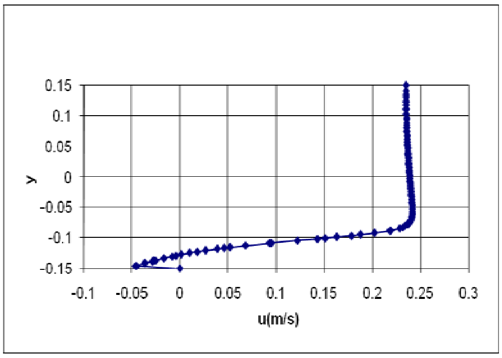
G/D=0



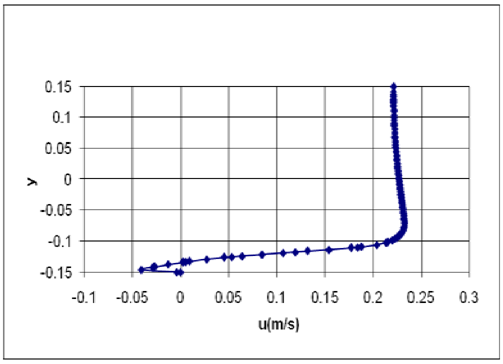
G/D=0



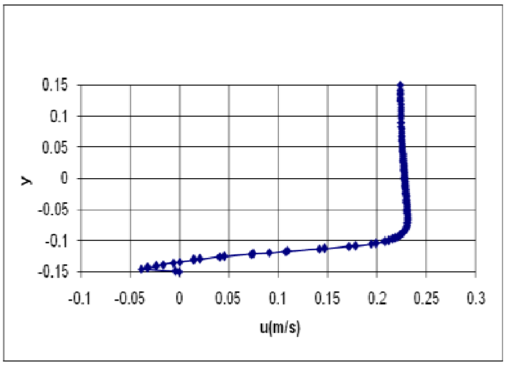
G/D=0.15



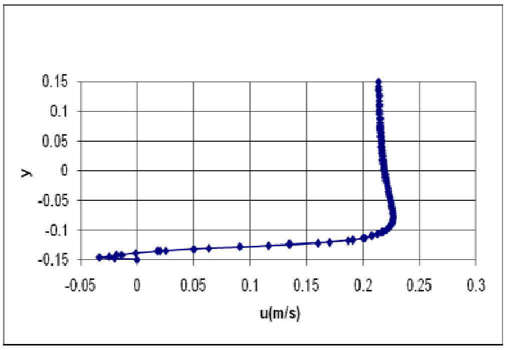
G/D=0.15



G/D=0.35

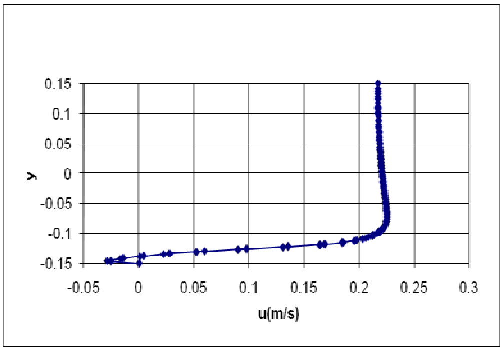


G/D=0.35



G/D=0.5

(الف)



G/D=0.5

(ب)

شکل ۹- تغییرات سرعت نسبت به عمق آب اطراف خطوط لوله: الف) برای خط لوله در حالت منفرد، ب) برای خطوط لوله دوتایی در حالت تاندوم

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های گذشته، نتایج به دست آمده می‌توانند به صورت زیر جمع‌بندی شوند:

۱- به طور کلی، سه ناحیه جدایی اطراف خط لوله منفرد (یک مورد در بالادست و دو مورد در پایین‌دست) مشاهده گردید.

۲- با افزایش نسبت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/D)، مقادیر طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش عمق دفن‌شدگی، از مقدار سرعت‌های بیشینه مثبت در بالای لوله و نیز سرعت‌های بیشینه منفی در محل تشکیل گردابه‌ها کاسته می‌شود. در نتیجه می‌توان پیش‌بینی نمود که تنش برشی نیز کاهش خواهد یافت این بدان معنی است که با افزایش عمق دفن‌شدگی مشکلات ناشی از فرسایش و آبشستگی کاهش خواهد یافت.

۴- با افزایش نسبت (G/D)، نرخ کاهش طول جدایی اولیه در ناحیه پایین‌دست قابل ملاحظه بوده به گونه‌ای که با افزایش عمق دفن‌شدگی تا نصف قطر لوله، طول ناحیه جدایی در پایین‌دست به کمتر از نصف مقدار اولیه کاهش می‌یابد.

۵- برای هر دو حالت لوله منفرد و لوله‌های دوتایی در حالت تاندوم، به ازای نسبت‌های متفاوت دفن‌شدگی، طول ناحیه جدایی در بالادست و نیز طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین‌دست برابر بوده، ولی طول ناحیه جدایی اصلی در پایین‌دست در حالت لوله‌های دوتایی نسبت به حالت لوله منفرد کوچک‌تر می‌باشد.

۶- در حالت لوله‌های دو تایی علاوه بر سه ناحیه جدایی، در فاصله بین دو لوله نیز گردابه‌ای تشکیل می‌شود.

۷- شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT با استفاده از مدل آشفتگی دو معادله‌ای k-ε قابلیت مناسبی را در برآورد طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله از خود نشان می‌دهد.

۵- مراجع

[1] Sumer, B. M., "Physical & Mathematical Modeling of Scour", 2nd International Conference on Scour and Erosion, Singapore, 2004.

[2] Sumer, B. M., Fredsoe, J., "Wave Scour around Structures", Advances in Coastal & Ocean Engineering, 1999, 4, 191-249.

[3] Chiew, Y. M., "Prediction of Maximum Scour at Submarine pipelines", ASCE Journal of Hydraulic Engineering; 1991, 117 (4), 452-466.

[4] Bearman, P., Zdravkovich, M., "Flow around a Circular Cylinder near a Plane Boundary", Journal of Fluid Mechanics, 1978, 89, 33-48.

[5] Sumer, B. M., Fredsoe, "Hydrodynamics around Cylindrical Structures", World Scientific, 1997, pp 1-121.

[6] Brors, B., "Numerical Modeling of Flow and Scour at Pipelines", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125 (5), 511-525.

[7] Hatipoglu, F., Avci, I., "Flow around a Partly Buried Cylinder in Steady Current", Ocean Engineering, 2003, 30, 239-249.

[8] Liang, D., Cheng, L., "Numerical Modeling of Flow and Scour below a Pipeline in Currents, part I, Flow Simulation", Coastal Engineering, 2005, 52, 25-42.

[9] Liang, D., Cheng, L., Li, F., "Numerical Modeling of Flow and Scour below a Pipeline in Currents, Part II, Scour Simulation", Coastal Engineering, 2005, 52, 43-62.

[۱۰] عمرانی، ش.، حکیم‌زاده، ح.، "بررسی عددی و تجربی جدایش جریان اطراف خط لوله منفرد نیمه‌مدفون تحت جریان دایمی"، نشریه مهندسی دریا، ۱۳۸۷، ۴ (۸)، ۶۵-۷۵.

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 45, Issue 1, Spring 2015

EXTENDED ABSTRACT

Investigation into Effect of Burial Depth of Offshore Pipelines in Tandem Position on Flow Separation Using the Experimental and Numerical Models

Bahman Arshad Shabkhaneh, Habib Hakimzadeh*

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology

Received: 09 February 2013; **Accepted:** 25 August 2014

Keywords:
Flow pattern, Offshore pipelines, Experimental model, Numerical simulation, Finite volume method

1. Introduction

The ever-increasing need to fossilized fuel has caused a rapid development in offshore industries. One of the most important offshore structures that have extensively been used for transporting oil and gas products is pipeline. On the other hand, fatigue of these structures mainly causes huge evil economic and environmental consequences. The pipelines lying at sea bed normally cause variations in flow pattern around them and also create eddies in the front- and backward of pipeline which is along with an increasing in turbulence intensity [1]. These variations can lead to the fatigue in structure or scour around it and eventually threaten structural stability [2]. In this paper, in order to consider the action of pipe on flow, the caused variations on flow pattern around the semi-buried offshore pipelines due to steady current have experimentally and numerically been investigated.

2. Methodology

2.1. Experimental study

Generally, the main aim of doing the laboratory tests was to find out the separation lengths at the upstream and downstream of the pipelines in tandem positions for different burial depth-diameter ratios (i.e., *G/D*). The experiments have been conducted in the Hydraulic Research Laboratory. For the experimental section, a number of tests have been carried out in a flume with 10 meters length, 0.3 meters width and 0.5 meters depth using P.V.C pipes with 6.35 centimeters in diameter at steady state flow condition and for different burial depth-diameter ratios (i.e., *G/D*) and for the single and double pipelines. To visualize the flow patterns, the polystyrene particles with 1.05 gr/cm^3 in density have been used (Fig. 1). In order to help to physical understanding of the phenomenon, the whole processes of tests have been recorded using a digital camera.

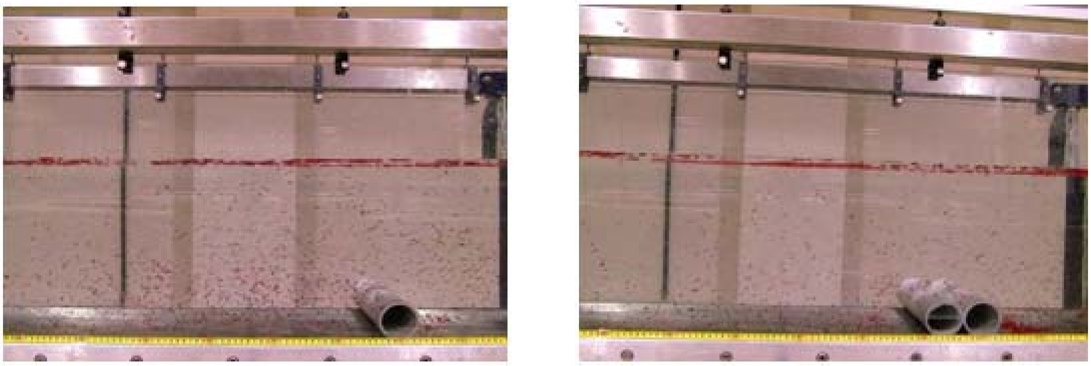


Fig. 1. Images of experimental setups for a single pipeline and double pipelines

* Corresponding Author
E-mail addresses: shabkhane@yahoo.com (Bahman Arshad Shabkhaneh), hakimzadeh@sut.ac.ir (Habib Hakimzadeh).

2.2. Numerical modeling

For the numerical modeling, the flow field has been analyzed using a computational fluid dynamics software, called FLUENT. For this software, the governing equations have been discretized using the finite volume method. The algebraic equations have then been solved using simple pressure-velocity coupling method. For the turbulence model, the two-equations k-ε RNG model has been deployed to calculate the Reynolds stresses. Geometry and mesh generation processes have also been done using a preprocessor software, called GAMBIT. The used discritized methods and under relaxation coefficients are shown in Tables 1 and 2, respectively.

Table 1. The used discritized methods

Equation	Discretization Method
Pressure	Body Force Weighted
Velocity Coupling - Pressure	Simple
Momentum	Second Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Dissipation Rate Turbulence	Second Order Upwind

Table 2. The used under relaxation coefficients

	Under-Relaxation Factor
Pressure	0.3
Density	1
Momentum	0.7
Turbulence Kinetic Energy	0.8
Turbulence Dissipation Rate	0.8

3. Results and discussion

The numerical model results were first verified against the experimental and numerical model results of the other researches and it was found that the simulation model results of the current study were in good agreements with the experimental data of the other researchers. Then, the results of numerical models were compared with the test data of the current study and some relatively good agreements were achieved (Table 3). In this regard, it was found that the maximum discrepancy between the experimental and numerical model results for the reattachment length was generally less than 17% and only in two cases for single pipeline it increased up to 25%.

Table 3. Comparison of the experimental and numerical results of reattachment lengths for various *G/D*

Comparison	*G/D*	*Re*	Secondary reattachment length at upstream		Preliminary reattachment length at downstream		Secondary reattachment length at downstream	
			Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.
Between Exp. & Num. results for single pipeline	0	12700	1.1 D	0.92 D	7 D	6.5 D	0.75 D	0.63 D
	0.15	10795	0.9 D	0.75 D	5.8 D	4.9 D	0.6 D	0.54 D
	0.35	8255	0.7 D	0.65 D	4.6 D	3.5 D	-	-
	0.5	6350	-	-	2.95 D	2.2 D	-	-
Between Exp. & Num. results for two pipelines	0	12700	1.1 D	0.92 D	5.8 D	5.7 D	0.75 D	0.63 D
	0.15	10795	0.9 D	0.75 D	4.7 D	4.4 D	0.6 D	0.54 D
	0.35	8255	0.7 D	0.65 D	3.5 D	3.1 D	-	-
	0.5	6350	-	-	2.5 D	2.1 D	-	-

4. Conclusions

The main results of this research study may be summarized as:

1. Three separation zones (one at upstream and two at downstream) around a single pipeline were generally observed.

2. With increasing the burial depth-diameter ratio (i.e., *G/D*), the magnitudes of separation lengths at upstream and downstream of the pipelines reduced in both single pipeline and double pipelines in tandem positions.
3. With increasing the burial depth, the magnitudes of maximum positive velocities above the pipeline and maximum negative velocities at the recirculation zones decreased which consequently would lead to a reduction in bed shear stress. Therefore, it can be expected that with increasing the burial depth, the difficulties arising with erosion and scour will be reduced.
4. With increasing the burial depth-diameter ratio (i.e., *G/D*), the reduction rate of preliminary separation length at downstream was noticeable so that with increasing the burial depth up to *D*/2, the separation length at downstream reduced to less than half of the preliminary magnitude.
5. For the single pipeline and double pipelines in tandem position, the separation length at upstream and the secondary separation length at downstream were the same However, the main separation length at the downstream of the pipelines in tandem position was smaller than that of the single pipeline.
6. For the double pipelines in tandem position, further to the three separation zones, an eddy was generated between two pipelines.
7. The numerical simulation using the computational fluid dynamic software FLUENT incorporated with the two equation k-ε turbulence model have shown an appropriate capability in estimating the separation lengths at the upstream and downstream of the pipelines.

5. References

[1] Sumer, B. M., “Physical & Mathematical Modeling of Scour”, the 2nd International Conference on Scour and Erosion, Singapore, 2004.

[2] Sumer, B. M., Fredsoe, J., “Wave Scour around Structures”, Advances in Coastal & Ocean Engineering, 1999, 4, 191-249.