

بررسی عددی و تجربی پدیده جدایش جریان در اطراف خطوط لوله نیمه مدفون تحت جریان های دائمی

شروین عمرانی^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 فهم بهتر اندرکنش لوله - جریان، تغییرات به وجود آمده در الگوی جریان اطراف خطوط لوله به ازای نسبت های متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله به صورت عددی و تجربی در حالت جریان دایمی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش مدل سازی فیزیکی، آزمایش ها در کانال آزمایشگاهی به طول: ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و عمق ۰/۵ متر و با استفاده از لوله پولیکا (P.V.C) به قطر ۶/۳۵ سانتی متر (به ازای نسبت های متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله) انجام گرفته است. جهت مشاهده الگوی جریان از ذرات پلی استایرن که دارای قطر ۰/۴ میلی متر و چگالی نسبی ۱/۰۵ می باشد، استفاده شده است. همچنین به منظور کمک به درک هر چه بهتر پدیده از کلیه مراحل انجام آزمایش بوسیله دوربین دیجیتال فیلمبرداری صورت گرفته است. در بخش شبیه سازی عددی نیز، میدان جریان با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی "FLUENT" تحلیل شده است. نرم افزار مذکور معادلات حاکم بر جریان را با به کارگیری روش حجم محدود گسسته سازی می نماید. ایجاد هندسه و شبکه بندی مدل نیز به وسیله پیش پردازنده "GAMBIT" صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: الگوی جریان، خطوط لوله، شبیه سازی عددی، روش حجم محدود، مدل فیزیکی

Numerical and Empirical Investigation of Flow Separation Phenomenon around Semi-buried Pipelines due to Steady Currents

S.Omrani¹, H. Hakimzadeh²

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 pattern around semi-buried pipelines due to steady current have physically and numerically been investigated. In physical modeling section, the experiments have been carried out in a flume with 10 meter length, 0.3 meter width and 0.5 meter depth using a P.V.C pipe with 6.35 cm in diameter (for different burial depth-diameter ratios). To visualize the flow patterns, the polystyrene particles with 0.4 mm in diameter and 1.05gr/cm³ in density have been used. 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 field has been analyzed using a computational fluid dynamics software "FLUENT". For the software, the

governing equations are discretized using the finite volume method. Geometry and mesh production have been done using a pre-processor software called "GAMBIT".

Keywords: Flow Pattern, Pipelines, Numerical Simulation, Finite Volume Method, Physical Model

۱- مقدمه

همواره در طراحی خط لوله این نکته را نباید از نظر دور داشت که گسیختگی آنها می‌تواند پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی خطرناکی را به همراه داشته باشد. به طور کلی هنگامی که سازه‌ای در محیط دریا قرار می‌گیرد، حضور سازه موجب تغییر الگوی جریان در فاصله نزدیکی از سازه شده که یک یا چند مورد از پدیده‌هایی نظیر انقباض جریان، شکل‌گیری گردابه‌های نعل اسبی در جلو سازه، شکل‌گیری گردابه‌های چرخکی (با یا بدون گردابه فکنی) در پشت سازه و نیز تولید آشفتگی را به همراه خواهد داشت [۱]. این تغییرات می‌تواند منجر به خستگی سازه و یا آبشستگی در اطراف آن گردد و نهایتاً پایداری سازه را تهدید نماید [۲]. با توجه به اینکه جریان یک سویه دائمی در مقایسه با جریان رفت و برگشتی ناشی از موج می‌تواند تهدید جدی‌تری برای پایداری سازه باشد [۳] و همینطور به دلیل آنکه در مناطق فراساحلی، عملاً موج بستر دریا را حس نمی‌کند و از سوی دیگر به علت همراه شدن بسیاری از رودخانه‌های طویل کشور با شبکه‌های وسیع انتقال نفت خام، گاز طبیعی، 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 الگوهای جریان اطراف خطوط لوله دریایی و یا استوانه‌های دایره‌ای انجام شده است. بیرمن و زددراوکویچ 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 [۴]. سامر و فردسو در سال ۱۹۹۷ مرجع کاملی را در ارتباط با رژیم‌های جریان اطراف یک استوانه دایره‌ای تحت جریان دائمی به ازای اعداد رینولدز مختلف ارائه نمودند [۵]. براز در سال ۱۹۹۹ جریان و آبشستگی را برای خطوط لوله بصورت عددی

و تجربی مورد مطالعه قرار داد [۶]. وی بصورت تجربی برای $Re = 0.6 \times 10^4$ 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 $Re = 10 \times 10^4$ نیز بصورت تجربی طول نواحی جدایی اولیه در بالادست و پایین دست استوانه به ترتیب برابر با 1.5D و 10D بدست آورد. همچنین وی در یک فرآیند شبیه‌سازی عددی در $Re = 1.5 \times 10^4$ طول ناحیه جدایی در بالادست استوانه را برابر با 0.77D و در پایین دست برابر با 7D پیش‌بینی نمود. در سال ۲۰۰۵ لیانگ و چنگ 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 [۷ و ۸]. آنها دریافتند که مدل آشفتگی $k - \epsilon$ برای کاربردهای مهندسی قابل اعتمادتر می‌باشد. در رابطه با آبشستگی مربوط به خطوط لوله و پایه‌های استوانه‌ای نیز می‌توان به ترتیب به بررسی‌های عددی و تجربی انجام گرفته توسط لی و چنگ [۹] و اتما و همکاران [۱۰] اشاره نمود. سرانجام در مورد پیش‌بینی عمق آبشستگی اطراف خطوط لوله دریا می‌توان به بررسی‌های تجربی موسوی و همکاران [۱۱] اشاره کرد. همچنین ممکن است به مرور زمان بخشی از خطوط لوله‌ای که در بستر دریا قرار می‌گیرد در اثر تغییر در نیمرخ بستر، در خاک مدفون شده و بالطبع الگوی جریان در اطراف آنها و طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله دستخوش تغییر گردد، از اینرو در تحقیق حاضر به بررسی پدیده جدایش جریان به ازای مقادیر دفن‌شدگی مختلف پرداخته شده است.

۲- مدل سازی آزمایشگاهی

به طور عموم هدف از انجام آزمایشات بر روی مدل فیزیکی، یافتن طول نواحی جدایی در بالادست و پایین

خط لوله نصب گردیده است به طوری که محور X در امتداد طولی کانال باشد.

دبی کانال از صفر تا ۳۰ لیتر بر ثانیه قابل تنظیم می‌باشد و این مهم بوسیله یک شیر متصل به لوله‌ای که آب از طریق آن از مخزن به کانال پمپ می‌شود، انجام می‌گردد. دیواره‌های قائم کانال از جنس پلکسی گلاس و کف آن پلاستیک فشرده می‌باشد. جریان آب توسط پمپی از مخزن به داخل کانال پمپاژ می‌گردد. در سرعت‌های بالا بدلیل ضربه‌های جریان خروجی از پمپ به قسمت ورودی کانال، سطح جریان در داخل کانال موجدار می‌شود که به منظور جلوگیری از این پدیده شبکه‌ای طوری 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. همچنین در قسمت پشت مرز خروجی کانال، صفحه فلزی به منظور تنظیم عمق آب تعبیه شده است. این صفحه به اهرمی چسبیده به دیواره کانال متصل بوده و با چرخاندن این اهرم، صفحه مذکور، ضمن چرخش در محدوده زوایای صفر تا ۹۰ درجه نسبت به کف کانال عمق آب را تا نقطه مورد نظر تنظیم می‌نماید. به منظور کمینه نمودن تاثیر مرزهای ورودی و خروجی کانال، لوله دقیقاً در وسط کانال و در فواصل ۵ متر نسبت به مرزهای ورودی و خروجی قرار داده شده است. جهت مشاهده الگوی جریان از ذرات پلی استایرن که دارای قطر ۰/۴ میلی متر و چگالی برابر $1/05 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشند، استفاده شده است.



شکل ۱ - کانال آزمایشگاهی

دست خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله (G/D) مورد نظر بوده است. به همین منظور، یک سری آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک و مکانیک سیالات دانشگاه صنعتی سهند ترتیب داده شد. در ساخت مدل فیزیکی سعی شده است پارامترهایی که بطور غیر مستقیم الگوی جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهند، حذف شوند که از جمله آنها می‌توان به تاثیر مرزهای ورودی و خروجی اشاره نمود. هنگام طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی و کاربرد آن نکات ذیل مد نظر بوده اند:

۱- الگوی جریان در اطراف خطوط لوله بصورت دو بعدی (در جهت های قائم و طولی کانال) مورد بررسی قرار گرفته و از تغییرات در عرض در مقایسه با دو جهت دیگر صرف نظر شده است.

۲- جهت ایجاد نسبت های متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله (G/D های متفاوت)، لوله متناسب با عمق های دفن شدگی مختلف برش زده شده و بر روی کف صاف هیدرولیکی کانال ثابت شده است.

۳- هنگام پر کردن کانال به منظور کمینه نمودن حالت جریان متغیر تدریجی که با عمق کم و سرعت زیاد در کانال بوجود آمده و سبب ایجاد خطا در مشاهدات آزمایشگاهی می‌گردد، ابتدا حجم کانال تا عمق مورد نظر پر شده و سپس جریان دائمی در کانال برقرار گردیده است.

۱-۲- مشخصات کانال آزمایشگاهی

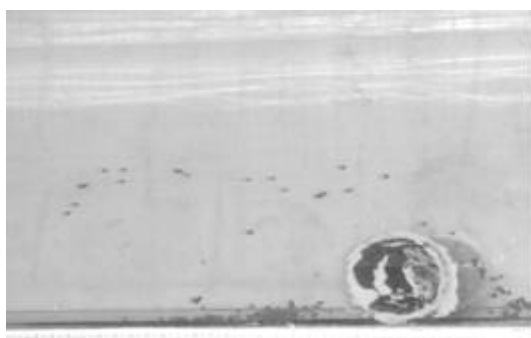
در این تحقیق، آزمایش ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و عمق ۰/۵ متر (شکل ۱) و با استفاده از لوله پولیکا (P.V.C) به قطر ۶/۳۵ سانتی متر (به ازای نسبت های متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله) و در شرایط جریان دایمی انجام شده است. مهمترین بخش کارهای آزمایشگاهی انجام دقیق آزمایشها و ثبت مشاهدات و نتایج می باشد. به همین منظور یک مقیاس با دقتی در حد میلی متر در پشت دیواره جانبی کانال و در زیر

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

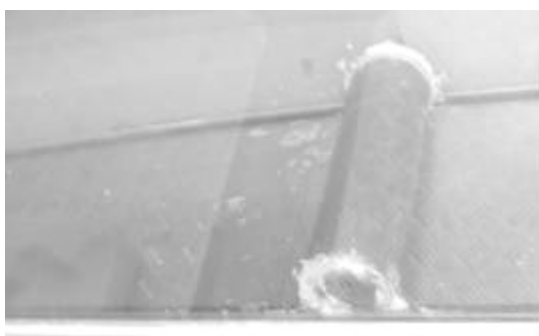
همانگونه که پیش از این بیان گردید یکی از اهداف از انجام آزمایشات بر روی مدل فیزیکی، برآورد طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله (G/D) بوده است.

روش انجام آزمایشهای این پژوهش در حالت عمومی به صورت زیر بوده است: ابتدا جهت ایجاد نسبت‌های متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله (G/D) های متفاوت (لوله پولیکا (P.V.C) در ارتفاعهای متفاوت برش زده می‌شود و بر روی کف صاف هیدرولیکی کانال ثابت می‌گردد. به منظور ممانعت از حرکت جانبی لوله، دو انتهای لوله به وسیله خمیر پلاستیک به دیواره‌های جانبی کانال چسبیده می‌شود.

پس از آنکه لوله به دیواره‌های کانال ثابت شد، پمپ روشن شده و دبی بوسیله شیر متصل به لوله ای که آب از طریق آن از مخزن به کانال پمپ می‌شود، به مقدار مورد نظر (18 l/s) رسانده می‌شود. بلافاصله پس از آن بوسیله صفحه فلزی که به منظور تنظیم عمق آب در قسمت پشت مرز خروجی کانال تعبیه شده است، عمق آب به 30 cm رسانده می‌شود. 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 می‌شود. اکنون ذرات پلی استایرن که جهت پی بردن به فیزیک پدیده و نیز ممانعت از تداخل در مسیر پمپاژ جریان در داخل محفظه‌ای مهار شده اند از فاصله مناسبی در بالادست جریان بر روی سطح رها می‌شوند. همچنین برای ثبت مشاهدات آزمایشگاهی از کلیه مراحل انجام آزمایش بوسیله دوربین دیجیتالی فیلمبرداری صورت می‌گیرد و طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله به ازای نسبت‌های متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله (G/D) اندازه گیری می‌گردد (شکل ۲).



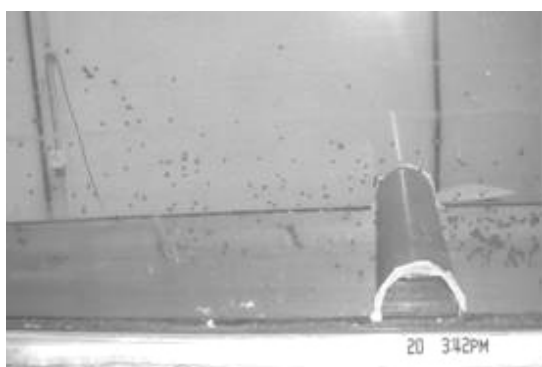
$G/D = 0$



$G/D = 0.15$



$G/D = 0.35$

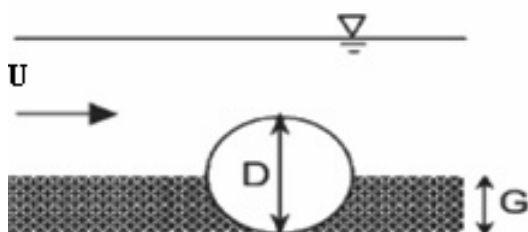


$G/D = 0.5$

شکل ۲ - تصاویر آزمایشها برای نسبت‌های دفن شدگی مختلف

۳- شبیه سازی عددی

جهت شبیه سازی عددی ۳۵ برابر قطر لوله به عنوان ناحیه محاسباتی انتخاب شده است. فاصله لوله از مرز بالادست معادل ۱۰ برابر قطر آن و از مرز پایین دست ۲۵ برابر آن می باشد. عمق آب برابر با ۳۰ سانتی متر، قطر لوله ۶/۳۵ سانتی متر و سرعت متوسط جریان در کانال برابر با ۲۰ سانتی متر بر ثانیه می باشد. شکل ۳ بخشی از محیط محاسباتی مورد نظر را نمایش می دهد که در آن D قطر لوله، G عمق دفن شدگی و U سرعت جریان دائمی در کانال آزمایشگاهی است.



شکل ۳ - طرح شماتیک محیط محاسباتی

جزئیات شبکه بندی ناحیه محاسباتی در ادامه آورده شده است. شبکه بندی اولیه مدل بوسیله نرم افزار پیش پردازنده GAMBIT صورت گرفته و پس از ورود به نرم افزار FLUENT تکمیل گردیده است. شبکه های بکار 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. همانگونه که در شکل ۴ ملاحظه می گردد شبکه ها در ناحیه ای به فاصله 0.5D از خط لوله و همینطور 0.1D از کف کانال ریزتر هستند. شبکه بندی سایر مدل ها نیز از الگوی مذکور پیروی می نماید.

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

$$Re = U(D - G)/\nu \quad (1)$$

که در آن U سرعت متوسط جریان آب در کانال، D قطر لوله، G عمق دفن شدگی و ν ویسکوزیته سینماتیکی آب می باشد که برای آب در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برابر $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ در نظر گرفته شده است.

۳-۲- نتایج مدل سازی فیزیکی

در آزمایشهای انجام شده ذرات پلی استایرن رها شده در مسیر پمپاژ جریان در فواصل مشخصی از بالادست و پایین دست خط لوله دچار پیچش می شوند. این پیچشها معرف نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خط لوله می باشد. به طور کلی سه ناحیه جدایی، دو مورد در پایین دست و یکی نیز در بالا دست قابل مشاهده بودند. نتایج آزمایشهای انجام شده به ازای نسبتهای متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله در جدول ۱ آمده است.

همانگونه که از روی نتایج جدول ۱ مشاهده می شود با افزایش نسبت عمق دفن شدگی به قطر لوله، طول نواحی جدایی در بالا دست و پائین دست خطوط لوله کاهش می یابد. همچنین با افزایش عمق دفن شدگی، نرخ کاهش طول جدایی نیز در ناحیه پایین دست قابل ملاحظه بوده به گونه ای که با افزایش عمق دفن شدگی تا نصف قطر لوله، طول ناحیه جدایی در پایین دست به کمتر از نصف مقدار اولیه کاهش می یابد.

جدول ۱ - طول نواحی جدایی به ازاء نسبتهای متفاوت عمق دفن شدگی به قطر لوله

G/D	$Re = U(D - G)/\nu$	طول ناحیه جدایی در بالادست	طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست	طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست
0	12700	0.9D	7.1D	0.7D
0.15	10800	0.75D	5.7D	0.5D
0.35	8300	0.5D	4.6D	-
0.5	6350	0.1D	3.1D	-

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

$$l = 0.07L \quad (3)$$

که L بعد مناسبی از کانال می‌باشد. 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 با ۰/۰۲۱ می‌باشد.

۳-۱-۲- شرط مرزی فشار خروجی

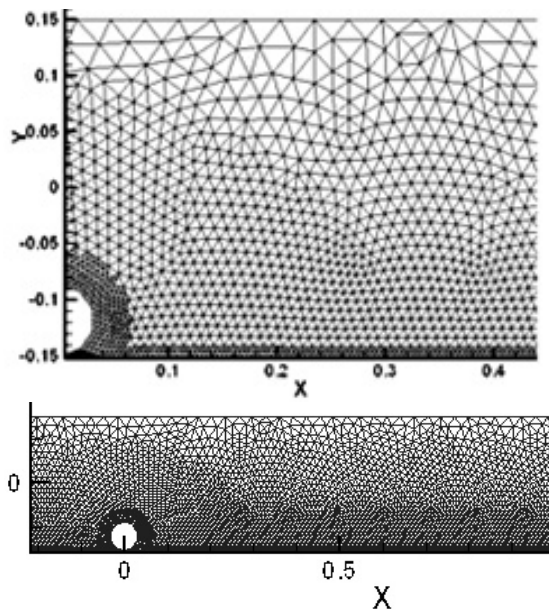
این شرط در مرز خروجی کانال بکار می‌رود. این شرط نیاز به بیان فشار و پارامترهای آشفتگی دارد. پارامترهای آشفتگی بر اساس روابط (۲) و (۳) بدست می‌آیند.

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، لوله و الحاقات آن (در صورت وجود) به عنوان دیوار تعریف شده و شرط مرزی عدم لغزش نیز برای آنها لحاظ گشته است. مقادیر زیر نیز در این قسمت تعریف می‌گردد.

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. همچنین می‌توان از این شرط در مدل‌سازی دیواره‌های لغزان در جریانهای لزج استفاده نمود. این قسمت رفتار جریان در صفحه تقارن را بیان می‌کند. لازم به ذکر است که در مرزهای متقارن هیچ‌گونه شرط مرزی دیگری نباید تعریف نمود.



شکل ۴ - جزئیات شبکه بندی لوله واقع بر کف

۳-۱-۳- شرایط مرزی مدل

شرایط مرزی تعیین‌کننده ویژگی‌های جریان در مرزها، با توجه به فیزیک مساله می‌باشد. شرایط مرزی اجزای بسیار مهم و تعیین‌کننده‌ای در نرم‌افزار شبیه‌ساز FLUENT می‌باشد.

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 نیز پارامترهای آشفتگی اعمال گردند. مشخصه‌های آشفتگی با استفاده از روش شدت و مقیاس طول تعریف شده‌اند.

شدت آشفتگی، I به صورت نسبتی از سرعت نوسانی u' به سرعت جریان متوسط u_{ave} تعریف می‌شود. در صورتی که جریان سیال توسعه یافته باشد می‌توان از رابطه تجربی ذیل مقدار آن را برآورد نمود.

$$I = \frac{u'}{u_{ave}} \cong 0.16(\text{Re}_{D_H})^{-0.125} \quad (2)$$

بر همین اساس مقادیر شدت آشفتگی خطوط لوله به ازای عمق‌های مختلف دفن‌شدگی و بر پایه عدد رینولدز مربوطه در محدوده ۴/۹٪ تا ۵/۳۵٪ می‌باشند.

برآوردهای مناسبتر و گسترده‌تری از جریان‌های سیال با کرنش و انحناء مرز بالا داشته باشیم.

۳-۳- نتایج شبیه سازی عددی

شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی بدست آمده از مدل عددی را برای خطوط جریان اطراف یک خط لوله به ازای نسبت دفن شدگی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان در مرحله نخست مشاهده نمود که با افزایش عمق دفن شدگی طول ناحیه جدایی در پایین دست لوله کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌گردد که با افزایش عمق دفن شدگی چرخاب‌های ثانوی در قسمت‌های بالادست و پایین دست خط لوله بتدریج از بین رفته است، به گونه‌ای که برای دفن شدگی برابر صفر دو چرخاب ثانوی در قسمت‌های بالادست و پایین دست خط لوله بطور کامل مشهود بوده ولی در حالت دفن شدگی پنجاه درصد، اندازه آنها به حداقل مقدار خود رسیده و تقریباً از بین می‌روند.

همچنین شکل ۶ نتایج شبیه سازی بدست آمده از مدل عددی را برای نیمرخ سرعت جریان در اطراف یک خط لوله به ازای نسبت دفن شدگی‌های مختلف نشان می‌دهد. با مراجعه به نتایج حاصله می‌توان دریافت که با افزایش عمق دفن شدگی میدان سرعت جریان در اطراف خط لوله به طور محسوسی کاهش می‌یابد و به دنبال آن حدکثر مقدار سرعت در اطراف آن نیز (که یکی از عوامل مهم آبشستگی به شمار می‌آید) کاهش پیدا می‌کند.

از روی شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌گردد که با افزایش نسبت عمق دفن شدگی به قطر لوله مقدار طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خط لوله و همینطور مقدار سرعت‌های بیشینه مثبت در بالای لوله و نیز سرعت بیشینه منفی در محل تشکیل گردابه‌ها کاهش می‌یابند.

همچنین شکل ۷ مقایسه‌ای میان نیمرخ‌های سرعت جریان را در موقعیت‌های قبل از خط لوله ($x = -0.1m$)، روی خط لوله ($x = 0m$) و پس از خط لوله ($x = 0.25m$) برای دو حالت $G/D = 0$ و $G/D = 0.5$ به عنوان نمونه نمایش می‌دهند.

در این تحقیق سطح آزاد آب به عنوان مرز متقارن تعریف شده است. این بدان معناست که از نوسانات آن صرف نظر شده است. البته این فرض اندکی خطا ایجاد می‌کند اما با توجه به نسبت قطر لوله به عمق آب، خطای حاصله به ویژه در حالت دفن شدگی قابل اغماض می‌باشد.

۳-۲- روش حل

در این بررسی از روش حل تفکیکی و خطی‌سازی ضمنی جهت حل معادلات استفاده شده است و روش‌های به کار رفته جهت مجزا سازی به شرح جدول ۲ می‌باشند. فاکتورهای زیر تخفیف برابر اعداد پیش فرض نرم‌افزار انتخاب شده است که مطابق با مقادیر جدول ۳ است.

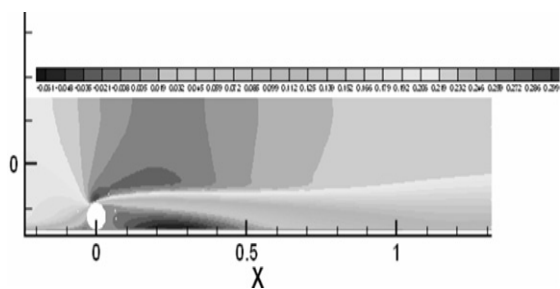
جدول ۲- روش‌های مجزا سازی

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

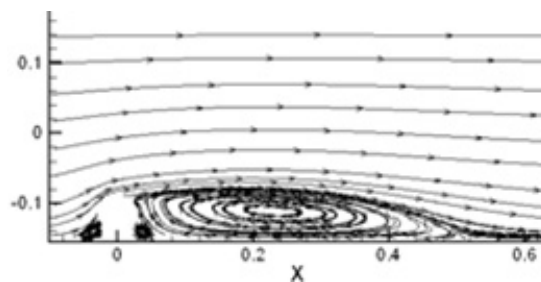
جدول ۳- فاکتورهای زیر تخفیف

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

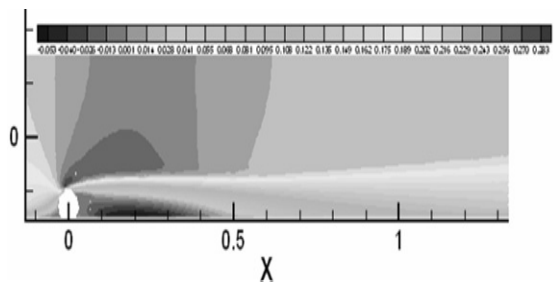
مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق، مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ - RNG می‌باشد. این مدل قادر به توصیف دقیق تنش‌های رینولدز می‌باشد. ترم کرنش در معادله نرخ هدر رفت RNG سبب می‌گردد تا



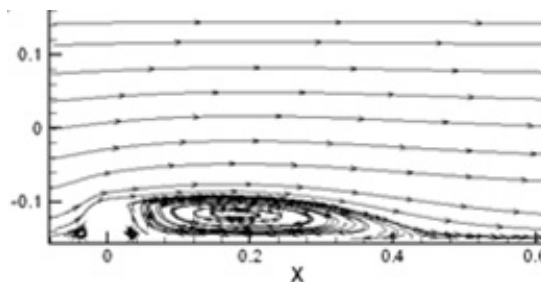
الف - $G/D = 0$



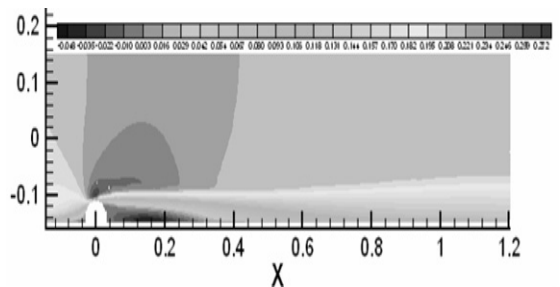
الف - $G/D = 0$



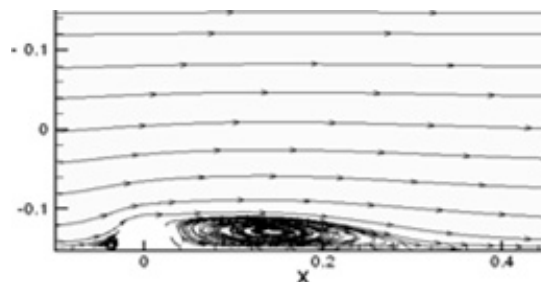
ب - $G/D = 0.15$



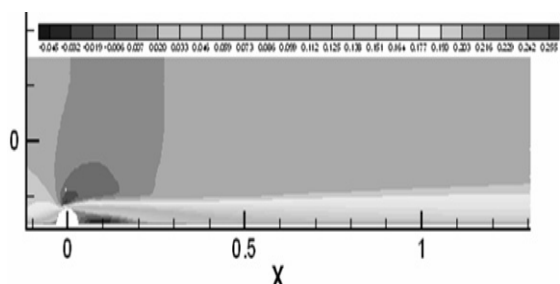
ب - $G/D = 0.15$



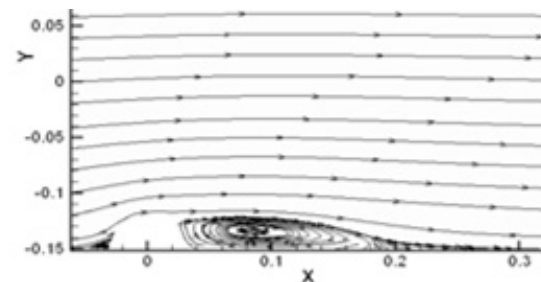
پ - $G/D = 0.35$



پ - $G/D = 0.35$



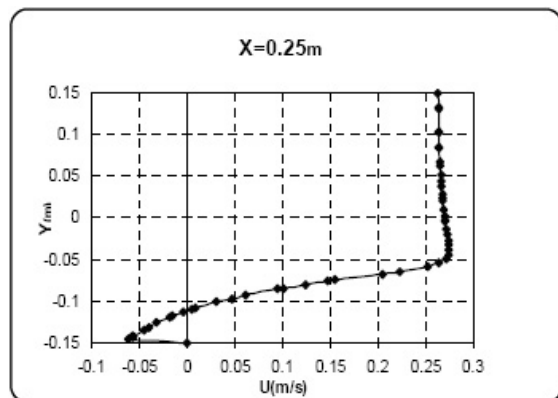
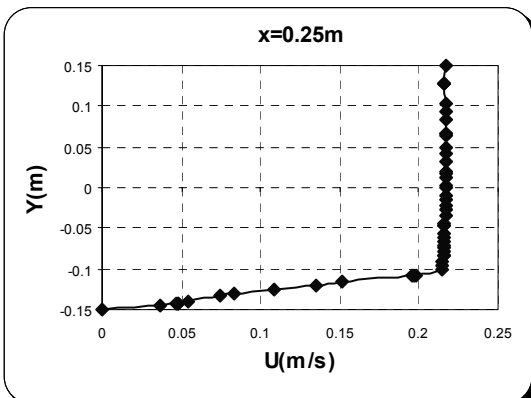
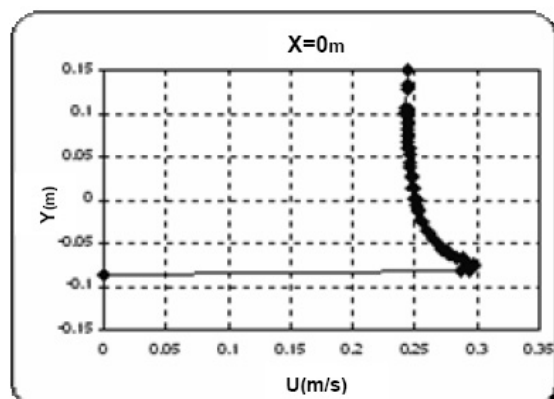
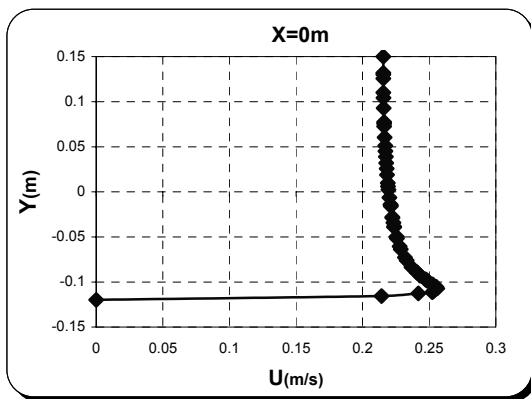
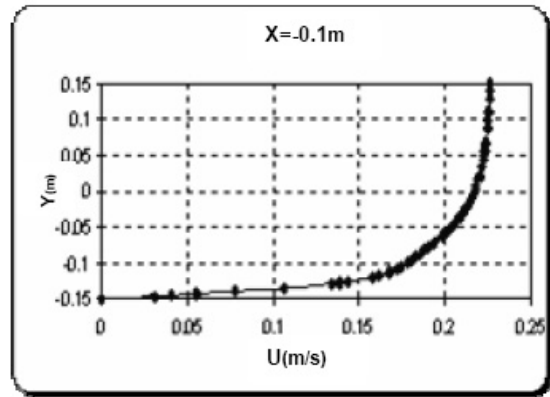
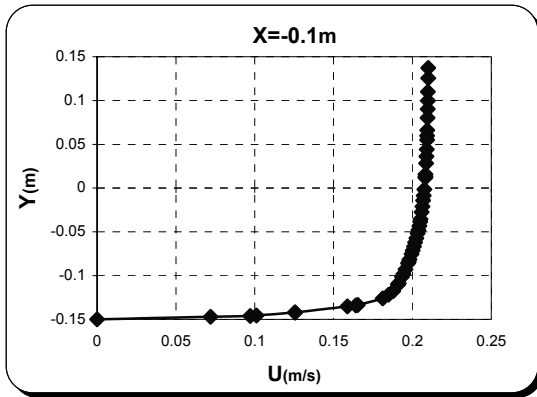
ت - $G/D = 0.5$



ت - $G/D = 0.5$

شکل ۶ - خطوط هم‌تراز سرعت در اطراف خطوط لوله به ازای دفن‌شدگی‌های مختلف

شکل ۵ - خطوط جریان در اطراف خط لوله به ازای دفن‌شدگی‌های مختلف



شکل ۷-ب - $G/D=0.5$

شکل ۷-الف - $G/D=0$

شکل ۷ - تغییرات سرعت نسبت به عمق آب در موقعیت‌های مختلف

از بررسی نتایج جدول ۴ ملاحظه می‌گردد که مدل عددی طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خط لوله را بسیار مطلوب برآورد می‌نماید. به طوریکه مقدار بیشینه اختلاف در برآورد طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست خط لوله کمتر از ۱۸٪ بوده و به ازای عمق دفن‌شدگی به قطر لوله در محدوده ۳۰٪ تا ۵۰٪ این اختلاف به کمتر از ۵٪ می‌رسد. همین‌طور در برآورد طول نواحی جدایی در بالادست اختلاف میان مدل‌های عددی و آزمایشگاهی در محدوده صفر تا ۲۰٪ می‌باشد و تنها در یک مورد عمق دفن‌شدگی ۰/۳۵، مقدار طول جدایی تجربی در بالادست لوله دو برابر مقدار متناظر شبیه‌سازی عددی است. این امر ممکن ناشی از خطای اندازه‌گیری این طول در آزمایشگاه باشد.

همانگونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود سرعت جریان روی لوله صفر است، با اندک فاصله ای از لوله سرعت به مقدار بیشینه رسیده و پس از آن دچار کاهش می‌شود و در ادامه نیز مقدار ثابتی را داراست. سرعت جریان پیش از لوله نیز بر روی مرز بستر صفر است و با دور شدن از آن این مقدار افزایش می‌یابد. نرخ این افزایش ابتدا سریع بوده و با دور شدن از بستر کاهش یافته و در نهایت ثابت می‌شود. پس از لوله نیز بر روی مرز دیوار سرعت صفر می‌باشد و در فاصله نزدیکی از آن سرعت منفی شده است (در حالت $G/D=0.5$ در فاصله مذکور سرعت منفی نمی‌باشد) و با افزایش فاصله از بستر این مقدار مثبت می‌گردد.

۳-۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

در این قسمت جهت صحت سنجی نتایج مدل عددی، مقایسه ای میان کار تجربی و شبیه‌سازی عددی مطابق جدول زیر انجام شده است.

جدول ۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در برآورد طول نواحی جدایی به ازاء نسبت‌های متفاوت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله

	G/D	$Re = U(D - G)/\nu$	طول ناحیه جدایی در بالادست	طول ناحیه جدایی اولیه در پایین دست	طول ناحیه جدایی ثانویه در پایین دست
Exp. Results	0	12700	0.9D	7.1D	0.7D
	0.15	10800	0.75D	5.7D	0.5D
	0.35	8300	0.5D	4.6D	-
	0.5	6350	0.1D	3.1D	-
Num. Results	0	12700	1D	7.95D	0.8D
	0.15	10800	0.6D	6.7D	0.3D
	0.35	8300	0.25D	4.55D	-
	0.5	6350	0.1D	2.9D	-
Comparison between exp & num results	0	12700	11.1%	12.0%	14.3%
	0.15	10800	20.0%	17.5%	40.0%
	0.35	8300	50.0%	1.1%	-
	0.5	6350	0.0%	6.5%	-

Plane Boundary, Journal of Fluid Mechanics. No. 89, pp 33-48.

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- 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, Volume. 52, pp 25-42.

8- Liang, D., 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, Volume. 52, pp 43-62.

9- Li, F. and Cheng, L. 2001, Prediction of Lee-wake Scouring of Pipelines in Currents. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 2, pp 106-112.

10- Ettema, R., Kirkill, G. and Muste, M. 2006, Similitude of Large-Scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 1, pp 33-40.

۱۱- موسوی، میرعماد، یگانه بختیاری، عباس و انشایی، نسترن. ۱۳۸۵، پیش بینی عمق آب شستگی اطراف لوله‌های زیر دریایی تحت اثر جریان، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران.

۴- نتیجه‌گیری

در این بررسی جهت مطالعه الگوی جریان اطراف خطوط لوله از دو روش مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه و شبیه‌سازی عددی بهره گرفته شده است. بر اساس مطالب ارائه شده در بخشهای گذشته نتایج به دست آمده می‌تواند به صورت زیر جمع‌بندی شود:

۱- با افزایش نسبت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله مقدار طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خط لوله کاهش می‌یابد. با افزایش عمق دفن‌شدگی، نرخ کاهش طول جدایی نیز در ناحیه پایین دست قابل ملاحظه بوده به گونه‌ای که با افزایش عمق دفن‌شدگی تا نصف قطر لوله، طول ناحیه جدایی در پایین دست به کمتر از نصف مقدار اولیه کاهش می‌یابد.

۲- با افزایش نسبت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله از مقدار سرعت‌های بیشینه مثبت در بالای لوله و نیز سرعت بیشینه منفی در محل تشکیل گردابه‌ها کاسته می‌شود. در نتیجه تنش برشی بیشینه نیز با افزایش نسبت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که با افزایش عمق دفن‌شدگی، مشکلات ناشی از فرسایش و آبشستگی نیز کاهش خواهد یافت.

۳- شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار محاسباتی "Fluent" با استفاده از مدل آشفتگی دو معادله‌ای k-ε قابلیت مناسبی را در برآورد طول نواحی جدایی در بالادست و پایین دست خطوط لوله نیمه مدفون نشان می‌دهد.

۵- مراجع

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

2- Sumer, B.M and Fredsoe., 1999, Scour around Marine Structures, Journal of coastal & ocean Engineering. No.4, pp 200-245.

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

4- Bearman, P and Zdravkovich, M., 1978, Flow around a Circular Cylinder near a