

بررسی مسئله‌ی فرایند آبشستگی در اطراف خطوط لوله‌ی دریایی با در نظر گرفتن ورق زیرسری نفوذناپذیر در زیر لوله

سیدمحمد رضا میرعلیزاده اورنگ^۱، محمدعلی لطف‌اللهی یقین^{۲*}، علی حسین‌زاده دلیر^۳، حبیب حکیم‌زاده^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- استاد سازه‌های دریایی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴- دانشیار سازه‌های دریایی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۵

چکیده- در رابطه با بررسی میزان آبشستگی در اطراف خطوط لوله‌ی دریایی تحقیقات زیادی صورت گرفته اما در نظر گرفتن صفحات زیرسری در زیر لوله‌ی تفاوت عمده‌ی این تحقیق با موارد مشابه قبلی است. نصب صفحات نفوذناپذیر باعث می‌شود تا خطوط جریان زیرزمینی شکل گرفته در زیر بستر، واقع در زیر خطوط لوله، طولانی شده، در نتیجه گرادیان فشار در عرض لوله کاهش یابد. کاهش گرادیان فشار، یکی از عمده‌ترین و اساسی‌ترین عوامل شکل‌گیری و توسعه‌ی آبشستگی در زیر خطوط لوله‌ی دریایی و شکل‌گیری پدیده‌ی رگاب در بستر زیر خطوط لوله است. این پدیده به‌عنوان یکی از نتایج حاصل از غلبه‌ی گرادیان فشار بر وزن مستغرق ذرات رسوب بستر مطرح است. در پژوهش حاضر ابتدا اثر خطوط لوله با قطرهای مختلف و اثر آرایش سایه بای سایه آن‌ها روی فرایند آبشستگی بررسی می‌شود؛ سپس با نصب ورق زیرسری نفوذناپذیر زیر خطوط لوله، برای هر یک از آرایش‌های لوله‌های موازی، اثر این صفحه روی پدیده‌ی آبشستگی مطالعه می‌گردد. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که استفاده از ورق‌های زیرسری نفوذناپذیر در زیر خطوط لوله‌ی دریایی تا حدودی مانع شکل‌گیری تونل آبشستگی در زیر خطوط لوله شده و آن‌ها را از خطرهای ناشی از آبشستگی حفظ می‌نماید.

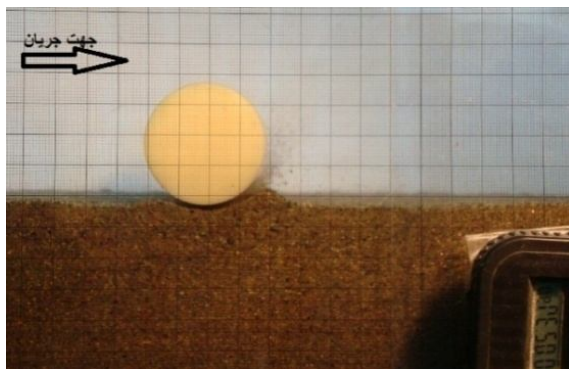
واژگان کلیدی: آبشستگی، آرایش سایه بای سایه، خطوط لوله‌ی دریایی، جریان، مدل فیزیکی.

۱- مقدمه

امروزه با توسعه‌ی سریع میادین نفتی فراساحلی استفاده از خطوط لوله‌ی دریایی به منظور نقل و انتقال مواد نفتی به پالایشگاه‌های ساحلی افزایش چشمگیری یافته است. اندرکنش بین خطوط لوله و بستر فرسایش‌پذیر تحت

شرایط جریان یا موج، باعث وقوع آبشستگی در زیر آن‌ها خواهد شد. وقوع آبشستگی در زیر خطوط لوله باعث معلق شدن قسمت‌هایی از لوله به‌صورت معلق در آب می‌شود. حال اگر این دهانه‌ی آزاد ایجاد شده به‌قدر کافی بزرگ باشد، ممکن است لوله تحت اثر نوسانات شدید

اختلاف فشار میان بالادست و پایین دست لوله، سبب می‌شود تا در پایین دست لوله و در نزدیکی آن، تراز سطح ماسه‌ی بستر به سرعت بالا آمده و در نهایت مخلوطی از ماسه و آب از زیر لوله فرار کند، به این پدیده رگاب گفته می‌شود [۷]. در شکل ۱ نشانگر لحظه شروع آبستنگی و فرار مخلوط ماسه و آب از زیر خط لوله است. مطالعات مبسوط‌تر در مرجع [۸] قابل پیگیری است.



شکل (۱) لحظه شروع آبستنگی

باتوجه به توضیحات ارائه شده، چنین به نظر می‌رسد که بهترین راه جلوگیری از وقوع آبستنگی در زیر خطوط لوله، جلوگیری از وقوع پدیده‌ی رگاب در زیر آن است. بدین منظور در تحقیق حاضر سعی شده تا با استفاده از ورق‌های زیرسری نفوذناپذیر در زیر خطوط لوله، خطوط جریان زیرزمینی شکل گرفته، طولانی‌تر شده و مانع از غلبه گرادیان فشار بر وزن مستغرق ذرات رسوبی بستر و در نتیجه مانع از وقوع پدیده رگاب شود. لازم به ذکر است که به منظور سهولت در اجرا و اطمینان از تماس کامل ورق با سطوح زیرین لوله، ورق‌های زیرسری به صورت افقی زیر خطوط لوله قرار داده می‌شود.

۲- مدل‌های آزمایشگاهی

با توجه به اهمیت درک صحیح نتایج آزمایشگاهی، توصیف دقیق مدل‌های فیزیکی مورد استفاده و شرایط انجام

حاصل از جریان، به گسیختگی سازه‌ای در آن منجر شود. برآورد دقیق حداکثر عمق آبستنگی در زیر خطوط لوله و ارائه‌ی راه‌کاری مناسب به منظور توقف کامل وقوع آن و یا کاهش عمق آبستنگی، می‌تواند در طراحی خطوط لوله‌ی دریایی نقش مهمی ایفا نماید.

اساساً شروع آبستنگی با جریان نشت یافته از داخل ماسه‌ی واقع در زیر خط لوله مرتبط است و جریان نشتی نیز ناشی از اختلاف فشار بین بالادست و پایین دست لوله می‌باشد. مائو (۱۹۸۶) نقش گردابه‌هایی که در جلو و پشت لوله ایجاد می‌شوند را تشریح کرد [۱]. او همچنین جریان نشت یافته در زیر لوله، مرتبط با شروع آبستنگی را بررسی کرد که این مورد را بعداً با جزئیات بیش‌تر چيو (۱۹۹۱) بررسی نمود [۲ و ۳]. محققان بعدی [سومر و فردسو، ۲۰۰۲] نیز شروع آبستنگی را به فرایند رگاب مرتبط نمودند [۴ و ۵]. سومر و فردسو آزمایش‌هایی را برای تعیین شرایط بحرانی درباره‌ی آبستنگی ناشی از امواج انجام دادند و شرط بحرانی را به صورت عبارتی از دو پارامتر عدد کولوگان کارپنتر (KC) و عمق فرورفتگی نسبی اولیه لوله (e/D) بیان نمودند [۶]. سومر و همکاران (۲۰۰۱) شروع آبستنگی در حالت ترکیب موج و جریان را مطالعه کردند [۷]. آن‌ها با اندازه‌گیری گرادیان فشار در زیر لوله، نشان دادند که جریان نشتی ناشی از این گرادیان فشار، افزایش‌یابنده بوده و در نتیجه رگاب، عامل اصلی شروع آبستنگی در زیر لوله است. وقتی خط لوله‌ای روی بستری رسوبی قرار گرفته و تحت اثر جریان قرار دارد، اختلاف فشار میان بالادست و پایین دست لوله، سبب نشت جریان از زیر لوله خواهد شد. هنگام افزایش سرعت جریان نقطه‌ی بحرانی در جایی که خروج جریان از زیر لوله به سرعت افزایش می‌یابد، ایجاد شده، سپس به‌طور همزمان

آزمایش‌ها به درک بهتر نتایج کمک خواهد کرد.

۱-۲- مشخصات کانال آزمایشگاهی

تمام آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در کانال مستطیلی فلزی- شیشه‌ای به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر انجام شد (شکل ۲). جریان آب با الکتروپمپی به قدرت ۱۰۰ اسب بخار و حداکثر ظرفیت پمپاژ ۶۰ لیتر بر ثانیه، از مخزن اصلی وارد کانال می‌شود و عمق پایاب با یک دریچه‌ی قابل تنظیم در پایین‌دست، طوری تنظیم می‌شود که شرایط استغراق برقرار شود. مقدار عمق جریان با در نظر گرفتن $\frac{y}{D} \geq 3$ انتخاب شده (y عمق جریان در کانال و D قطر لوله) که به وسیله‌ی عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر که در بالای فلوم نصب شده قرائت می‌شود. دبی جریان نیز با استفاده از اشلی که در بالادست سرریز مثلی نصب شده، اندازه‌گیری شده است. در طول آزمایش سرعت متوسط جریان ورودی (U) برابر با ۰.۸~۰.۹ سرعت بحرانی U_c تنظیم شده است تا در طول آزمایش شرایط آبشستگی آب زلال برقرار باشد ($\frac{U}{U_c} = 0.8 \sim 0.9$).



شکل (۲) طرح کانال آزمایشگاهی

سرعت بحرانی U_c با رابطه‌ی نیمه لگاریتمی زیر که لاجلان و ملویل (۲۰۰۱) ارائه کرده‌اند، محاسبه می‌شود [نقل از ۹]:

$$U_c/u_{*c} = 5.75 \log(5.53h/d) \quad (1)$$

u_{*c} سرعت برشی بحرانی ذرات بوده که از دیاگرام شیلدز به دست می‌آید، d اندازه‌ی میانه ذرات رسوبی و h عمق آب می‌باشند.

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، شبکه‌ای توری شکل در ورودی کانال تعبیه شده است تا آشفتگی‌ها و نوسانات ایجاد شده در سطح جریان ورودی را برطرف کرده و باعث یکنواخت شدن سرعت و شکل جریان ورودی شود.

۲-۲- مشخصات ذرات رسوبی بستر

بستر کانال با رسوبات غیرچسبیده با قطر متوسط $d_{50} = 0.5mm$ پر شده است. انحراف معیار هندسی ذرات $(\sigma = \sqrt{\frac{d_{90}}{d_{10}}})$ انتخاب شده برای رسوبات استفاده شده برابر با ۱/۴۳ در نظر گرفته شده است.

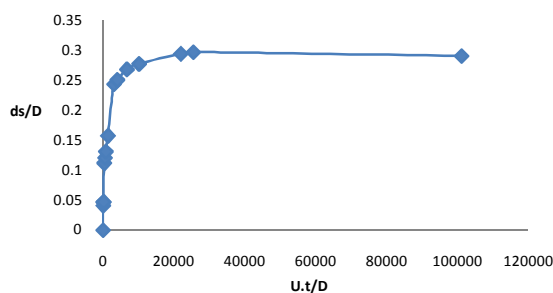
۳-۲- مدل لوله‌های به کار رفته در آزمایش‌ها

مدل لوله‌های به کار رفته از جنس پلاستیک به قطرهای ۵ cm و ۴ و ۳ و ۲ D ورق‌های به کار رفته از جنس PVC به ضخامت ۰/۵cm سانتی‌متر و به طول ۲۵cm سانتی‌متر و از جنس ورق گالوانیزه به ضخامت ۰/۷mm و به طول ۲۵ cm است. عرض ورق‌ها با انجام آزمایشات و به صورت آزمون و خطا به دست می‌آید به طوری که حداقل عرض لازم ورق برای جلوگیری از وقوع پدیده رگاب، به عنوان حداقل عرض بحرانی ورق انتخاب شده است. لوله‌ها کاملاً به دیواره‌ها محکم می‌شوند تا هیچ‌گونه ارتعاشی وجود نداشته باشد و فرار جریان از فاصله بین لوله و دیواره‌ی فلوم صورت نگیرد. در شکل ۳ لوله‌ها و ورق‌های به کار رفته در آزمایش‌هاست.

۴-۲- نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش آزمایشات به دو بخش کلی تقسیم‌بندی

با ایجاد اولین حفره، فرسایش نسبتاً شدیدی در زیر لوله رخ داده و به تدریج بستر زیر لوله شسته شده و زیر لوله خالی می‌شود. با خالی شدن زیر لوله (که عمدتاً نقطه‌ی شروع آبشستگی نقطه‌ی میانی لوله می‌باشد) آبشستگی در طول خط لوله، پیشروی می‌کند. تا این‌که گودال نسبتاً بزرگی در زیر لوله شکل گرفته و همزمان با شکل‌گیری گودال آب‌کنند تپه‌ای ماسه‌ای در پایین دست لوله ایجاد می‌شود. بعد از حدود یک ساعت از شروع آزمایش (بسته به قطر لوله) تقریباً تغییرات عمق گودال بسیار کم شده و رفته رفته تپه‌ی ماسه شسته شده و تا حدودی از شیب آن کاسته می‌شود. زمان پایان آزمایش بسته به نوع آزمایش (استفاده از ورق زیرسری و یا عدم استفاده از آن و قطر لوله‌ی به‌کار رفته در آزمایش) مشخص می‌شود، به نحوی که در هر آزمایش زمان رسیدن به عمق آبشستگی تعادل به‌وسیله‌ی منحنی تعادل محاسبه می‌شود و پس از رسیدن به عمق آبشستگی تعادل آزمایش پایان می‌یابد. شکل ۳ نشانگر منحنی زمان تعادل است.



شکل (۳) منحنی زمان تعادل

پس از اتمام آزمایش دریچه‌ی انتهایی کانال بسته شده و جریان ورودی به کانال متوقف و در حالت استغراق کامل بستر نسبت به اندازه‌گیری عمق آبشستگی و توپوگرافی بستر اقدام می‌شود. در حالتی که از ورق زیرسری استفاده شده باشد، بعد از مسطح کردن بستر ورق در محل مورد نظر طوری جای‌گذاری می‌شود که با بستر اطراف خود

شده‌اند: الف- انجام آزمایش‌های مربوط به لوله‌ی منفرد، ب- انجام آزمایش‌های مربوط به دو خط لوله‌ی موازی با آرایش سایید بای سایید نسبت به هم. در مجموع ۴۰ حالت آزمایش انجام گرفته که هر یک ۳ بار تکرار شده و متوسط نتایج آزمایش‌ها در پژوهش حاضر ارائه شده است. برای شروع آزمایش می‌بایست بستر کاملاً صاف و مسطح می‌شد. بدین منظور از ورق مسطح پلاستیکی از جنس PVC، که روی اسکلت‌بندی چوبی هم ارتفاع با تراز مورد نظر بستر، نصب شده بود و در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است، برای ماله‌کشی روی ذرات بستر و مسطح کردن آن و از تراز بنایی برای اطمینان از مسطح بودن بستر (نبود شیب عرضی و طولی) استفاده شده است.

پس از اطمینان از مسطح بودن بستر مرحله‌ی آگیری آغاز می‌شود. به دلیل این که هنگام پر کردن کانال جریان متغیر تدریجی با عمق کم و سرعت بالا در کانال ایجاد و سبب آبشستگی غیر واقعی زیاد در زیر لوله می‌شود؛ در نتیجه بعد از مسطح کردن بستر، ابتدا دریچه‌ی انتهایی فلوم را بسته و با دبی بسیار پایین نسبت به آگیری کانال اقدام شده و پس از آن لوله‌ها روی بستر قرار داده می‌شود. سعی بر آن شده تا دبی آب ورودی به کانال در حدی باشد که سبب جابجا شدن ذرات بستر نشود. به منظور جلوگیری از تشکیل ریبیل به‌وسیله‌ی جریان متغیر تدریجی، آگیری کانال از دو طرف انجام می‌گیرد. پس از نصب لوله در محل مورد نظر پمپ آب را روشن نموده و فلکه جریان را تا رسیدن به دبی مورد نظر باز کرده و به تدریج دریچه‌ی انتهایی کانال باز می‌شود تا عمق آب در کانال به ارتفاع مطلوب ($\frac{y}{D} \geq 3$) برسد. پس از تثبیت جریان و رسیدن به عمق و دبی مورد نظر، آزمایش آغاز می‌شود. با شروع آزمایش ابتدا پس از وقوع پدیده‌ی رگاب در زیر خط لوله مخلوطی از ماسه و آب از زیر لوله به بیرون پرتاب می‌شود.

به دست می‌آید: ۱- با افزایش قطر لوله عمق آبستگي تعادل بی بعد کاهش می‌یابد به طوری که بین قطرهای ۵cm و ۲cm تغییر محسوسی در حداکثر عمق آبستگي دیده می‌شود. این نتیجه با نتایج کارهای محققان پیشین همخوانی خوبی نشان می‌دهد [۹]:

۲- با افزایش قطر لوله، عرض گودال آبکند مطلق افزایش می‌یابد که این امر ناشی از افزایش طول جریان با سرعت بالا برای جریان عبوری از زیر لوله می‌باشد. چرا که با افزایش قطر لوله جریان عبوری از زیر لوله طول بیشتری را طی خواهد کرد تا از زیر لوله عبور کرده و به پایین دست لوله برسد؛ در نتیجه طولی که در آن سرعت جریان عبوری به علت تنگ‌شدگی افزایش یافته است، بیشتر خواهد بود. بنابراین آثار ناشی از افزایش سرعت جریان عبوری از زیر لوله نیز در طول بیشتر تری از بستر وارد شد. در نتیجه عرض مطلق گودال و حجم مواد رسوبی فرسایش یافته از زیر لوله افزایش می‌یابد؛ ۳- با افزایش قطر لوله، مقیاس زمان فرایند آبستگي افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر مدت زمان زیادی برای رسیدن بح حالت تعادل آبستگي صرف خواهد شد؛ ۴- با توجه به مشاهدات عینی بعمل آمده در طول آزمایش‌ها، برای تمامی آزمایش‌های انجام گرفته چنین به نظر می‌رسد که تغییرات نیمرخ گودال آبستگي در جهت قائم، بسیار سریع‌تر از تغییرات آن در جهت طولی است؛ به طوری که در کم‌تر از یک ساعت عمق گودال آبستگي به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در حالی که برای تعادل نیمرخ گودال آبستگي در جهت طولی چندین ساعت وقت لازم است. علت این امر را می‌توان در مکانیسم‌های ایجاد گودال آبستگي جستجو کرد. چرا که تغییرات نیمرخ آبستگي در جهت قائم (حداکثر عمق آبستگي) را می‌توان به فرسایش تونلی نسبت داد که پس از شروع آبستگي،

هیچ نوع اختلاف ارتفاعی نداشته باشد (با بستر هم‌تراز باشد) و بستر کاملاً مسطح باقی بماند. سپس همانند حالت قبل نسبت به آبیگری کانال اقدام و آزمایش تکرار می‌شود.

۳- نتایج آزمایشگاهی

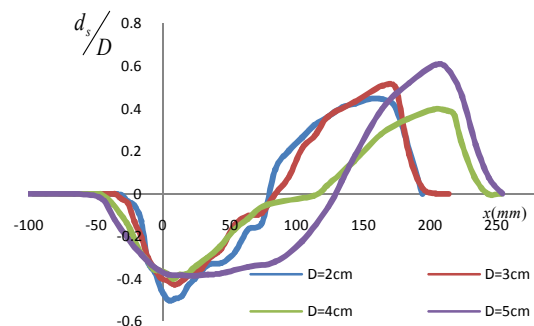
در پژوهش حاضر به بررسی پارامترهایی نظیر قطر لوله‌ها، فاصله ی لوله‌ها و اثر ورق زیرسری نفوذناپذیر بر فرایند آبستگي در اطراف خطوط لوله موازی پرداخته می‌شود.

۳-۱- آبستگي در اطراف خطوط لوله‌ی منفرد

در این سری از آزمایشات ابتدا فرایند آبستگي در اطراف یک خط لوله‌ی منفرد بررسی شد. سپس با قرار دادن ورق زیرسری نفوذناپذیر در زیر لوله، اثر ورق زیرسری بر فرایند آبستگي بررسی می‌شود.

۳-۱-۱- آبستگي در اطراف خط لوله بدون در نظر گرفتن ورق

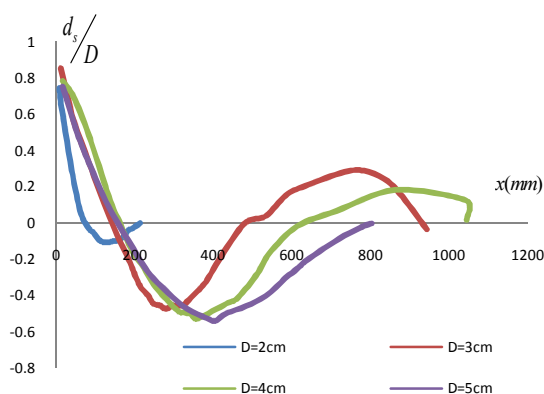
شکل ۴ نشانگر پروفیل آبستگي بی بعد شده نسبت به قطر لوله‌هاست.



شکل (۴) پروفیل آبستگي بی بعد به ازای قطرهای مختلف

باتوجه به آزمایش‌های انجام یافته و پروفیل‌های آبستگي شکل گرفته (شکل ۴) برای هر ۴ قطر لوله نتایج زیر

نخورده می‌شود [برگرفته از ۱۲] در نتیجه این گردابه‌ها باعث فرسایش بستر در پایین دست لوله می‌شوند. از طرف دیگر با توجه به این که انتشار گردابه‌های برخاستگی در پایین دست لوله، به گونه‌ای است که در محل برخورد خود با بستر، ذرات رسوبی بستر را هم به بالادست و هم به پایین دست بستر، جابجا می‌کند؛ بنابراین در محل برخورد گردابه‌ها با بستر، می‌توان شاهد وقوع نوعی گودال آبکند (تقریباً شبیه آنچه در حالت بستر با رسوبات چسبنده دیده می‌شود) بود. رسوباتی که به علت جریان مخالف ایجاد شده به وسیله‌ی گردابه‌ها به سمت بالادست بستر انتقال می‌یابند به قسمت پایین دست لوله برخورد کرده و در آنجا ساکن می‌مانند. با تکرار این جابجایی‌ها سرانجام به قدری رسوبات در پایین دست لوله روی هم جمع می‌شوند که تپه ماسه‌ای در این قسمت لوله، تشکیل می‌دهند. به طوری که در دراز مدت به عنوان محافظی جانبی برای لوله عمل می‌کنند و مانع از جابجایی‌های عرضی ناخواسته‌ی لوله می‌شوند که این روش را می‌توان به عنوان روشی برای ایجاد محافظ جانبی برای لوله‌های تحت اثر جریان تک سویه پیشنهاد کرد. در شکل ۵ نشانگر پروفیل آبشستگی مربوط به این حالت است.



شکل (۵) پروفیل آبشستگی بی بعد به ازای قطرهای مختلف حین استفاده از ورق زیرسری در زیر لوله‌ی منفرد

باعث گسترش سریع آبشستگی در زیر خط لوله می‌شود. تغییرات نیمرخ گودال آبشستگی در جهت طولی به فرسایش گردابی بستگی زیادی دارد و نیازمند زمان زیادی است تا گردابه‌های برخاستگی ایجاد شده، بتوانند نیمرخ گودال آبشستگی را در جهت طولی دچار تغییر و تحول نمایند. ۵- با توجه به پروفیل آبشستگی رسم شده برای هر ۴ قطر به نظر می‌رسد که شیب گودال آبشستگی در پایین دست گودال بسیار ملایم‌تر از شیب گودال در بالادست آن است. علت این امر را نیز می‌توان به مکانیسم فرسایش گردابی ربط داد. زیرا گردابه‌های ایجاد شده در پایین دست لوله‌ی بستر جاروب و سبب فرسایش بستر در پایین دست لوله می‌شوند و این امر باعث آبشستگی بیش‌تر در پایین دست لوله، نسبت به بالا دست آن می‌شود. در نتیجه شیب گودال آبشستگی در پایین دست لوله ملایم‌تر و در بالادست لوله، تیزتر خواهد بود.

۳-۱-۲- آبشستگی در اطراف خط لوله با در نظر گرفتن ورق

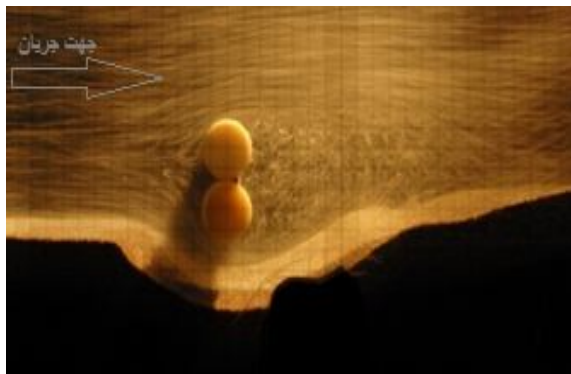
با قرار دادن ورق زیرسری نفوذناپذیر در زیر خط لوله، خطوط جریان شکل گرفته در بستر زیر لوله طولانی‌تر شده و باعث کاهش گرادیان فشاری و در نتیجه مانع از غلبه گرادیان فشاری بر نیروی وزن مستغرق ذرات رسوبی بستر می‌شود. بنابراین مانع از شکل‌گیری پدیده رگاب در پایین دست لوله می‌شود. با توجه به این که گردابه‌های شکل گرفته در بالا دست و پایین دست نزدیکی لوله نیز به عنوان عوامل ثانویه در ایجاد آبشستگی، به تنهایی و بدون حضور پدیده رگاب، توان کافی برای خالی کردن بستر زیر لوله را ندارند؛ گودال آبشستگی در زیر خط لوله ایجاد نخواهد شد. اما از آنجا که گردابه‌های برخاستگی شکل گرفته در پایین دست لوله سبب افزایش پارامتر پایداری تا چندین برابر مقدار معمولی آن در حالت جریان دست

از هم (w) نیز، بررسی خواهد شد.

۳-۲-۱- بدون در نظر گرفتن ورق

۳-۲-۱- لوله‌ها چسبیده به هم ($w = 0$)

در این حالت، دو لوله به صورت کاملاً مماس روی هم قرار گرفته‌اند و فاصله‌ای بین آن دو وجود ندارد (شکل ۶). با توجه به مشاهدات عینی صورت گرفته، در این حالت، آبشستگی بسیار شدیدی در زیر دو لوله شکل می‌گیرد. برای مثال، حداکثر عمق آبشستگی برای قطر 5cm در حالت سایید بای سایید با $w = 0$ حدود ۳ برابر حداکثر عمق آبشستگی رخ داده، برای همین قطر در حالت لوله‌ی منفرد است. شکل ۷ نشانگر پروفیل آبشستگی بدون بعد در حالت سایید بای سایید با $w = 0$ است.



شکل (۶) خطوط جریان شکل گرفته‌ی آبشستگی در حالت سایید بای

سایید $w = 0$.

تفاوت عمده بین گودال آبشستگی شکل گرفته در این حالت از آزمایش‌ها با گودال آبشستگی شکل گرفته در آزمایش‌های مربوط به لوله‌ی منفرد، به حداکثر عمق گودال آبشستگی مربوط می‌باشد. علت شکل‌گیری گودالی عمیق‌تر نسبت به آزمایش‌های قبل را شاید بتوان چنین بیان کرد: زمانی که دو لوله به‌طور مماس روی هم قرار می‌گیرد، علاوه بر افزایش بیش‌تر گرادیان فشاری نسبت به

با توجه به پروفیل آبشستگی رسم شده نتایج زیر به‌دست می‌آید: ۱- با افزایش قطر لوله‌ها عمق آبشستگی ناشی از گردابه‌های برخاستگی افزایش می‌یابد. علت وقوع آن، این است که با افزایش قطر لوله‌ها گردابه‌های شکل گرفته در پشت لوله‌ی بزرگ‌تر شده و با قدرت بیش‌تری به بستر برخورد می‌کنند در این حالت نسبت پارامتر پایداری به پارامتر پایداری بحرانی بیش‌تر از حالتی که از لوله‌ای با قطر کوچک‌تر استفاده شده است، افزایش می‌یابد؛ در نتیجه گردابه‌های شکل گرفته در پشت لوله‌هایی با قطر بزرگ‌تر قابلیت انتقال رسوبات بیش‌تری را خواهند داشت. در نتیجه عمق گودال آبشستگی (d_s) ناشی از گردابه‌های برخاستگی در این حالت عمیق‌تر خواهد بود.

۲- با افزایش قطر لوله‌ها موقعیت حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست لوله، ناشی از گردابه‌های برخاستگی، از نزدیکی لوله به سمت پایین‌دست پیشروی می‌کند. به طوری که فاصله‌ی حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست لوله تا مبدأ مختصات در حالت استفاده از لوله‌ای با قطر ۲ سانتی‌متر برابر ۱۳۳ میلی‌متر می‌باشد که این عدد در مقایسه با فاصله حداکثر عمق آبشستگی در حالت استفاده از لوله‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر که مقدار ۴۳۴ میلی‌متر را داراست، بسیار کوچک می‌باشد. علت این امر شاید بدین دلیل باشد که گردابه‌های شکل گرفته در پشت لوله‌هایی با قطر بزرگ‌تر در فاصله دورتری از لوله نسبت گردابه‌ها شکل گرفته در پشت لوله‌هایی با قطر کوچک‌تر با بستر برخورد می‌کنند.

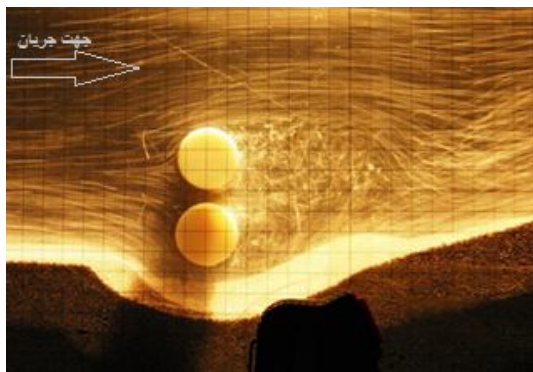
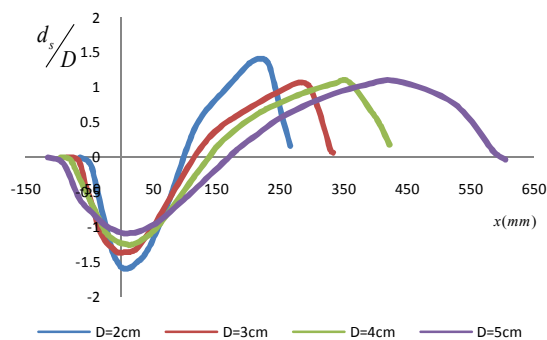
۳-۲- آبشستگی در اطراف خطوط لوله‌ی موازی با

آرایش سایید بای سایید

در این سری از آزمایش‌ها علاوه بر اثر قطر لوله‌ها، موقعیت قرارگیری لوله‌ها نسبت به یکدیگر و فاصله‌ی آن‌ها

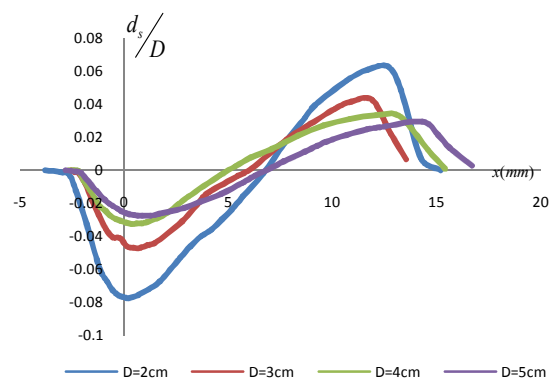
۳-۲-۲- با در نظر گرفتن ورق

در این سری از آزمایش‌ها ورق به ابعاد $250 \times 10 \times 0.7 \text{ mm}$ به عنوان ورق زیرسری مورد آزمایش، در زیر لوله به کار گرفته شده است. با انجام آزمایش‌های این بخش مشاهده شد که در زیر هیچ یک از لوله‌های به کار رفته در حالت‌های سایه بای سایه، فرسایش تونلی رخ نمی‌دهد. تنها فرسایش ایجاد شده در بستر مربوط به فرسایش گردابی، ناشی از گردابه‌های برخاستگی در پایین دست لوله‌هاست. در این بخش نیز با توجه به فاصله قرارگیری لوله‌ها از یکدیگر، به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

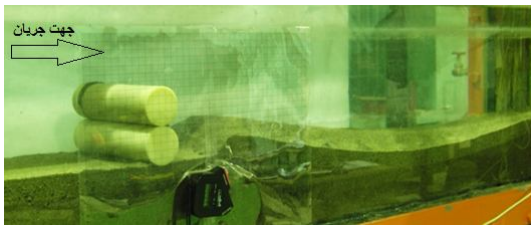
شکل (۸) آبشستگی در حالت سایه بای سایه. $w = \frac{D}{4}$ شکل (۹) پروفیل آبشستگی در حالت سایه بای سایه. $w = D/4$ ۳-۲-۱- لوله‌ها چسبیده به هم ($w = 0$)

در این حالت، به علت افزایش طول خطوط جریان

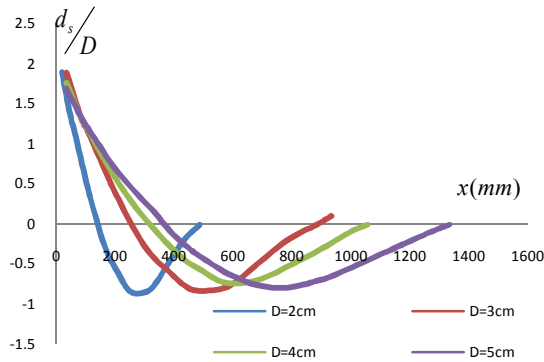
آزمایش‌های قبل، باعث انحراف مسیر حجم بیش‌تری از سیال به داخل گودال آبشستگی ایجاد شده پس از شروع فرسایش تونلی در زیر لوله نیز می‌شود. در نتیجه حجم بیش‌تری از سیال با سرعتی بیش‌تر از سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی وارد گودال آبشستگی می‌شود؛ در نهایت موجب افزایش در عمق گودال آبشستگی می‌گردد.

شکل (۱۰) پروفیل آبشستگی بی بعد در حالت سایه بای سایه $w = 0$.۳-۲-۱- لوله‌ها با فاصله‌های $w = \frac{D}{4}$ ، $w = \frac{D}{2}$ و $w = D$

در این حالت از آزمایش‌ها نیز شکل‌گیری گودال آبشستگی رفتاری شبیه به آزمایش‌های مربوط به لوله منفرد دارد؛ به طوری که با افزایش قطر لوله‌ها، حداکثر عمق گودال آبشستگی بدون بعد (d_s/D) کاهش می‌یابد. همانند حالت $w = 0$ در این حالات نیز، تفاوت عمده بین این حالات از آزمایش‌ها با آزمایش‌های مربوط به لوله منفرد در اندازه‌ی حداکثر عمق گودال آبشستگی است. با توجه به مشاهدات عینی (شکل ۸)، به علت تداخل گردابه‌های برخاستگی شکل گرفته در پشت هر دو لوله، شیب ملایم‌تری در پایین دست گودال آبشستگی مشاهده شده است. پروفیل آبشستگی مربوط به این ۳ حالت، روند یکسانی دارند که در شکل ۹ پروفیل آبشستگی بدون بعد مربوط به $w = \frac{D}{4}$ آورده شده است.



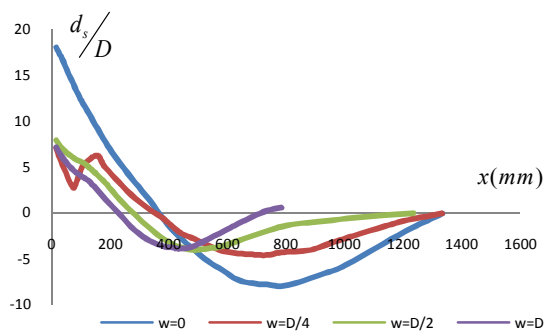
شکل (۱۰) پیشروی رسوبات به سمت لوله‌ها $w = 0, D = 5\text{cm}$.



شکل (۱۱) پروفیل آبستگي در حالت سايد باي سايد با ورق

زيرسري $w = 0$

شکل ۱۲ نشانگر پروفیل آبستگي بدون بعد برای قطر ۵ سانتی متری در حالت سايد باي سايد با ورق زیرسری با فواصل مختلف قرارگیری لوله‌ها نسبت به هم است. با بررسی پروفیل آبستگي نتایج زیر به دست می‌آید: ۱- با افزایش فاصله‌ی بین دو لوله از مقدار حداکثر عمق گودال آبستگي و فاصله‌ی موقعیت قرارگیری آن از لبه‌ی لوله‌ها کاسته می‌شود (شکل ۱۲).



شکل (۱۲) پروفیل آبستگي در حالت سايد باي سايد با ورق

زيرسري $D = 5\text{cm}$

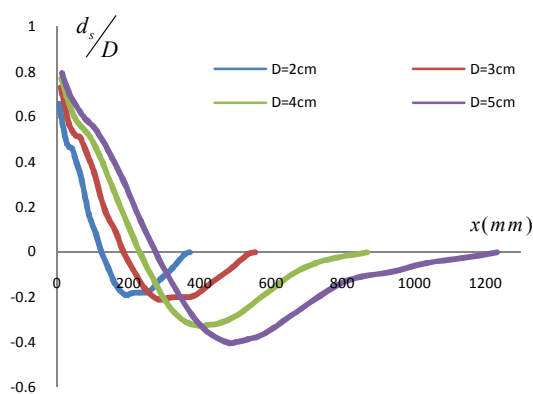
زیرزمینی ناشی از به‌کارگیری ورق زیرسری نفوذناپذیر در زیر لوله‌ها، پدیده‌ی رگاب رخ نمی‌دهد. ولی به دلیل وقوع فرسایش گردابی در پایین دست لوله‌ها، توده‌ای از رسوبات با ارتفاع زیاد در لبه‌ی پایین دست لوله‌ها انباشته می‌شود. شدت فرسایش گردابی شکل گرفته به حدی است که ارتفاع رسوبات انباشته شده در پایین دست لوله و عمق گودال آبستگي ناشی از گردابه‌های برخاستگی بیش‌تر از حالت‌هایی است که قبلاً ذکر شده‌اند. شکل ۱۰ نشانگر پیشروی رسوبات به سمت لوله‌ها است.

با توجه به پروفیل‌های آبستگي بی بعد رسم شده در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر لوله‌ها، ارتفاع توده‌ی رسوبات انباشته شده در پایین دست لوله‌ها و عمق گودال آبستگي بی بعد (d_s/D) کاهش می‌یابد (هر چند عمق گودال آبستگي (d_s) دارای افزایش است). به نظر می‌رسد تنها دلیل اختلاف نتیجه‌ی این حالت با حالتی که زیر لوله‌های منفرد ورق قرار داده می‌شود، این است که هنگام استقرار دو لوله روی هم، گردابه‌های برخاستگی در فاصله‌ی بسیار دورتری نسبت به حالتی که از یک لوله استفاده شده است، با بستر برخورد می‌کنند. در نتیجه از قدرت اثر گردابه‌ها نسبت به حالتی که از یک لوله استفاده می‌شود و گردابه‌ها زودتر با بستر برخورد می‌کنند کاسته می‌شود.

۳-۲-۲-۲- لوله‌ها با فاصله‌های $w = \frac{D}{4}$ و $w = \frac{D}{2}$ و $w = D$

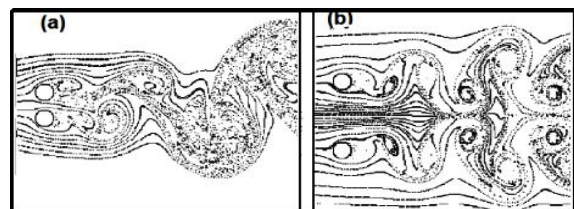
نتایج حاصل از انجام این آزمایش‌ها بیانگر آن است که مطابق آنچه که در بالا نیز به آن اشاره شد به علت افزایش طول خطوط جریان زیرزمینی، در زیر هیچ یک از لوله‌ها، فرسایش تونلی رخ نداده و تنها شکل‌گیری فرسایش گردابی در پایین دست لوله‌ها دیده شد.

است، در نزدیکی لوله‌ها به دو قسمت تقسیم می‌شود، جریانی که از میان گپ موجود در بین دو لوله و از بالای لوله‌ی دوم عبور می‌کند. از اثر این دو جریان در پشت لوله‌ها گردابه‌های برخاستگی شکل گرفته و این گردابه‌ها باعث شکل‌گیری فرسایش گردابی در پایین‌دست لوله‌ها و انتقال رسوبات به سمت لبه‌ی لوله‌ی اول می‌شود. این رسوبات با طی شیبی ملایم از محل اثر گردابه‌ها تا نزدیکی لبه‌ی لوله حرکت می‌کنند. از طرف دیگر، در نزدیکی لوله‌ها جریان دیگری با سرعت بسیار بالا (جریان عبوری از میان گپ) در حرکت است. زمانی که رسوبات منتقل شده از پایین‌دست لوله‌ها در محل اثر این جریان قرار می‌گیرند، اندرکنش بین جریان عبوری از میان گپ و اثر گردابه‌های برخاستگی باعث ایجاد نوعی تغییر شیب در آرایش انباشت رسوبات در نزدیکی لوله‌ها می‌شود. ۴- با افزایش قطر لوله‌ها، حداکثر عمق گودال آبشستگی شکل گرفته ناشی از گردابه‌های برخاستگی افزایش می‌یابد و فاصله‌ی موقعیت قرارگیری آن نسبت به مبدأ مختصات بیش‌تر می‌شود (شکل ۱۴). این نتیجه مشابه حالت لوله‌های منفرد است؛ چرا که گردابه‌های برخاستگی حاصل جریان عبوری از فاصله‌ی بین دو لوله در فاصله نزدیک‌تری نسبت به حالت لوله‌های چسبیده به هم با بستر برخورد می‌کنند.



شکل (۱۴) پروفیل آبشستگی حالت سایه بای سایه $w = D/2$.

علت این امر را می‌توان چنین بیان نمود: در حالتی که فاصله‌ی بین دو لوله نسبتاً کم باشد، به‌علت تداخل گردابه‌های برخاستگی شکل گرفته ناشی از وجود دو لوله در مسیر جریان، می‌توان شاهد ترکیب گردابه‌های ناشی از تک تک لوله‌ها و شکل‌گیری گردابه‌های برخاستگی تقریباً واحدی در پایین‌دست دو لوله بود. اما زمانی که فاصله‌ی بین دو لوله نسبتاً زیاد باشد، گردابه‌های برخاستگی شکل گرفته در پایین‌دست دو لوله، تقریباً به‌طور مستقل عمل می‌نمایند. به‌طوری که برای فاصله‌ی نسبی (w/D) نسبتاً بالا، فرسایش گردابی شکل گرفته در پایین‌دست دو لوله، صرفاً ناشی از اثر گردابه‌های برخاستگی ایجاد شده در لوله‌ی پایینی خواهد بود (شکل ۱۳). در نتیجه دلیل این‌که در w/D های نسبتاً بالا عمق گودال آبشستگی شکل گرفته در پایین‌دست لوله‌ها نسبت به عمق آن در w/D های پایین و فاصله موقعیت قرارگیری حداکثر عمق گودال نسبت به لوله‌ها کم است، ناشی از میزان ترکیب گردابه‌های برخاستگی ایجاد شده در هر یک از لوله‌ها می‌باشد.



شکل (۱۳) شکل‌گیری و ترکیب گردابه‌ها با توجه به w/D بدون

استفاده از ورق زیرسری در زیر لوله‌ها [۱۱]

۲- با کاهش فاصله‌ی بین دو لوله، رسوبات انباشته شده در لبه‌ی لوله‌ی پایین (لوله‌ی اول) ابتدا با ایجاد شیب اولیه به سمت قعر گودال پیش می‌روند و پس از طی مسیری کوتاه (که به فاصله بین دو لوله بستگی دارد) با تغییر شیب خود ادامه مسیر را تا قعر گودال در پیش می‌گیرد. علت این امر را می‌توان چنین بیان نمود: مطابق آنچه در شکل ۱۳ نیز مشاهده می‌شود، جریانی که از بالادست لوله‌ها در حرکت

۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر در دو بخش عمده، طبقه‌بندی شده است:
 ۱- بررسی علل و عوامل شکل ایجاد آبستگي زیر خطوط لوله و حداکثر عمق گودال آبکند زیر خطوط لوله‌ی منفرد و ساید بای ساید؛ ۲- پیشنهاد استفاده از ورق نفوذناپذیر زیر خطوط لوله به دلیل جلوگیری و کاهش شکل‌گیری پدیده رگاب در بستر زیر خطوط لوله به منظور کنترل آبستگي و بررسی کارایی آن در کنترل و کاهش آبستگي. (چون یکی از عمده‌ترین و اساسی‌ترین عوامل شکل‌گیری و توسعه‌ی آبستگي در زیر خطوط لوله‌ی دریایی شکل‌گیری پدیده‌ی رگاب در بستر زیر خطوط لوله است که این پدیده به‌عنوان یکی از نتایج حاصل از غلبه‌ی گرادیان فشار بر وزن مستغرق ذرات رسوب بستر مطرح است).

با انجام آزمایش‌های مختلف نتایج زیر حاصل شد که با نتایج کارهای محققان پیشین به‌خوبی همخوانی دارند:

- ۱- در تمامی حالاتی که از ورق زیرسری استفاده نشده است با افزایش قطر لوله، حداکثر عمق بی بعد گودال آبستگي (d/D) کاهش می‌یابد. ۲- زمانی که دو خط لوله با آرایش ساید بای ساید کنار هم قرار گیرند، با افزایش فاصله‌ی لوله‌ها از عمق گودال آبستگي شکل گرفته در زیر خطوط لوله کاسته می‌شود.
- ۳- با توجه به نتایج آزمایشگاهی توصیه می‌شود به منظور کاهش حداکثر عمق گودال آبستگي زمانی که دو لوله در کنار هم قرار می‌گیرند با حداکثر فاصله ممکن نسبت به هم اجرا شوند و یا از ورق زیرسری در زیر خطوط لوله استفاده گردد.
- ۴- در تمامی حالاتی که در زیر خطوط لوله از ورق نفوذناپذیر استفاده شده باشد. فقط آبستگي ناشی از گردابه‌های برخاستگی مشاهده خواهد شد زیرا در این حالت خطوط جریان شکل گرفته در بستر زیر لوله طولانی‌تر گشته و باعث کاهش گرادیان فشاری و در نتیجه مانع از غلبه گرادیان فشاری بر نیروی وزن مستغرق ذرات رسوبی بستر می‌گردد که این نشان

از کارایی بالای راهکار پیشنهادی پژوهش حاضر دارد.

۵- مراجع

- [1] Mao, Y., "The interaction between a pipeline and an erodible bed," Series Paper No. 39, Inst., of Hydrodynamics and Hydr., Engrg., Tech. Univ., of Denmark, Lyngby, Denmark, 1986.
- [2] Chiew, Y.-M., "Mechanics of local scour around submarine pipelines," J., Hydraul Eng., Am., Soc., Civ., Eng., 116 (4), 515-529, 1991.
- [3] Cheng, L., Yeow, K., Zhang, Z., Teng, B., "Three-dimensional scour below offshore pipelines in steady currents," J., Coastal Eng., Vol. 56, pp 577-590, 2008.
- [4] Sumer, B.M., and Fredsoe, J., "Wave scour around structures," Advanced in coastal and ocean Eng., Vol. 4, 1999.
- [5] Sumer, B.M., and Fredsoe, J., "The mechanics of scour in the marine environment," World Scientific (book), Vol. 17. pp 5-136, 2002.
- [6] Sumer, B.M., and Fredsoe, J., "Scour below pipelines in waves," Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 116, No. 3., pp 307-323, 1991.
- [7] Sumer, B.M., Truelsen, C., Sichmann, T., Fredsoe, J., "Onset of scour below pipelines and self-burial," J., Coastal Eng., 42 (4), 213-235, 2001.

[۸] میرعلیزاده، سیدمحمد رضا، "بررسی مسئله آبستگي در اطراف خطوط لوله دریایی با در نظر گرفتن صفحات زیرسری نفوذناپذیر با استفاده از مدل فیزیکی،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۹.

[۹] حسینی، داریوش، "بررسی پدیده آبستگي موضعی در اطراف خطوط لوله فراساحلی تحت اثر جریانهای ماندگار با استفاده از مدل‌های عددی و فیزیکی،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، ۱۳۸۴.

- [12] Li, F., Cheng, L., Prediction of lee-wake scouring of pipelines in currents," J., Waterway, port, coastal and Ocean Eng, ASCE, Vol. 127, No. 2, pp 106-112, 2001.
- [10] Dey, S., Singh, N., "Clear-Water Scour below Underwater Pipelines under Steady Flow," J., Hydraulic Eng., Vol. 134, No. 5, 588-600, 2008.
- [11] Meneghini, J.R., Saltara, F., "Numerical Simulation Of Flow Interference Between Two Circular Cylinders In Tandem And Side-by-Side Arrangements," Journal of Fluids and Structures, 15, 327-350, 2001.