

مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر نصب اسپویلر و پیگبیک‌لاین در لوله‌های موازی مستغرق قرار گرفته در بستر فرسایشی تحت جریان یک‌طرفه

مجتبی دامرودی (دکتری)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، اصفهان

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

سیدحسن رجایی (استادیار)

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، مشهد، استان خراسان رضوی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۱/۲، ص. ۱۳-۳، (پژوهشی)

استفاده از اسپویلر و پیگبیک‌لاین بر روی لوله، تأثیر بسزایی در کاهش عمق آبستستگی دارد. از این رو، در پژوهش حاضر تأثیر موقعیت قرارگیری اسپویلر و پیگبیک‌لاین و هندسه‌ی آنها و همچنین فاصله‌ی بین لوله‌های مستغرق موازی بر عمق آبستستگی زیر لوله‌ها به صورت آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج نشان داده است که تغییرات گودال آبستستگی، تابعی از فاصله‌ی قرارگیری لوله‌ها، زاویه‌ی قرارگیری اسپویلر یا پیگبیک‌لاین و همچنین موقعیت آنها بر روی لوله است. در حالی که شکل مقطع پس از نصب، تأثیر قابل توجهی در گودال آبستستگی ندارد. بیشترین مقادیر آبستستگی در زیر هر دو لوله با افزایش فاصله‌ی لوله‌ها از یکدیگر و قرارگیری اسپویلر و پیگبیک‌لاین در زوایای 18° و 135° درجه رخ داده است. این موضوع در حالی است که با کاهش فاصله‌ی لوله‌ها از هم، کمترین مقادیر آبستستگی در زوایای 9° و 27° درجه اتفاق افتاده است، که می‌تواند به عنوان سازه‌ی حفاظتی بررسی شود.

mojtaba.damroudi@yahoo.com
esmaili@um.ac.ir
shrajaie@yahoo.com

واژگان کلیدی: آبستستگی، لوله‌ی موازی، اسپویلر، پیگبیک‌لاین، لوله‌ی مستغرق.

۱. مقدمه

همچنین شسته شدن رسوب‌های زیر لوله است که به سمت پایین حرکت خواهد کرد.

معلق شدن لوله^۲ به حالتی اطلاق می‌شود که در اثر فرسایش، زیر لوله خالی شود و لوله در حالت معلق به دلیل گیردار بودن طرفین باقی بماند.^[۱] در این حالت، تونلی در زیر لوله تشکیل می‌شود و جت جریان آب از ناحیه‌ی زیر لوله با سرعت عبور می‌کند. از این رو، در صورتی که فرایند آبستستگی زیر لوله تسریع شود، می‌تواند از پدیده‌ی خوددغنی به عنوان گزینه‌ی ارزان به جای حفر مکانیکی ترانسه استفاده کرد. یکی از روش‌های تسریع در فرایند آبستستگی، استفاده از باله یا همان اسپویلر است. باله، صفحه‌ی است که بر روی خط لوله نصب می‌شود. همچنین امروزه برای عبور کابل‌های برق و مخابرات از طریق دریا از یک خط لوله با قطر کمتر بر روی لوله‌ی اصلی به نام پیگبیک‌لاین استفاده می‌شود که می‌تواند جریان اطراف لوله را تحت تأثیر قرار دهد. در پژوهش حاضر، تأثیر موقعیت قرارگیری اسپویلر و پیگبیک‌لاین و هندسه‌ی آنها و همچنین فاصله بین لوله‌های مستغرق موازی در عمق آبستستگی زیر لوله‌ها به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آبستستگی

عبور خطوط لوله از روی بستر فرسایشی دریا و رودخانه، تغییراتی در الگوی جریان اطراف خطوط لوله ایجاد می‌کند. زمانی که لوله‌های انتقال مستقیماً بر روی بستر فرسایش‌پذیر قرار می‌گیرند، در صورت قوی بودن جریان‌های دریایی، با برقراری جریان نشستی در بستر لوله و حرکت دانه‌های رسوب، پدیده‌ی آبستستگی آغاز می‌شود. پدیده‌ی آبستستگی ناشی از گرادبان فشار ایجاد شده بین بالادست و پایین‌دست لوله است.^[۱] آبستستگی زیر لوله، باعث معلق شدن لوله می‌شود که خطر خمیدگی لوله و شکستن آن را به دنبال دارد و می‌تواند باعث بروز خسارت‌های عمده‌ی زیست‌محیطی و مالی شود. لوله‌ی که در بستر فرسایشی قرار گرفته است، به علت آبستستگی موضعی می‌تواند دچار خوددغنی^۱ شود. پدیده‌ی را خوددغنی گویند که طی آن با آبستستگی بستر، لوله به تدریج درون آن فرو می‌رود و رسوب‌ها روی لوله را می‌پوشانند؛ این امر به دلیل نبود تکیه‌گاه لوله در بستر رسوبی، وزن لوله و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۳/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۰/۹/۲۸، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

DOI:10.24200/J30.2022.58192.2963

در اطراف خطوط لوله‌ی انتقال در مراحل مختلفی ایجاد می‌شود. در اثر قرارگیری لوله بر روی بستر رسوبی و برخورد جریان و موج و یا اثر توأم، اندرکنشی بین خط لوله و بستر فرسایش‌پذیر به‌وجود می‌آید و باعث ایجاد تغییراتی در شرایط و الگوی جریان و برهم خوردن تعادل انتقال رسوب بستر در زیر لوله می‌شود. همچنین، پدیده‌هایی نظیر: انقباض جریان، شکل‌گیری گردابه‌های نعل‌اسبی در جلوی سازه، شکل‌گیری گردابه‌های چرخشی در پشت سازه و نیز تولید آشفستگی را به همراه خواهد داشت. [۵-۳]

فرایند آشفستگی زیر خطوط لوله‌ی مستغرق، روندی پیچیده دارد که به شرایط هیدرولیکی، ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی بستگی دارد، تغییر و شکست ساختار الگوی جریان توسط آشفستگی در زیر خطوط لوله در موارد شدید از جریان‌های ناپایدار و تعامل با شرایط در حال تغییر کانال رخ می‌دهد. [۶] بایکر و لیووستاین^۳ (۱۹۸۴)، بیان کرده‌اند که مکانیسم آشفستگی زیر خطوط لوله، در سه مرحله‌ی فرسایش اصلی اتفاق می‌افتد. فرسایش اصلی به فرسایش زیر خطوط لوله اطلاق می‌شود و فرسایش‌های پایین‌دست لوله و بعد از پشته‌ی آشفستگی را شامل نمی‌شود. آشفستگی ابتدا در یک مقطع از لوله به‌صورت موضعی ایجاد و به تدریج در جهت محور طولی لوله گسترش می‌یابد، پس از ایجاد فاصله‌ی بسیار اندک بین لوله و بستر فرسایش‌پذیر، سیال با سرعت زیادی از درون حفره‌ی ایجاد شده عبور می‌کند و موجب افزایش تنش برشی در زیر لوله می‌شود. [۷]

هولسبرگن و بایکر^۴ (۱۹۸۴)، در مطالعات خود بیان داشتند که نصب باله در بالای لوله‌های واقع بر بستر رسوبی، روند خوددلفنی را تسریع می‌کند. این میزان از خوددلفنی، ۲ تا ۳ برابر قطر لوله گزارش شده است. همچنین در پژوهش اخیر، بروفیل‌های سطح رسوب‌ها در پایین‌دست خطوط لوله بررسی شده است. با در نظر گرفتن ارتفاع موج رسوبی در پایین‌دست خطوط لوله، میزان عمق ترانشه برای جلوگیری از قرار گرفتن لوله در حادث شدن فرسایش محاسبه شده است. این میزان به عنوان پارامتری از عمق جریان، میزان ارتفاع موج رسوبی پایین‌دست و ارتفاع باله معرفی شده است. [۸-۱۰] هانسن^۵ و همکاران (۱۹۸۶)، بیان داشتند که اگر لوله در ابتدا کمی زیر بستر قرار داده شود، توسعه‌ی چاله‌ی آشفستگی آهسته‌تر و بر حسب مقدار جایگذاری زیر بستر ممکن است که توسعه‌ی چاله‌ی آشفستگی متوقف شود. [۱۱] وستهورتمن^۶ و همکاران (۱۹۹۲)، الگوی آشفستگی و پیشینه‌ی عمق آشفستگی زیر لوله‌های موازی را به ازاء فاصله‌ی ۱/۵ برابر قطر لوله‌ی انتقال بررسی کردند و دریافته‌اند لوله‌هایی که فواصل مابین آن‌ها نصف قطر لوله است، عمق آشفستگی پیشینه نسبت به حالتی که فواصل آن‌ها برابر قطر لوله بوده است، حدود ۵ الی ۳۵ درصد کاهش یافته است. [۱۲]

چنگ و چیو^۷ (۲۰۰۳)، میزان تنش برشی در زیر لوله‌ی خطوط انتقال را با استفاده از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافته‌اند که بیشترین میزان تنش برشی در زیر خط لوله با فاصله‌ی ۳ برابر قطر لوله از بستر رسوبی به دست آمده است. همچنین نتایج نهایی پژوهش ایشان نشان داده است که با افزایش فاصله بین لوله و بستر رسوبی، میزان تنش برشی تا ۷۰٪ از حالت آزمایش شاهد (نزدیکی سطح بستر) است. [۱۳] استفاده از مدل‌های عددی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی، از جمله تنش برشی، راهکار مناسبی است. ژائو و وانگ^۸ (۲۰۰۹) با استفاده از مدل عددی، تنش برشی در زیر خطوط لوله‌ی انتقال را در حالت‌های مختلف استفاده از باله در تاج لوله بررسی و ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول باله‌ی نصب شده در تاج لوله، میزان تنش برشی تا ۱۲ برابر برای نسبت طول باله به قطر لوله ۳۷۵/۰ به‌دست خواهد آمد. [۱۴]

در نصب باله بر روی خطوط لوله، نیروهای هیدرولیکی مختلفی تأثیرگذار هستند.

از این رو، بررسی نیروهای هیدرولیکی در مطالعه‌ی عمق آشفستگی اطراف لوله و پارامترهای تأثیرگذار در پدیده‌ی اخیر بسیار حائز اهمیت است. آرنولد^۹ (۲۰۰۷)، نشان داد که یک خط لوله به همراه پیگیک‌لاین و اسپور باعث افزایش نیروی دراگ و کاهش نیروی لیفت در مقایسه با یک خط لوله‌ی ساده خواهد شد که می‌تواند در پایداری لوله مؤثر باشد. [۱۵] ژانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۲)، در بررسی تأثیر موج‌های فعال در سطح بر روی گودال آشفستگی در زیر خطوط لوله دریافته‌اند که گردابه‌افکنی در اطراف پیگیک‌لاین به اثر نسبت دفن اولیه به قطر لوله و فاصله‌ی لوله از بستر رسوبی بستگی دارد و به علت تغییرات پیگیک‌لاین نصب شده بر روی لوله بر توزیع فشار، موج فعال در سطح آب باعث افزایش عمق چاله‌ی آشفستگی می‌شود. [۱۶]

یانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳)، در آزمایش‌های خود نشان دادند که باله‌های سخت، آشفستگی زیر خطوط لوله را تسریع می‌بخشند و توپوگرافی بالادست و پایین‌دست بستر را به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌دهند. اما باله‌های انعطاف‌پذیر، علاوه بر اینکه عمل آشفستگی را سرعت می‌بخشند، اثر باله در توپوگرافی بالادست و پایین‌دست بستر لوله را کم می‌کنند؛ همچنین، عدد فرود سیال و ارتفاع باله را در عمق آشفستگی مؤثر دانستند. [۱۷، ۱۸]

ژنگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل عددی به شبیه‌سازی خطوط لوله در حالت خوددلفنی پرداختند و دریافته‌اند وجود باله بر روی لوله باعث بهم‌ریختگی منحنی توزیع فشار در جلو و پشت لوله و نیز به وجود آمدن گشتاوری پیچشی در مرکز لوله می‌شود که باید این مسئله به خودی خود در طراحی‌ها لحاظ شود. از این رو، با بررسی عددی، گراف‌هایی برای تعیین میزان پیشینه‌ی طول باله در نظر گرفته شد که به ازاء آن، لوله در معرض گشتاور مخرب قرار نخواهد گرفت. همچنین دریافته‌اند که افزایش عدد فرود به افزایش سرعت دفن لوله کمک می‌کند. [۱۹]

ژائو و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل عددی به بررسی آشفستگی دو لوله‌ی موازی بر بستر دریا پرداختند و با استفاده از دو لوله با قطر یکسان با فاصله‌های قرارگیری در محدوده‌ی $G = 0/5D$ تا $G = 5D$ (فاصله‌ی بین خطوط لوله و D قطر لوله‌ها)، مشخص شد پیشینه‌ی عمق آشفستگی در حالت‌های مختلفی، افزایش اندکی نسبت به حالت لوله‌ی منفرد داشته است، اما عمق آشفستگی در پایین‌دست لوله‌ها در حالت دو لوله افزایش قابل توجهی داشته و در حالت $G = 2/5D$ ، بیشترین عمق آشفستگی در پایین‌دست لوله‌ها نسبت به حالت لوله‌ی منفرد به وجود آمده است. [۲۰] هو^{۱۳} و همکاران (۱۹۶۸)، به بررسی عددی و بزرگی‌های هیدروینامیک امواج سونامی اطراف خط لوله‌ی مستغرق منفرد و موازی پرداختند و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پیشینه‌ی نیروهای هیدروینامیکی موج سونامی، بیشتر از موج منفرد بوده است. نیروهای هیدروینامیکی موج سونامی اطراف خط لوله، با افزایش ارتفاع موج افزایش یافته‌اند، اما با کاهش عمق آب، کاهش پیدا کرده‌اند. [۲۱]

دامرودی^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی تأثیر نصب باله و پیگیک‌لاین در خطوط لوله‌ی منفرد در دو حالت آشفستگی و دفن شده پرداختند و شکل هندسی مختلف باله و پیگیک‌لاین‌ها را با طول و ارتفاع مختلف ارزیابی کردند و دریافته‌اند در صورت نصب شکل باله‌ی مستطیلی، بیشترین خوددلفنی اتفاق می‌افتد. همچنین در نوع پیگیک‌لاین دایره‌یی، تأثیر آن به کمینه‌ی میزان خود به ازاء زاویه‌های مختلف نصب باله خواهد رسید. بررسی‌های دوبعدی شبیه‌سازی شده‌ی سرعت در اطراف باله نیز نشان داده است که علت تغییرات ذکر شده، بهم‌ریختگی منحنی توزیع فشار در جلو و پشت لوله‌ی انتقال بوده است. [۲۲]

یانگ و همکاران (۲۰۱۹)، در بررسی تأثیر به کارگیری پیگیک‌لاین در اطراف خطوط لوله‌ی در معرض آشفستگی، از جریان غیر یکنواخت با طول موج‌های مختلف

مطابق رابطه ی ۳ باید در نظر داشت که در مسئله ی گودال آبخستگی، جریان آب به صورت آشفته است و از آثار لزجت سیال، می توان صرف نظر کرد. در این صورت پارامتر لزجت دینامیک سیال از رابطه ی ۳ حذف می شود و با در نظر گرفتن سرعت جریان، عمق آب، و شتاب گرانش زمین به عنوان پارامترهای تکرار شونده، می توان رابطه ی ۴ را نوشت:

$$\frac{d_{st}}{D} = f\left(\frac{V}{\sqrt{gh}}\right) \quad (4)$$

رابطه ی اخیر نشان می دهد که نیروی وزن (عدد فرود) تأثیر مستقیمی در روند آبخستگی در شسته شدن رسوب ها در زیر خطوط لوله دارد. بنابراین با توجه به تمامی پارامترهای بدون بعد باقی مانده برای عمق نسبی آبخستگی می توان رابطه ی ۵ را نوشت:

$$\frac{d_{st}}{D} = f\left(\frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{h}{L}, \frac{D}{L}, \theta\right) \quad (5)$$

به دلیل تغییرات کم عدد فرود در مطالعه ی حاضر می توان از اثر آن چشم پوشی کرد. در نهایت با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی در نرم افزار Mathematical، می توان رابطه ی تجربی ۶ را که بر پایه ی اعداد بی بعد است، ارائه کرد:

$$\frac{d_{st}}{D} = C_1 \left[\frac{h}{L}\right]^{C_2} \left[\frac{D}{L}\right]^{C_3} [\theta]^{C_4} + C_5 \quad (6)$$

با توجه به اینکه آزمایش های پژوهش حاضر در شرایط آشفته انجام شده است، می توان از آثار عدد رینولدز نیز چشم پوشی کرد.

۳. تجهیزات آزمایشگاهی

فلوم آزمایشگاهی: کلیه ی آزمایش ها در فلوم مستطیلی فلزی - شیشه یی آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی به طول ۱۱ متر و عرض ۵۰ سانتی متر مطابق شکل ۱ انجام شده است. جریان ورودی فلوم به وسیله ی پمپ از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه تأمین شده است. اندازه گیری دبی جریان توسط یک سرریز لبه تیز مثلثی قرار گرفته در انتهای فلوم که واسنجی شده است، صورت گرفته است. عمق پایاب توسط یک دریچه ی قابل تنظیم در پایین دست طوری تنظیم شده که شرایط استغراق برقرار شود. عمق جریان به وسیله ی یک عمق سنج با دقت ۱/۰ میلی متر که در بالای فلوم نصب شده بود، قرائت شده است. همچنین از کف کاذب به ارتفاع ۱۰ سانتی متر در ابتدا و انتهای فلوم، استفاده شده است. کف کانال به جز در محدوده ی ۲ متری که از رسوب ها پر شده و مدل خطوط لوله در آن نصب شده است، برای ایجاد جریان یکنواخت در قسمت ابتدایی کف کاذب با استفاده از ذرات ماسه پوشانده شد، تا جریان یکنواخت در ابتدای بستر شنی ایجاد شود. همچنین یک حوضچه در انتهای سکوی سیمانی برای تله اندازی ذرات شسته شده تعبیه شده است. آزمایش های مقدماتی عمق مناسب رسوب را حدود ۹ سانتی متر نشان دادند، که جهت اطمینان برابر ۱۰ سانتی متر (معادل ارتفاع کف کاذب) در نظر گرفته شد.

۴. مدل آزمایشگاهی خطوط لوله

در شکل ۲، وضعیت قرارگیری خطوط لوله در کانال آزمایشگاهی همراه با پارامترهای در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر و نیز وضعیت قرارگیری محور مختصات مشخص

در سطح استفاده کردند و دریافتند که در همه ی موارد، اضافه کردن پیگیبک لاین در اطراف لوله ی در حال آبخسته شدن، میزان عمق آبخستگی نسبت به لوله ی بدون پیگیبک لاین، مقادیر بیشتری را به وجود آورده است. همچنین در ادامه، عدد بی بعد گلاگان را معرفی کردند و با مقایسه ی نتایج دریافتند که به ازاء افزایش فاصله ی پیگیبک لاین و فاصله ی بین لوله و بستر رسوبی، مقادیر عددی بی بعد تعریف شده کاهش پیدا کرده است که این امر نشان دهنده ی کاهش عمق آبخستگی است. [۲۳] توفانی و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از مدل عددی کالیبره شده توسط داده های آزمایشگاهی، به بررسی روند آبخستگی در اطراف خطوط لوله با استفاده از روش عددی پرداختند که در آن با وارد کردن مرزهای هیدرولیکی ورودی و خروجی جریان در ابتدا و انتهای لوله ی موازی، روش مورد نظر با حل عددی رابطه ی جریان و درون یابی ابعاد گودال آبخستگی با زمان تخمین زده شد. در نهایت نتایج به دست آمده از روش عددی، با روش آزمایشگاهی مقایسه و منابع خطای روش اخیر، تجزیه و تحلیل شد. همچنین در مورد اثر لرزش های لوله در روند آبخستگی بحث شد. در نهایت آثار وضعیت ذکر شده به صورت پارامتری در پایه ی مفهوم تکانه به روش عددی اضافه شد. [۲۴] بررسی مطالعات پیشین نشان داد که استفاده از اسپویلر و پیگیبک لاین تاکنون بر روی لوله های موازی گزارش نشده است. لذا، بررسی این امر می تواند راهکارهای مناسبی را برای بررسی وضعیت شسته شدن رسوب ها در زیر خطوط لوله های موازی و جلوگیری از صدمات احتمالی به همراه داشته باشد.

۲. مواد و روش ها

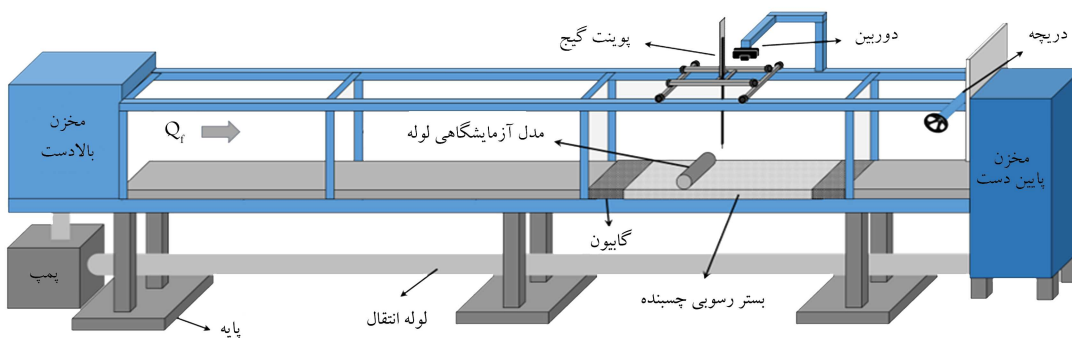
آنالیز ابعادی: پارامترهای مؤثر در آبخستگی موضعی پیرامون خطوط لوله عبارت اند از: خصوصیات جریان، خصوصیات رسوب و هندسه ی لوله. عمق آبخستگی (d_{st}) را می توان به صورت تابعی از پارامترهای مطابق روابط ۱ و ۲ نوشت:

$$d_{st} = f(V, h, B, \mu, d_{50}, L, D, \theta, \rho_s, \rho_w, g) \quad (1)$$

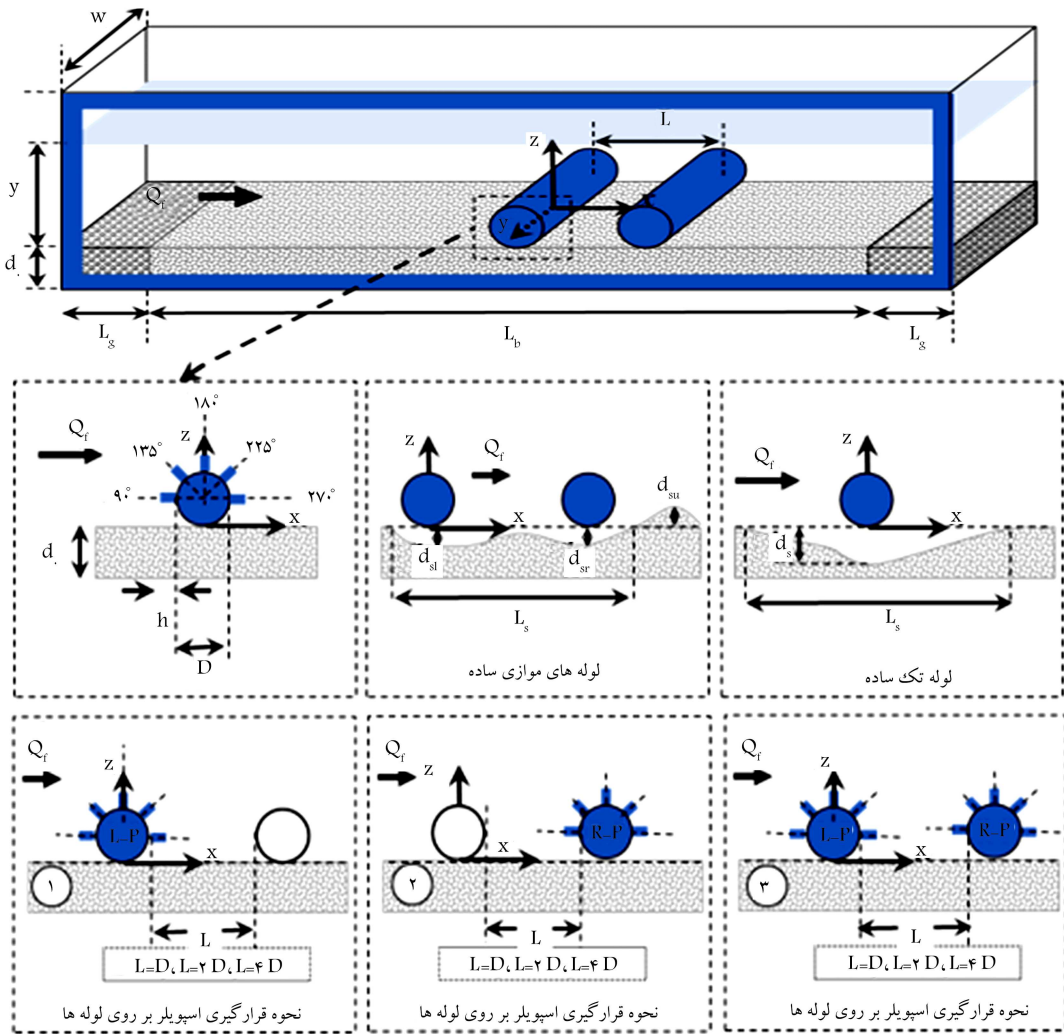
$$d_{st} = \frac{d_{st} + d_{st}}{\psi} \quad (2)$$

که در آن، d_{st} بیشینه ی عمق آبخستگی، ρ چگالی آب، ρ_s چگالی رسوب ها، g شتاب گرانش زمین، V سرعت سیال، θ زاویه ی نصب اسپویلر و پیگیبک لاین بر روی لوله، d_{50} متوسط قطر رسوب ها، D قطر لوله، B عرض کانال، h ارتفاع آب، μ لزجت دینامیک سیال و L طول آبخستگی در کانال هستند. باید در نظر داشت که عمق متوسط آبخستگی در زیر خطوط لوله های موازی، تابعی از عمق آبخستگی یک به یک لوله هاست. از این رو، می توان عمق آبخستگی را به صورت متوسط عمق آبخستگی در زیر خطوط لوله با توجه به رابطه ی ۲ نمایش داد. باید در نظر داشت که آبخستگی در بستر رسوبی ماسه یی در نظر گرفته شده است. از این رو می توان از تأثیر وزن مخصوص رسوب ها و همچنین اندازه ی متوسط ذرات صرف نظر کرد. همچنین به دلیل دوبردی در نظر گرفتن آزمایش ها، از تأثیر عرض کانال صرف نظر شده است. در ادامه، می توان اعداد بی بعد مؤثر را به صورت رابطه ی ۳ در نظر گرفت. در ادامه، با تقسیم عمق جریان بر قطر لوله و قطر لوله بر طول آبخستگی اعداد بی بعد d_{st}/D و D/L ، h/L ، θ به دست می آیند. در نهایت، اعداد مشارکت کننده در پدیده ی مذکور می توانند به صورت رابطه ی ۳ خلاصه شوند. همچنین زاویه ی اسپویلر به صورت عدد بی بعدی در نظر گرفته شده و به دلیل وجود تأثیر خاصیت سیال در پارامتر لزجت دینامیکی سیال از آثار وزن مخصوص آب نیز صرف نظر شده است.

$$d_{st} = f(V, D, h, \mu, g) \quad (3)$$



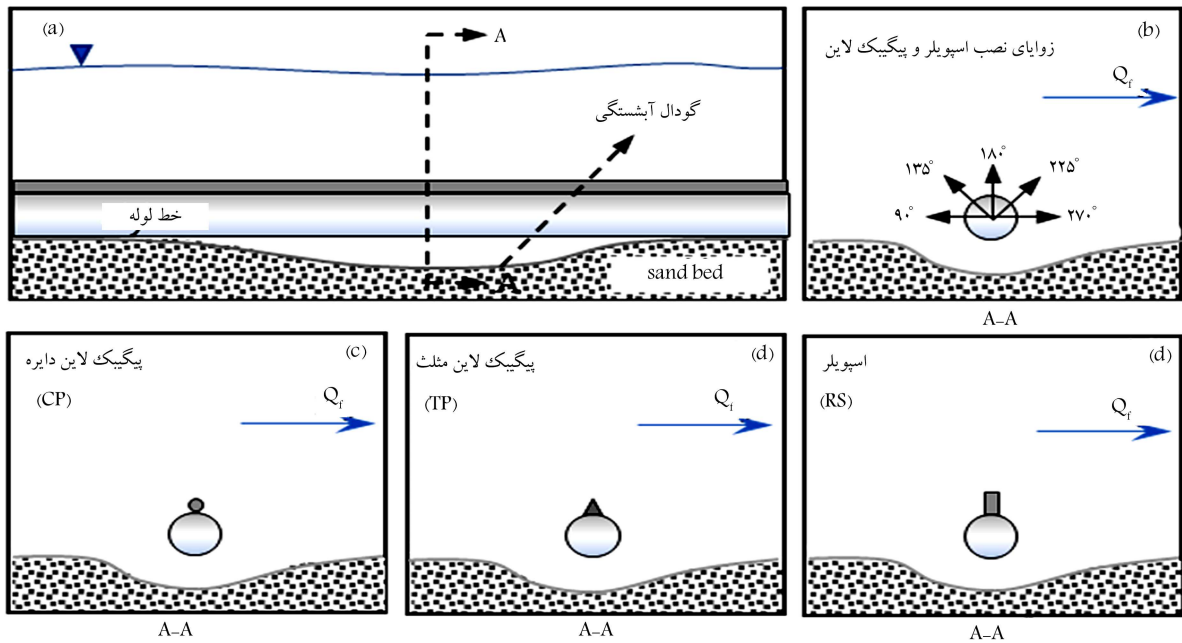
شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات آن.



شکل ۲. مدل آزمایشگاهی لوله های موازی با تکیه گاه ثابت.

شده است. برای آنگیری اولیه ی فلوم، جریان به آرامی برقرار می‌شد تا مانع از به هم خوردن بستر و تشکیل ریبیل در سطح بستر نشود. پس از هر آزمایش برای اندازه‌گیری میزان آبهستگی از یک عمق سنج که در عرض و در طول فلوم به راحتی حرکت می‌کرد، استفاده شده است. در آزمایش‌های مذکور، سرعت متوسط جریان ورودی $(V/V_c = 0/8 - 0/9)$ تنظیم شده است، تا شرایط آبهستگی آب زلال برقرار شده و شدت جریان آزمایش ثابت در نظر گرفته شده است. سرعت بحرانی ورود

شده است. در شکل ۳، وضعیت قرارگیری اسپویلر و پیگیک لاین‌ها بر روی لوله‌ها مشاهده می‌شود. در جدول ۱، نیز مجموعه‌ی آزمایش‌ها به صورت ساده ارائه شده است. لازم به ذکر است ابتدای هر آزمایش برای جلوگیری از آبهستگی ناخواسته در سطح بستر، فلوم از انتهای پایین دست از آب پر و بعد از رسیدن به عمق قابل قبول جریان را ساکن نگه داشته و لوله در نقطه‌ی مورد نظر از ابتدای بستر قرار داده



شکل ۳. وضعیت قرارگرفتن خطوط لوله با اسپویلر و پیگیک لاین های نصب شده.

میلی متر برای دبی بیشینه ۲۸ لیتر بر ثانیه به دست آمد. در نهایت آزمایش های آبستگي با دبی بیشینه انجام پذیرفت. لازم به ذکر است این دبی با استفاده از روش حجمی در انتهای کانال واسنجی شد. همچنین برای اطمینان از صحت مقادیر دبی از سرریز مثلثی تعبیه شده در انتهای کانال نیز استفاده شده است. شایان ذکر است، برای تخمین مقدار سرعت برشی بحرانی از رابطه‌ی ارائه شده توسط ملویل^[۲۶] استفاده شده است (رابطه ی ۸).

$$V_C^* = 0.115 + 0.125d_{50}^{1/4} \quad (8)$$

برای جلوگیری از تشکیل فرم بستر (ریپل)، اندازه‌ی متوسط ذرات رسوبی باید بزرگتر از 0.7 میلی متر باشد ($d_{50} > 0.7 \text{ mm}$)^[۲۶]، در مطالعه‌ی حاضر از یک نوع دانه بندی با اندازه‌ی متوسط ذرات رسوبی 0.79 میلی متر استفاده شده است. در بخش حاضر، در جدول ۱، آزمایش های مدل خطوط لوله‌ی موازی ارائه شده‌اند. همچنین در شکل ۴، تعدادی از آزمایش های انجام شده در فلوم آزمایشگاهی مشاهده می شود. در زمان انجام آزمایش ها به ازاء افزایش فاصله‌ی طولی بین خطوط لوله‌ی پروفیل آبستگي با استفاده از پوینت گیج و همچنین عکس برداری استخراج شده است. پروفیل گودال آبستگي به روش پردازش تصاویر انجام شده است که ابتدا دوربینی در زمان آبستگي نهایی، تصویری از نمای کناری فلوم آزمایشگاهی تهیه می کرد. با قرار دادن مترهای اندازه گیری شده در کادر عکس مذکور بر روی شیشه‌ی فلوم آزمایشگاهی به سادگی می توان مقیاس تصاویر تهیه شده را حفظ کرد. در مرحله‌ی بعد، با فراخوانی تصاویر اخیر در نرم افزار پلات دیجیتالی و در نظر گرفتن مبدأ مختصات از پیش تعیین شده و حفظ مقیاس، گودال آبستگي را به راحتی و براساس نقاط تعریف شده در نرم افزار با دقت 0.1 میلی متر برداشت کرد. در مجموع سه فاصله بین لوله‌ها با هدف پوشش دادن محدوده‌ی وسیعی از فاصله‌ی دو لوله براساس قطر در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی بین دو لوله نباید بیش از حدی باشد که لوله‌ها نقش لوله‌ی انفرادی را ایفا کنند.

S-P نماینده‌ی لوله‌ی تک است و منظور از I-P و R-P به ترتیب اسپویلر

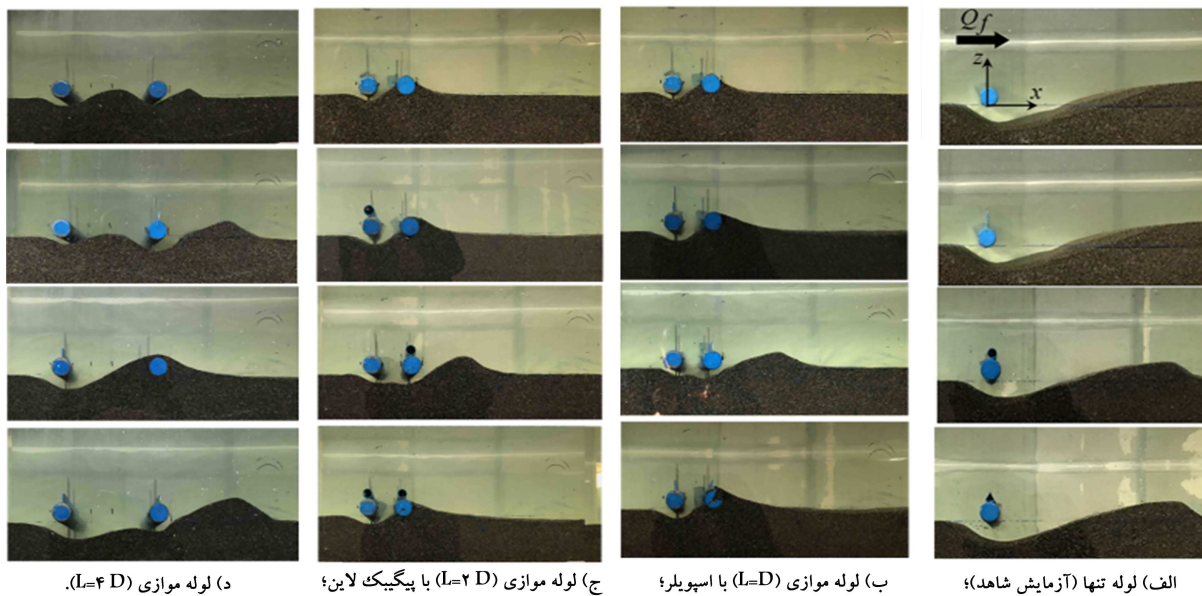
جدول ۱. مجموعه آزمایش های تحقیق.

فاصله‌ی لوله	نوع زائده	زاویه‌ی قرارگرفتن زائده روی لوله (Θ)
لوله‌ی تک	اسپویلر پیگیک لاین	۹۰
لوله‌ی تک	اسپویلر پیگیک لاین	۱۳۵
لوله‌ی تک	اسپویلر پیگیک لاین	۱۸۰
لوله‌ی تک	اسپویلر پیگیک لاین	۲۷۰
۱D		۹۰
۲D		۱۳۵
۳D	اسپویلر	۱۸۰
۴D		۲۷۰
۱D		۹۰
۲D	پیگیک لاین	۱۳۵
۳D		۱۸۰
۴D		۲۷۰

(V_C) توسط رابطه‌ی لگاریتمی ۷ به دست می آید که براساس آن می توان عمق و دبی جریان را برای ایجاد شرایط آستانه‌ی حرکت در هنگام انجام آزمایش تعیین کرد، که با مشاهده‌ی چشمی نیز قابل کنترل است.

$$\frac{V_C}{V_C^*} = 0.75 \text{Log} \left(0.53 \frac{h}{d_{50}} \right) \quad (9)$$

با توجه به نظر ملویل^{۱۵} آستانه‌ی حرکت ذرات به زمانی اطلاق می شود که ذرات بستر رسوبی سه حرکت جهش، خیزش و پرش ناگهانی را داشته باشند.^[۲۵] از این رو به ازاء سرعت بحرانی ایجاد شده در کانال، بیشینه‌ی ارتفاع آب برابر با 2.1



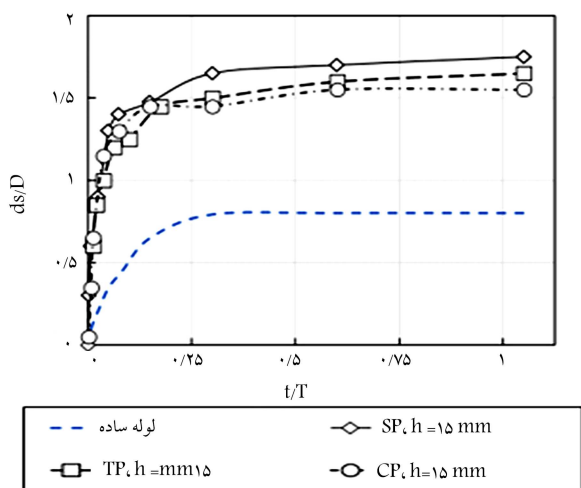
شکل ۴. آزمایش‌های لوله‌های موازی با نکیه‌گاه ثابت.

یا پیگیبک‌لاین نصب شده بر روی لوله‌ی سمت بالادست یا پایین‌دست با توجه به شکل ۲ ب است. به همین منظور لوله با هر دو علامت اختصاری $L=P$ و $R=P$ بدین معناست که اسپویلر یا پیگیبک‌لاین بر روی هر دو لوله نصب شده است. لازم به ذکر است به ازاء آزمایش‌های مذکور، پروفیل آبشستگی در زمان تعادل (زمان ۴ ساعت) با روش‌های اشاره شده برداشت شده است. برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوب‌ها در آبشستگی موضعی، باید انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی حدود $1/4$ در نظر گرفته شود.^[۲۶] انحراف معیار هندسی ذرات در پژوهش حاضر $1/2$ به دست آمده است که خود نشان‌دهنده‌ی یکنواختی ذرات است.

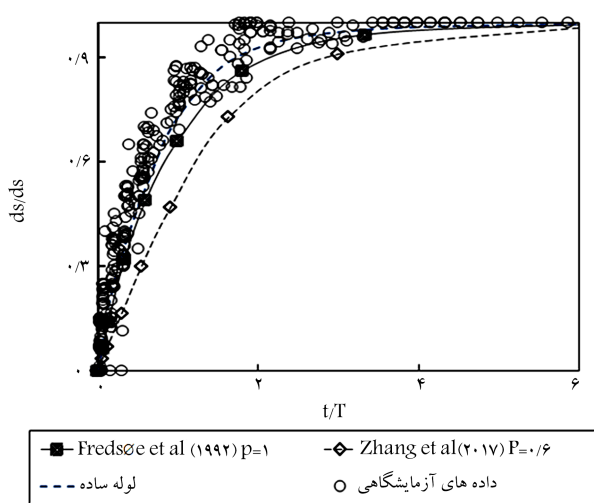
۵. نتایج و بحث

به جهت بررسی زمان تعادل آبشستگی لوله، ۴ آزمایش مقدماتی انجام شده است که در آن‌ها، ابتدا آبشستگی زیر لوله‌ی ساده بررسی شد. سپس با نصب اسپویلر و پیگیبک‌لاین دایره‌یی و مثلثی با ارتفاع $1/5$ سانتی‌متری و با زاویه‌ی 180° درجه، آزمایش‌ها ادامه یافت. برای به دست آوردن زمان تعادل دینامیکی بستر و خاتمه‌ی هر آزمایش، تغییرات آبشستگی در محدوده‌ی خط لوله در مدت $T_b = 8hr$ ساعت ثبت شد. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که لوله‌ی ساده به مراتب در زمان زودتری نسبت به حالتی که اسپویلر بر روی لوله نصب شده است، به تعادل خواهد رسید. پیش‌بینی این امر به دلیل وجود جریان‌های آشفته‌ی تشکیل شده توسط اسپویلر و پیگیبک‌لاین‌ها در پشت خطوط لوله‌ی موازی است که به خودی خود باعث بالا رفتن اغتشاش جریان در پشت لوله‌ها می‌شود و در نهایت تغییرات در پشت خطوط لوله را محسوس‌تر نشان می‌دهد. همچنین مطابق با معیار اتما (1980)، با توجه به اینکه تغییرات بستر آبشستگی زیر لوله بعد از ۴ ساعت ثابت شده است، به عنوان زمان آزمایش‌ها تعیین شد.^[۲۷]

برای اطمینان از رسیدن به حالت تعادل و همچنین صحت‌سنجی داده‌ها، زمان به تعادل رسیدن داده‌های آزمایشگاهی با برخی مطالعات پیشین مقایسه و ارزیابی شده است. مقایسه‌های انجام شده در شکل ۶ به ازاء آزمایش‌های صورت گرفته



شکل ۵. منحنی بی بعد عمق آبشستگی.



شکل ۶. مقایسه‌ی زمان تعادل گودال آبشستگی با برخی مطالعات پیشین.^{[۱۱] (۲۷-۲۹)}

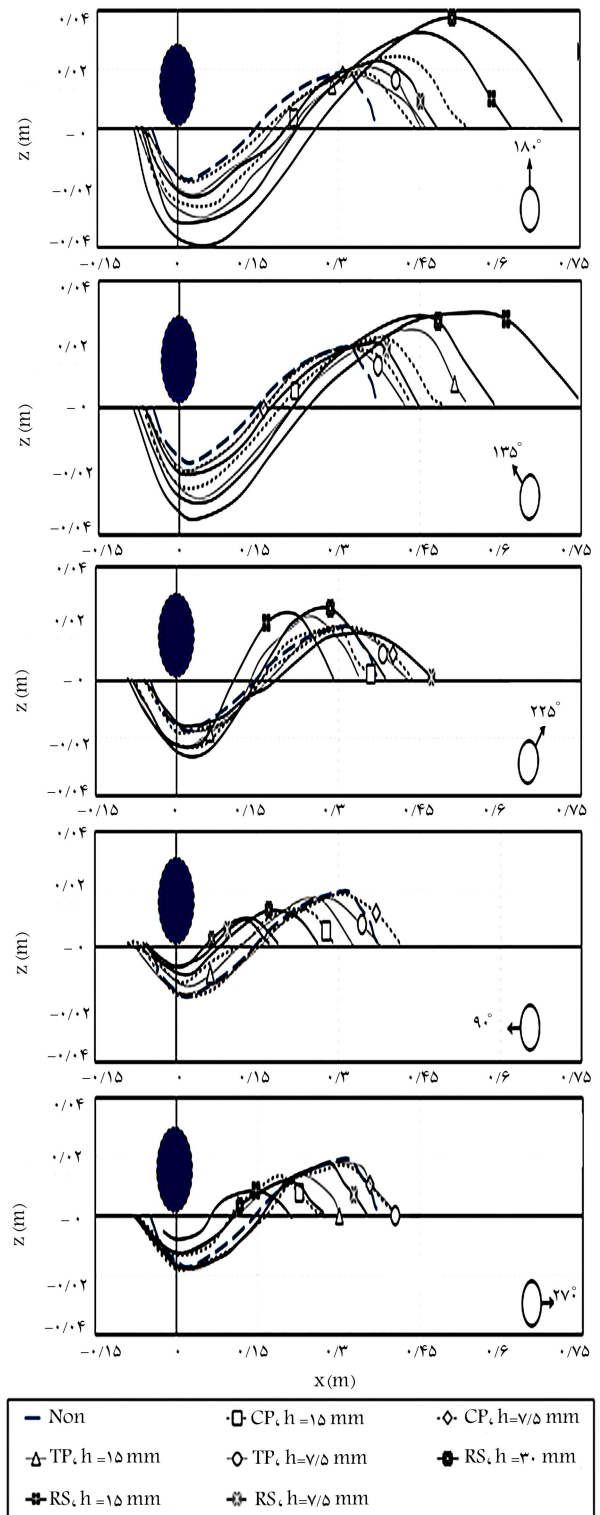
الف) نتایج حاصل از آبستگي لوله‌های موازی: در بخش حاضر، نتایج حاصل از پروفیل آبستگي در لوله‌های موازی ارائه شده است. نتایج با توجه به فاصله‌ی قرار گرفتن لوله‌ها از یکدیگر در سه حالت با فاصله‌ی: ۱ قطر لوله، ۲ قطر لوله، و ۴ قطر لوله ارائه شده است. در شکل ۸، نیز نتایج پروفیل‌های آبستگي مشاهده می‌شود.

بحث در رابطه با حجم آبستگي، نیازمند بررسی سه‌بعدی جریان است. با فرض یکنواخت بودن و دوبعدی بودن جریان، نتایج دوبعدی می‌تواند برای حالت سه‌بعدی نیز در نظر گرفته شوند. با توجه به بالا بودن عرض کانال آزمایشگاهی، که در حدود ۵۰ سانتی‌متر است، فرض دوبعدی بودن جریان می‌تواند درست باشد. از این رو، می‌توان انتظار داشت با در نظر گرفتن سطح آبستگي و ضرب آن در عرض کانال، روند مقایسه‌ها چه در فضای دوبعدی و چه سه‌بعدی تقریباً یکسان باشد.

- آبستگي لوله‌های موازی با فاصله‌ی یک قطر ($L = D$): با توجه به شکل (۸الف)، نتایج لوله‌ی ساده نشان داد که با شروع آزمایش، پدیده‌ی رگاب و آبستگي فقط در زیر لوله‌ی L-P اتفاق افتاده است. با نصب اسپویر و پیگیبک‌لاین بر روی لوله‌ی ۱، در زاویه‌ی 18° درجه‌ی آبستگي در زیر لوله‌ی L-P، حدود 60% و در زاویه‌ی 135° درجه، حدود 45% نسبت به لوله‌ی ساده افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که با قرار گرفتن اسپویر یا پیگیبک‌لاین بر روی هر دو لوله، آبستگي زیر لوله‌ی L-P در زوایای 18° و 135° درجه، حدود 30% نسبت به لوله‌ی ساده افزایش پیدا کرده است. به ازاء نصب اسپویر و پیگیبک‌لاین بر روی لوله‌ی R-P، تغییر معناداری بر روی آبستگي زیر لوله‌ها رخ داده است. به طوری که پدیده‌ی رگاب در زیر هر لوله اتفاق افتاده و زیر هر دو لوله، آبسته شده و باعث افزایش حدود 15% عمق آبستگي در زیر لوله‌ی L-P نسبت به لوله‌ی ساده شده است. در زاویه‌ی 225° درجه، آبستگي زیر لوله همانند لوله‌ی ساده بوده و هیچ گزارشی مبنی بر آبستگي لوله‌ی R-P ثبت نشده است. همچنین در زوایای 9° و 27° درجه، به دلیل موقعیت قرار گرفتن اسپویر یا پیگیبک‌لاین مسیر عبور جریان در بین دو لوله مسدود شده و در حالت نصب بر روی هر دو لوله، آبستگي به میزان چشم‌گیری کاهش یافته است.

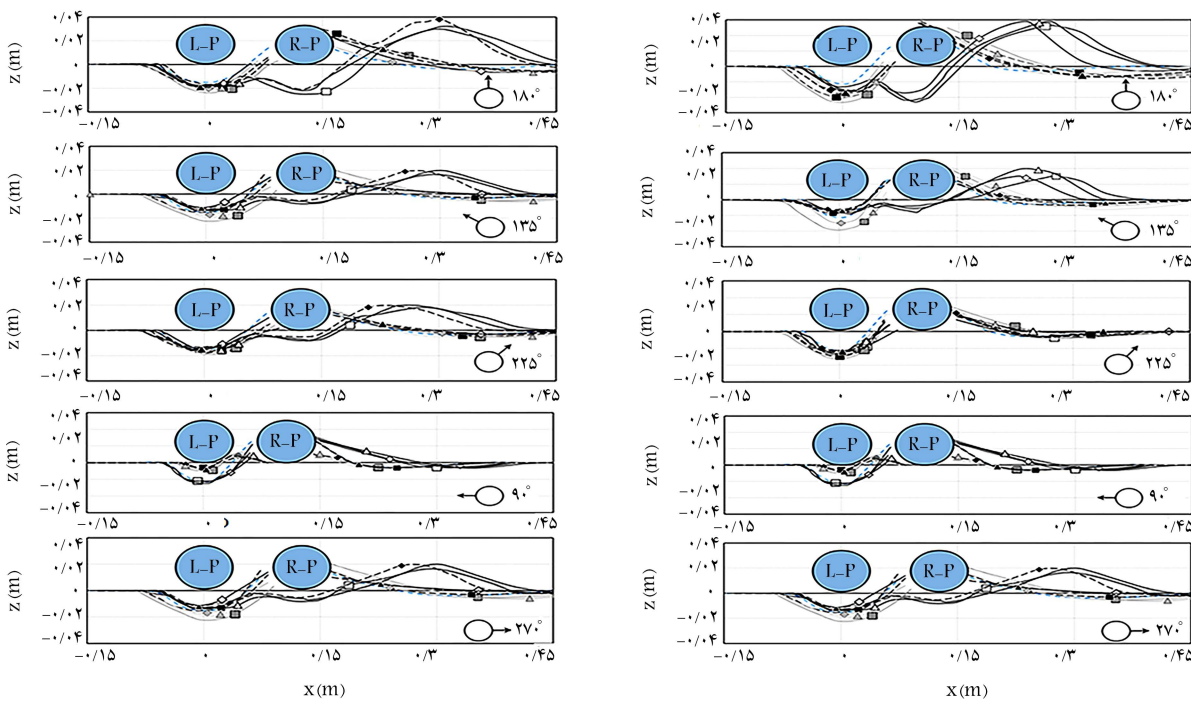
- آبستگي لوله‌های موازی فاصله‌ی ۲ قطر ($L = 2D$): با توجه به شکل (۸ب)، نتایج لوله‌ی ساده نشان می‌دهد که مانند حالت فاصله‌ی لوله‌ی ۱D، پدیده‌ی رگاب و آبستگي فقط در پایین دست لوله‌ی ۱ اتفاق افتاده است، با این تفاوت که ابعاد چاله‌ی آبستگي نسبت به حالت ۱D افزایش یافته است. همچنین به ازاء نصب اسپویر و پیگیبک‌لاین در زوایای مختلف و در موقعیت‌های در نظر گرفته شده، تغییر محسوسی نسبت به حالت ۱D مشاهده نشده و فقط در برخی زوایا، ابعاد چاله‌ی آبستگي اندکی افزایش پیدا کرده است.

- آبستگي لوله‌های موازی فاصله‌ی ۴ قطر ($L = 4D$): با توجه به شکل (۸ج)، با افزایش فاصله‌ی لوله از یکدیگر از ۲D به ۴D، تغییرات معناداری در آبستگي زیر لوله‌ها ایجاد شده است. به طوری که نتایج لوله‌ی ساده نشان می‌دهد، برخلاف فاصله‌های لوله‌ی ۱D و ۲D، پدیده‌ی رگاب و آبستگي در زیر هر دو لوله اتفاق افتاده است. همچنین ابعاد چاله‌ی زیر لوله‌ها نسبت به حالت ۱D افزایش یافته است. به دلیل ته‌نشین شدن رسوب‌های شسته شده از زیر لوله‌ی L-P در بالادست لوله‌ی R-P، یک پشته‌ی رسوبی در بین دو لوله ایجاد شده است که باعث انحراف جریان و کاهش آبستگي در زیر لوله‌ی دوم شده است. با



شکل ۷. نتایج آبستگي لوله‌ی ساده.

بر روی تک لوله مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است در شکل ۷، نتایج آبستگي لوله‌ی تک مشاهده می‌شود. مقایسه‌ها بین داده‌های زمان تعادل آزمایشگاهی و برخی مطالعات پیشین، بیانگر این مطلب است که آزمایش‌ها در زمان قابل قبولی به تعادل گودال آبستگي رسیده‌اند. در شکل ۶، زمان t ، مقیاس زمانی آبستگي و d_{se} عمق نهایی و در تعادل آبستگي هستند.

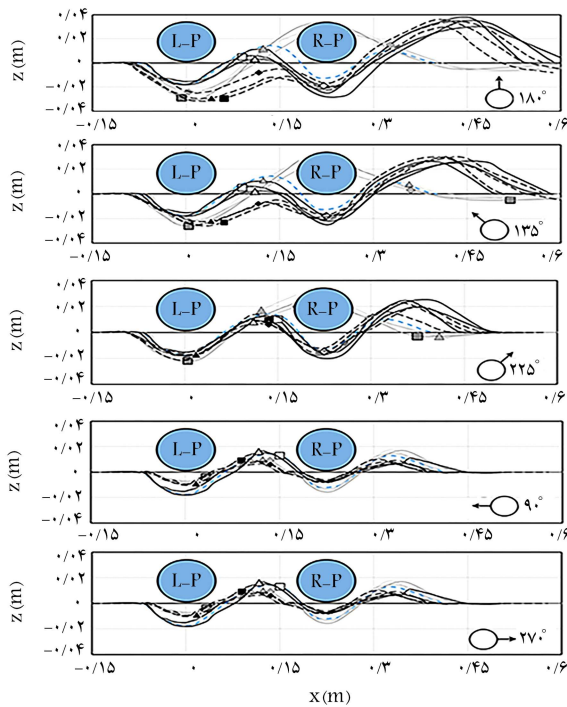


--- Non, $L=\gamma D$	□- R-P, RS, $L=\gamma D$
■- L-P, RS, $L=\gamma D$	■- L-P & R-P, RS, $L=\gamma D$
◇- R-P, CP, $L=\gamma D$	◇- L-P, CP, $L=\gamma D$
◆- R-P & L-P, CP, $L=\gamma D$	△- R-P, TP, $L=\gamma D$
△- L-P, TP, $L=\gamma D$	▲- L-P & R-P, TP, $L=\gamma D$

--- Non, $L=D$	□- R-P, RS, $L=D$
■- L-P, RS, $L=D$	■- L-P & R-P, RS, $L=D$
◇- R-P, CP, $L=D$	◇- L-P, CP, $L=D$
◆- R-P & L-P, CP, $L=D$	△- R-P, TP, $L=D$
△- L-P, TP, $L=D$	▲- L-P & R-P, TP, $L=D$

(ب) لوله‌ی موازی با فاصله دوبرابر قطر؛

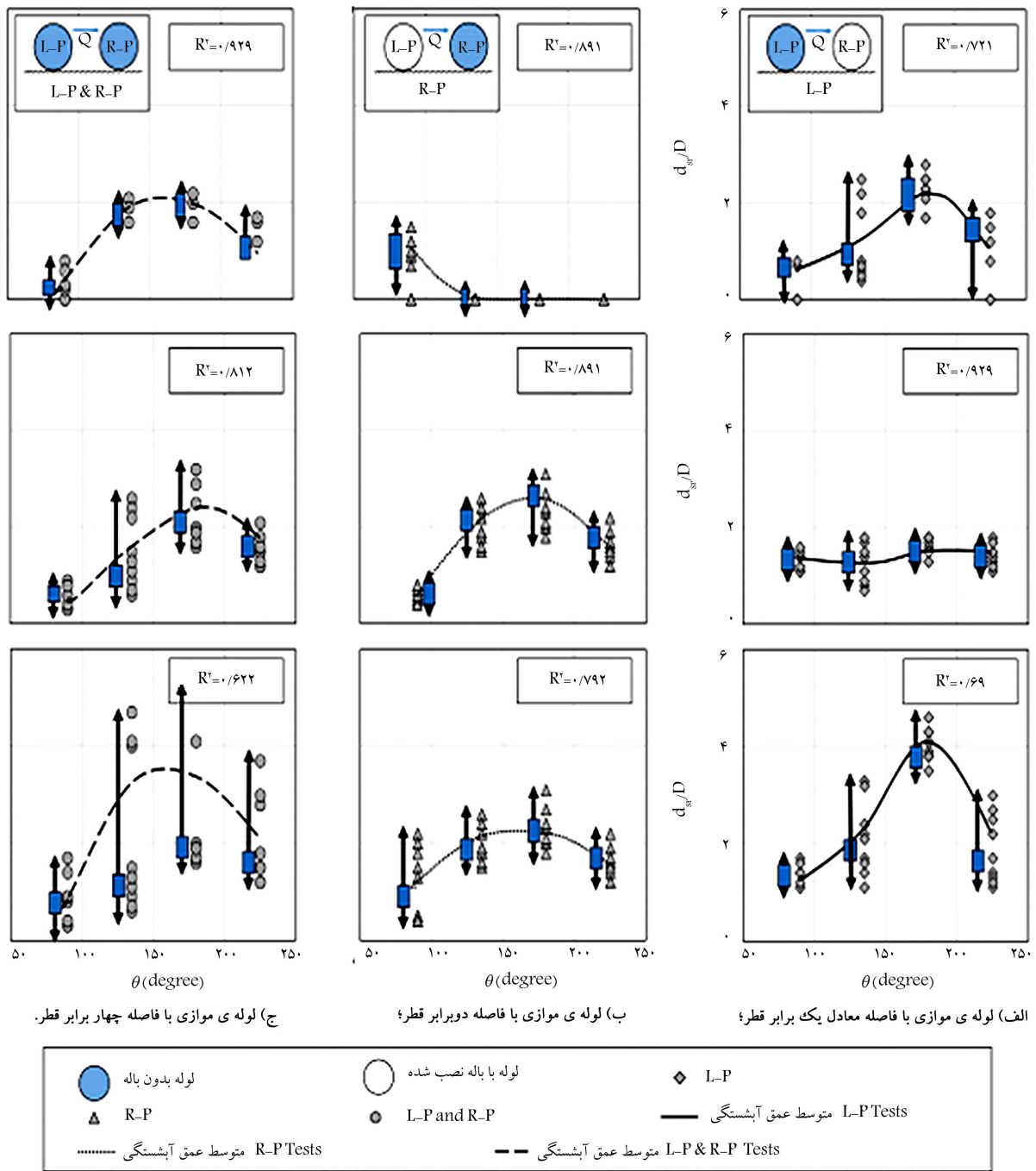
(الف) لوله‌ی موازی با فاصله معادل یک برابر قطر؛



--- Non, $G=\frac{1}{4} D$	□- R-P, RS, $G=\frac{1}{4} D$
■- L-P, RS, $G=\frac{1}{4} D$	■- L-P & R-P, RS, $G=\frac{1}{4} D$
◇- R-P, CP, $G=\frac{1}{4} D$	◇- L-P, CP, $G=\frac{1}{4} D$
◆- R-P & L-P, CP, $G=\frac{1}{4} D$	△- R-P, TP, $G=\frac{1}{4} D$
△- L-P, TP, $G=\frac{1}{4} D$	▲- L-P & R-P, TP, $G=\frac{1}{4} D$

(ج) لوله‌ی موازی با فاصله چهار برابر قطر.

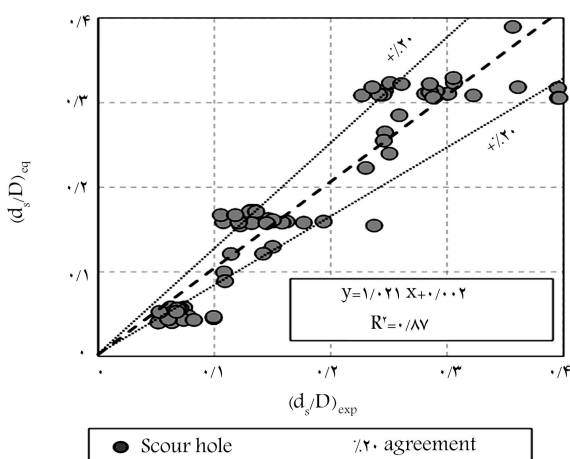
شکل ۸. پروفیل آبشستگی بستر در لوله‌های موازی در شرایط مختلف آزمایشگاهی.



شکل ۹. تأثیر زاویه ی نصب باله در میزان حجم آبهستگی.

لوله ها رخ داده است. چنانچه خوددفعنی لوله ها مدنظر باشد، زوایای ۱۸۰ و ۱۳۵ درجه می توانند گزینه های مناسبی برای بررسی خوددفعنی لوله های موازی در بستر فرسایشی باشند. در زاویه ی ۲۲۵ درجه با قرار گرفتن اسپویلر یا پیگییک لاین بر روی لوله ی L-P، آبهستگی زیر لوله ی R-P مشاهده نشده و عمق بیشینه ی آبهستگی مشابه لوله ی ساده ثبت شده است. همچنین زوایای ۹۰ و ۲۷۰ درجه، اگرچه باعث کاهش میزان آبهستگی نسبت به لوله ی ساده شده اند، اما نسبت به حالت ۱D مقادیر افزایشی نشان داده اند. در حالت کلی می توان از مقایسه ی شکل های ۸ (الف، ب و ج) نتیجه گرفت که روند و الگوی آبهستگی در لوله های

نصب اسپویلر و پیگییک لاین بر روی لوله ی L-P، در زوایای ۱۸۰ و ۱۳۵ درجه، آبهستگی در زیر لوله ی L-P حدود ۷۸٪ نسبت به لوله ی ساده افزایش پیدا کرده و رسوب های شسته شده در پایین دست لوله ی L-P بر روی لوله ی R-P، ته نشین شده اند که این موضوع مانع از آبهستگی در زیر لوله ی R-P شده است. همچنین به ازاء نصب اسپویلر و پیگییک لاین بر روی هر دو لوله، آبهستگی در زیر لوله ی L-P حدود ۷۰٪ و در زیر لوله ی R-P، حدود ۴۰٪ نسبت به لوله ی ساده افزایش پیدا کرده است. با قرار گرفتن اسپویلر یا پیگییک لاین در زوایای مذکور بر روی هر دو لوله ی L-P و R-P، تغییرات معناداری در آبهستگی زیر



شکل ۱۰. میزان خطای ارائه شده برای تخمین عمق آبشستگی لوله‌های موازی در مقایسه با میزان عمق آبشستگی آزمایشگاهی.

پارامتری از دیگر اعداد بی بعد است. از این رو با برازش معادله‌ی بر داده‌های آزمایشگاهی می‌توان رابطه‌ی ۹ را برای تخمین میزان آبشستگی ارائه کرد. لازم به ذکر است در شکل ۱۰، میزان خطای رابطه‌ی اخیر با مقادیر آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

$$\frac{d_{st}}{D} = 2.3 \left[\frac{h}{L} \right]^{0.12} \left[\frac{D}{L} \right]^{0.12} [\sin\theta]^{0.24} - 0.77, \quad R^2 = 0.87 \quad (9)$$

د) **حجم آبشستگی:** در شکل ۱۱، حجم رسوب‌های شسته شده در مقابل زاویه‌ی نصب اسپولر و پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ی بالادست و پایین دست ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با نصب اسپولر مستطیلی در زاویه‌ی ۱۸° درجه، بر روی لوله‌ی پایین دست، میزان آبشستگی به ازاء مدل‌های مختلف اسپولرها و پیگبیک‌لاین‌ها مشابه است. این بدین معناست در صورتی که اسپولرها و پیگبیک‌لاین‌ها فقط بر روی لوله‌ی پایین دست نصب شوند، رفتار مشابهی با حالتی که بر روی هر دو لوله نصب شوند، خواهند داشت. همچنین مقایسه بین درصد حجم آبشستگی بین اسپولر مستطیلی و پیگبیک‌لاین مثلی نشان می‌دهد، درصد آبشستگی اسپولر مستطیلی در کلیه‌ی حالت‌ها بیشتر از آبشستگی دیگر پیگبیک‌لاین‌ها بوده است. نتایج نشان می‌دهد با تغییر اسپولر مثلی به دایره‌یی، حجم آبشستگی به ازاء حالت دایره‌یی تا زاویه‌ی ۱۰۸٪ افزایش پیدا کرده است؛ در حالی که به ازاء تغییر پیگبیک‌لاین مثلی با اسپولر دایره‌یی این میزان تا ۳۰۵٪ هم افزایش خواهد داشت.

۶. نتیجه‌گیری

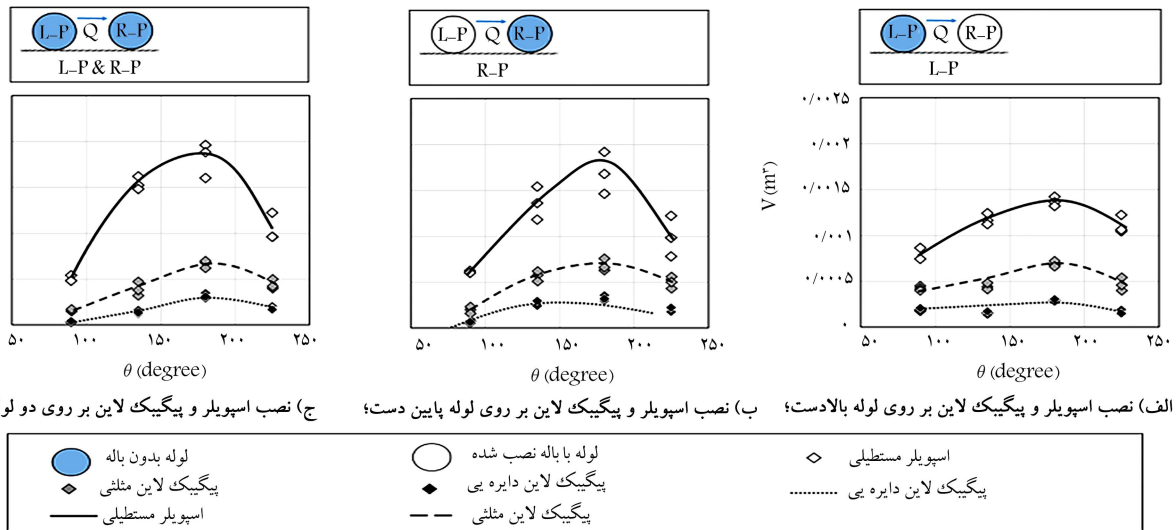
در پژوهش حاضر، تأثیر موقعیت قرارگیری اسپولر و پیگبیک‌لاین و هندسه‌ی آن‌ها و همچنین فاصله‌ی بین لوله‌های مستغرق موازی در عمق آبشستگی زیر لوله‌ها به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است که با توجه به یافته‌های پژوهش حاضر، این نتایج به دست آمده است:

۱. نصب اسپولر و پیگبیک‌لاین روی لوله، موجب تغییرات چشمگیری در بیشینه‌ی عمق آبشستگی لوله‌ها شده است.

موازی بیشتر تابع زاویه و محل قرارگیری (لوله‌ی سمت پایین دست یا بالادست یا هر دو) است تا شکل اسپولر یا پیگبیک‌لاین و همچنین فاصله‌ی قرارگیری لوله‌ها از یکدیگر، پارامتر تأثیرگذاری در میزان عمق آبشستگی زیر لوله‌های موازی به حساب می‌آید.

ب) **تأثیر زاویه‌ی نصب باله و پیگبیک‌لاین در میزان حجم آبشستگی:** نتایج آزمایش‌های لوله‌ی موازی نشان می‌دهد که استفاده از پیگبیک‌لاین و اسپولر، میزان عمق آبشستگی و حجم انتقال رسوب‌ها را نسبت به لوله‌ی ساده به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. همچنین تأثیر زاویه‌ی قرارگیری اسپولر و پیگبیک‌لاین به مراتب بیشتر از شکل مقطع آن‌هاست. از همین رو به ازاء آزمایش‌های مختلف در شکل ۹، متوسط عمق آبشستگی در زیر لوله‌های L-P بالادست و R-P پایین دست محاسبه و پس از میانگین‌گیری، در مقابل زاویه‌ی نصب شده در محور افقی ترسیم شده است. شکل ۹، متشکل از سه ستون است، که به ترتیب از سمت بالادست به سمت راست: نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ی راست، نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ی سمت بالادست، و نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی هر دو لوله است. همچنین شکل ۹ شامل سه سطر است که به ترتیب ردیف اول، مربوط به میزان متوسط عمق آبشستگی در لوله‌ی سمت پایین دست (d_{st})؛ سطر دوم، نماینده‌ی میزان متوسط عمق آبشستگی در لوله‌ی سمت چپ (d_{sl}) و سطر سوم جمع میزان آبشستگی در هر دو لوله به ازاء زاویه‌ی نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله است. نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ی سمت پایین دست (شکل‌های سمت راست) تغییر زاویه، تأثیری در روند آبشستگی لوله‌ی بالادست ندارد؛ در حالی که لوله‌ی سمت پایین دست در این وضعیت بیشترین میزان آبشستگی را در زاویه‌های ۱۸° و ۱۳۵ درجه تجربه می‌کند (شکل ۹). همچنین با نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین در زوایای ۹° و ۲۷° درجه بر روی لوله‌ی پایین دست، کمترین میزان عمق آبشستگی به دست خواهد آمد. در ستون دوم شکل ۹ مشاهده می‌شود با نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ی سمت چپ، میزان عمق آبشستگی در زیر لوله‌ی سمت پایین دست به جز زاویه‌ی ۹° درجه، صفر است. این بدان معناست که به ازاء نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ی سمت بالادست، همواره لوله‌ی سمت پایین دست در زیر رسوب‌ها دفن خواهند شد. این در حالی است که همچنان نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ی سمت بالادست، باعث شسته شدن بیشینه به ازاء زاویه‌ی نصب ۱۸° و ۱۳۵ درجه شده است. همچنین میزان کمیته‌ی رسوب‌های شسته شده در زاویه‌ی ۲۲۵ درجه رخ داده است. ستون سوم شکل ۹، نمایانگر این مطلب است که به ازاء نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین با زوایای مختلف بر روی هر دو لوله به مراتب میزان آبشستگی در لوله‌ی سمت پایین دست و سمت بالادست در زاویه‌های ۱۸° و ۱۳۵ درجه به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده است. توصیه می‌شود در مناطقی که هدف شسته شدن رسوب‌ها در زیر لوله، هم در لوله‌ی بالادست و هم در لوله‌ی پایین دست، است؛ از اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی لوله‌ها در زاویه‌ی ۱۸° درجه استفاده شود. این امر با به کارگیری اسپولر، شدت بیشتری خواهد داشت.

ج) **تخمین آبشستگی لوله‌های موازی:** با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف تأثیرگذار در عمق آبشستگی و همچنین زاوایای مختلف نصب اسپولر یا پیگبیک‌لاین بر روی خطوط لوله می‌توان رابطه‌یی برای تخمین میزان آبشستگی در زیر خطوط لوله ارائه کرد. با توجه به رابطه‌ی ۹ می‌توان بیان کرد که میزان عمق آبشستگی،



شکل ۱۱. حجم آبستگي در زیر خطوط لوله‌ی موازی.

یکدیگر، مقادیر آبستگي در زیر لوله‌ها مقادیر کاهشی را نشان داده‌اند، به طوری که در زیر لوله‌ی R-P، هیچ گونه آبستگي گزارش نشده است.

۶. با افزایش فاصله‌ی لوله‌ها از یکدیگر، تأثیر هر یک از آنها در دیگری کمتر و سبب شده است با افزایش فاصله‌ی لوله‌ها از یکدیگر مقدار آبستگي لوله‌ها بیشتر شود.

۷. رابطه‌ی ارائه شده برای تخمین میزان آبستگي در زیر لوله‌های موازی، سبب تخمین مناسبی از مقدار آبستگي متوسط در زیر دو لوله شده است.

۲. نتایج آبستگي زیر لوله‌های موازی نشان داد مقادیر بیشینه‌ی عمق آبستگي نسبت به لوله‌های منفرد کاهش حدود ۵۰ درصدی داشته است.

۳. شکل مقطع اسپویلر و پیگیبک لاین، تأثیر چشمگیری در مقادیر آبستگي نداشته است، بلکه زاویه و موقعیت قرارگیری آنها در عمق آبستگي تأثیرگذار بوده است.

۴. نصب اسپویلر یا پیگیبک لاین در زوایای ۱۸° و ۱۳۵°، درجه‌ی آبستگي را سرعت بخشیده و باعث افزایش عمق نهایی آبستگي شده است. در مقابل، در زوایای ۹° و ۲۷°، کمترین میزان آبستگي بستر لوله مشاهده شده است.

۵. در ارتباط با فاصله‌ی قرارگیری لوله‌ها می‌توان گفت با نزدیک شدن لوله‌ها به

پانویس‌ها

1. self-burial
2. Pipe suspension
3. Bijker & Leeuwestein
4. Hulsbergen & Bijker
5. Hansen
6. Westerhorstmann
7. Cheng & Chew
8. Zhao & Wang
9. Arnold
10. Zhang
11. Yang
12. Zheng
13. Hu
14. Damroudi
15. Melville

منابع (References)

1. Blevins, R.D., *Flow Induced Vibrations*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 363 p. (1977).
2. Zang, Z.P., Gao, F.P. and Cui, J.S. "Physical modeling and swirling strength analysis of vortex shedding from near-bed piggyback pipelines", *Applied Ocean Research*, **40**, pp. 50-59 (2013).
3. Mao, Y. "The interaction between a pipeline and an erodible bed", PhD Thesis, Lyngby, Denmark, Technical University of Denmark (1986).
4. Sumer, B.M. "Physical and mathematical modelling of scour", *In Proceedings 2nd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-2)*, Singapore (Nov. 14-17 2004).

5. Bearman, P. W. and Zdravkovich, M.M. "Flow around a circular cylinder near a plane boundary", *Journal of Fluid Mechanics*, **89**(1), pp. 33-47 (1978).
6. Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. "Scouring, hydraulic structure design manual", No. 2, I.A.H.R. Balkema, 152 p. (1991).
7. Bijker, E.W. and Leeuwestein, W. "Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents", In *Seabed Mechanics*, Springer, Dordrecht, pp. 235-242 (1984).
8. Huisbergen, C.H. "Stimulated self-burial of submarine pipelines", *Offshore Technology Conference* (Jan 1984).
9. Hulsbergen, C.H. "Spoilers for stimulated self-burial of submarine pipelines", *Offshore Technology Conference* (Jan 1986).
10. Hulsbergen, C.H. and Bijker, R. "Effect of spoilers on submarine pipeline stability", *Offshore Technology Conference* (Jan 1989).
11. Hansen, E.A., Fredsoe, J. and Ye, M. "Two-dimensional scour below pipelines", In *International Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Symposium*, 5, pp. 670-678 (1986).
12. Westerhorstmann, J.H., Machemehl, J.L. and Jo, C.H. "Effect of pipe spacing on marine pipeline scour", In *The 2ed International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers* (Jan 1992).
13. Cheng, L. and Chew, L.W. "Modelling of flow around a near-bed pipeline with a spoiler", *Ocean Engineering*, **30**(13), pp. 1595-1611 (2003).
14. Zhao, J. and Wang, X. "CFD numerical simulation of the submarine pipeline with a spoiler", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **131**(3), 5 p. (2009).
15. Arnold, M.B. "The south sudan defence force: Patriots, collaborators or spoilers", *Journal of Modern African Studies*, **45**(4), pp. 489-516 (2007).
16. Zhang, Z.Y., Shi, B., Ruan, X.J. and et al. "Study on the submarine pipeline with spoiler under wave action", *Ocean Engineering (Haiyang Gongcheng)*, **30**(4), pp. 90-96 (2012).
17. "Calculation and experiment on Yang, L., Shi, B., Guo, Y. and et al. scour depth for submarine pipeline with a spoiler", *Ocean Engineering*, **55**, pp. 191-198 (2012).
18. Zhu, H., Qi, X., Lin, P. and et al. "Numerical simulation of flow around a submarine pipe with a spoiler and current-induced scour beneath the pipe", *Applied Ocean Research*, **41**, pp. 87-100 (2013).
19. Zheng, H.C., Shi, B. and Yu, Q. "Numerical study on spoiler torque effect to a half-buried pipeline", In *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, Atlantis Press, pp. 892-893 (June, 2015).
20. Zhao, M., Vaidya, S., Zhang, Q. and et al. "Local scour around two pipelines in tandem in steady current", *Coastal Engineering*, **98**, pp. 1-15 (2015).
21. Hu, D., Tang, W., Sun, L. and et al. "Numerical simulation of local scour around two pipelines in tandem using CFD-DEM method", *Applied Ocean Research*, **93**, 101968, pp.137-149 (2019).
22. Damroudi, M., Esmaili, K. and Rajaei, S.H. "Effect of pipeline external geometry on local Scour and self-burial time scales in current", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **14**(1), pp. 103-115 (2021).
23. Yang, S., Shi, B. and Guo, Y. "Investigation on scour scale of piggyback pipeline under wave conditions", *Ocean Engineering*, **182**, pp. 196-202 (2019).
24. Tofany, N., Low, Y.M., Lee, C.H. and et al. "Two-phase flow simulation of scour beneath a vibrating pipeline during the tunnel erosion stage", *Physics of Fluids*, **31**(11), pp. 250-63, 113302 (2019).
25. Guan, D., Melville, B.W. and Friedrich, H. "Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir", *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(1), pp. 68-76 (2014).
26. Melville, B.W. "Pier and abutment scour: integrated approach", *Journal of hydraulic Engineering*, **123**(2), pp. 125-136 (1997).
27. Chiew, Y.M. "Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines", *Journal of Hydraulic Engineering*, **117**(4), pp. 452-466 (1991).
28. Fredsoe, J., Sumer, B.M. and Arnskov, M.M. "Time scale for wave/current scour below pipelines", In *The 1st International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers*, (Jan 1991).