

تأثیر زاویه، ارتفاع پایه نگهدارنده و قطر خطوط لوله بر حداکثر گودال آبشستگی

نیما اعلمی^۱، مجتبی صانعی^{۲*} و هومن حاجی کندی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۳)

چکیده

آبشستگی زیر لوله‌های انتقال گاز، نفت و آب خطر خمیدگی لوله و شکستن آن را به دنبال دارد. این پدیده می‌تواند به محیط زیست و صنعت نفت و گاز آسیب‌های فراوانی وارد کند. در این پژوهش تأثیر تغییرات قطر، فاصله از کف و زاویه قرارگیری لوله‌های انتقال بر میزان کاهش عمق آبشستگی زیر لوله‌های مستغرق در بستر رسوبات چسبنده بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آزمایش‌ها برای حالت آبشستگی زیر لوله با زاویه برخورد صفر، ۱۵ و ۳۰ درجه و در ۳ موقعیت روی بستر، فاصله D/2 و D/4 از بستر انجام شد. همچنین، در انجام آزمایش‌ها از سه قطر ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد، زاویه برخورد جریان روی مکان قرارگیری بیشینه عمق آبشستگی و نحوه عملکرد گردابه‌ها مؤثر است، به طوری که با افزایش زاویه، عمق آبشستگی زیر خط لوله کاهش می‌یابد و به ازای افزایش فاصله بین لوله و بستر، میزان آبشستگی به صورت معنی‌داری تا میزان ۱۸ درصد، کاهش پیدا کند، میزان آبشستگی زیر لوله کمتر می‌شود. همچنین مشاهده شد که قطر لوله بر میزان عمق آبشستگی تأثیر دارد و بدلیل تأثیر روی جریان به سمت پایین و جریان‌های گردابی، هرچه قطر لوله افزایش یابد، عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. در نهایت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی حداکثر میزان آبشستگی لوله، رابطه‌ای بر پایه رگرسیون غیر خطی برای تخمین حداکثر میزان آبشستگی ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، قطر لوله، زاویه برخورد جریان، لوله مستغرق، رسوبات چسبنده، برازش رابطه

۱. گروه عمران آب، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

۳. گروه عمران آب، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: saneie_m@scwmri.ac.ir

مقدمه

پارامتر k_c بستگی دارد، در این پژوهش Kc تابعی که در برگیرنده خصوصیات جریان هیدرولیکی است.

در پژوهشی تأثیر فاصله لوله از بستر بر نیروهای هیدرودینامیکی در یک خط لوله مستغرق همراه با باله نصب شده تحت شرایط امواج به طور آزمایشگاهی بررسی شد. همچنین از یک مدل دو بعدی برای تجزیه و تحلیل عددی استفاده شد. ضرایب دراگ، اینرسی و بالابرنده برای یک قطر معادل بر اساس معادله موریسون به دست آمده است. تأثیر فاصله از بستر، زمانی مهم خواهد بود که مقدار آن کمتر از 0.5 باشد ($e/D = 0.5$) و تأثیر آن با افزایش نسبت e/D کاهش می‌یابد (۵).

کبیری و حسن‌زاده (۱۲) اثر زبری لوله بر آبشستگی زیر لوله‌های مستغرق تحت جریان یک‌سویه مورد مطالعه قرار گرفت. در انجام آزمایش‌ها از سه لوله با قطرهای متفاوت استفاده شده است. در حالت لوله‌های زبر، سطح لوله‌ها با زبری پوشانده شده است. در این مطالعه علاوه بر بررسی آبشستگی زیر لوله زبر، اثر فاصله بین لوله و بستر و صفحات عمودی (آبپایه)، در کاهش آبشستگی زیر لوله نیز مورد آزمایش قرار گرفته است. در حالت لوله زبر، آبشستگی زیر لوله افزایش یافته و بنابراین، برای کاهش آبشستگی از دو حالت (۱) ایجاد فاصله بین لوله و بستر، (۲) بکاربردن صفحات عمودی (آبپایه)، به طور همزمان استفاده شده که با بکاربردن این دو حالت عمق آبشستگی در مقایسه با حالت معمولی کاهش یافته است.

کبیری و همکاران (۱۳) به بررسی کنترل آبشستگی در زیر لوله‌های مستغرق تحت جریان یک‌سویه با استفاده از آبپایه پرداختند. نتایج تحقیق آزمایشگاهی حاکی از آن است که وقتی آبپایه در پایین دست لوله قرار می‌گیرد آبشستگی در جلوی لوله تا حدودی ناچیز می‌شود.

عطائیان و یاسی (۱) یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله متقاطع با کانال بستر ماسه‌ای، تحت جریان ماندگار، یکنواخت و یک‌بعدی انجام دادند که نتایج نشان داد با افزایش عدد فرود جریان، برای یک

از خطوط لوله برای انتقال آب از یک سمت رودخانه به سمت دیگر در شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده می‌شود. از این رو، با قرار گرفتن خطوط لوله در جریان روخانه، مخاطرات هیدرولیکی و سازه‌ای برای خط لوله محتمل است. همچنین عبور خطوط لوله گاز و نفت در خطوط انتقال امری اجتناب‌ناپذیر است و در زمان آبشسته شدن زیر خطوط لوله امکان انفجار و نشت حاصل سوراخی لوله تحت تنش وجود دارد. بررسی این خطر دارای اهمیت زیادی است، چراکه با تخریب شدن خط انتقال آب، خطرات اقتصادی و اجتماعی و حتی گاهی خطرات سیاسی منطقه را تهدید خواهد کرد. از این رو شناخت این پدیده و ارائه راهکار مناسب برای کاهش این خطر حائز اهمیت است. پژوهش حاضر با در نظر گرفتن شرایط مختلف هندسی از جمله زاویه‌ی قرارگیری مختلف، به بررسی و ارائه روابطی برای تخمین میزان شسته شدن رسوبات در رسوبات چسبنده می‌پردازد.

مطالعات انجام شده

بایکر و لیووستاین (۳) در پژوهشی بیان داشتند که در مکانیسم آبشستگی زیر خطوط لوله، سه مرحله فرسایش اصلی اتفاق می‌افتد. آبشستگی ابتدا در یک مقطع از لوله به صورت موضعی ایجاد و به تدریج در جهت محور طولی لوله گسترش می‌یابد، پس از ایجاد فاصله بسیار اندک بین لوله و بستر فرسایش‌پذیر، سیال با سرعت زیادی از درون حفره ایجاد شده عبور می‌کند و موجب افزایش تنش برشی در زیر لوله می‌شود همچنین آبشستگی موضعی اطراف خطوط لوله را تحت تأثیر جریان یک‌سویه، آب زلال و بستر فعال مورد بررسی قرار دادند و به معادلاتی دست یافتند که در این معادلات عمق آبشستگی زیر بستر فعال فقط به سرعت و عمق جریان، قطر لوله و اندازه ذرات بستر بستگی دارد. وورپاو و همکاران (۱۹) نشان دادند که عمق نهایی آبشستگی زیر لوله در بستر شیبدار با امواج کم عمق از بین پارامترهای k_c و شیلدز و طول چاله آبشستگی بیشتر به

به‌طور معمول در دلتای رودخانه‌های بزرگ وجود دارند. توانایی پیش‌بینی انتقال رسوبات چسبنده در نواحی ساحلی، از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی نقش مؤثری بر توسعه پروژه‌های جدید مهندسی دارد. علاوه بر این، نگه‌داری و بهره‌برداری صحیح از زیرساخت‌های موجود نیازمند ارزیابی نرخ رسوبگذاری است. همچنین، رفتار رسوبات چسبنده به دلیل خاصیت فلوکوله شدن آنها بسیار پیچیده است و کارهای تحقیقاتی زیادی در جهت شناخت و تبیین رفتار این نوع رسوبات انجام شده و یا در حال انجام است. با این حال هنوز بسیاری از رفتارهای رسوبات چسبنده در پرده ابهام قرار دارد و قوانین محکمی برای تبیین و تفسیر رفتار آنها به‌وجود نیامده است. پس ضرورت دانستن آبخستگی لوله‌های مستغرق قرار گرفته در خاک چسبنده را دو چندان می‌کند. تاکنون پژوهش‌های زیادی برای آبخستگی زیر لوله مستغرق و تأثیر پارامترهای مؤثر بر آن به‌صورت آزمایشگاهی در رسوبات غیرچسبنده انجام شده است اما در رسوبات چسبنده آزمایش‌هایی صورت نگرفته است. هدف از مطالعه حاضر بررسی آزمایشگاهی تغییرات قطر، زاویه و فاصله لوله از کف بر میزان عمق آبخستگی زیر لوله‌های مستغرق در بستر رسوبات چسبنده است.

مواد و روش‌ها

در این بخش، به بررسی زیربخش‌های مربوط به این پژوهش که عبارت‌اند از: آنالیز ابعادی، تجهیزات آزمایشگاهی، مدل آزمایشگاهی خطوط لوله پرداخته شده است.

آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر بر کنترل یا کاهش آبخستگی موضعی پیرامون خطوط لوله عبارتند از خصوصیات جریان، خصوصیات رسوب و هندسه لوله. عمق آبخستگی d_s را می‌توان به‌صورت تابعی از پارامترهای زیر نوشت:

$$d = f(\rho, g, V, e, \alpha, d, D, h, \mu, C, \tau) \quad (1)$$

قطر لوله معلوم، عمق حداکثر آبخستگی در اطراف لوله افزایش می‌یابد، همچنین بیشترین عمق آبخستگی در شرایط آب صاف، در حالت $e=D/4$ اتفاق می‌افتد. e : فاصله بین لوله و بستر رسوبی و D : قطر لوله می‌باشد، در شرایط آستانه حرکت مواد بستر، هرچه مواد بستر غیریکنواخت‌تر باشد عمق حداکثر آبخستگی کاهش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر تأثیر زاویه برخورد جریان در آبخستگی زیر لوله‌های مستغرق تحت جریان یک سویه به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. نتایج نشان داد که زاویه برخورد جریان بر روی مکان قرارگیری بیشینه عمق آبخستگی و نحوه عملکرد گردابه‌ها مؤثر است و برای زاویه‌های کوچکتر از نود درجه بیشینه عمق آبخستگی در سمت راست فلوم اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که زاویه انحراف خط لوله با توجه جهت جریان در نظر گرفته شد (۲). چائو (۶) با بررسی عمق حد اکثر آبخستگی در اطراف خطوط لوله مستغرق، در شرایط آب زلال، پیداشتن که آبخستگی تا زمانی ادامه می‌یابد که سرعت جت خروجی حفره آبخستگی با تنش برشی بحرانی ذرات بستر τ_c ، در کف گودال آبخستگی برابر شود. کجلدسن و همکاران (۱۴)، آبخستگی موضعی اطراف خطوط لوله را در کانال مستطیلی و تحت تأثیر جریان یک بعدی، آب زلال و بستر فعال مورد بررسی قرار دادند. در مجموع ۳۲ آزمون در حالت بستر فرسایشی، شامل لوله‌هایی با قطرهای ۶، ۱۱، ۲۲/۵ و ۵۰ سانتی‌متر و سرعت نیم متر بر ثانیه، انجام گرفته است. در این پژوهش، به معادلاتی دست یافتند که در این معادلات عمق آبخستگی در شرایط بستر فعال، تنها به سرعت جریان و قطر لوله بستگی دارد و اثر عمق جریان و اندازه ذرات بستر صرفه‌نظر شد.

با توجه به بادهایی که از شمال غرب وارد منطقه خلیج فارس می‌شوند مقدار زیادی خاک‌های نرم را به خلیج فارس حمل می‌کنند که اغلب شامل ماسه، سیلت و رس است. وجود بیش از ۱۰ درصد از ذرات رس در مخلوط‌های رسوبی باعث بروز رفتارهای چسبنده در رسوبات می‌شود، این نوع رسوبات

کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی به طول ۱۱ متر، عرض ۵۰ سانتی متر مطابق شکل ۱ انجام شد. جریان ورودی فلوم بوسیله پمپاژ از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه تأمین شده است. اندازه‌گیری دبی جریان توسط یک سرریز لبه‌تیز مثلثی قرار گرفته در انتهای فلوم که واسنجی شده است. عمق پایاب توسط یک دریچه قابل تنظیم در پایین دست طوری تنظیم شده که شرایط استغراق برقرار شود. مقدار عمق جریان به وسیله عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر که در بالای فلوم نصب می‌شود قرائت شد. همچنین از کف کاذب به ارتفاع ۱۰ سانتی متر در ابتدا و انتهای فلوم استفاده شد. کف کانال به جز در محدوده دو متری که از رسوبات چسبنده پر می‌شود 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 تله‌اندازی ذرات شسته شده تعبیه شده است.

مدل آزمایشگاهی خطوط لوله

در شکل ۲ وضعیت قرارگیری خطوط لوله در کانال آزمایشگاهی به تصویر کشیده شده است. در این شکل وضعیت قرارگیری منحنی مختصات مشخص شده است. همچنین به‌ازای تغییر زاویه انحراف، قطر لوله و فاصله بین لوله و بستر رسوبی (ارتفاع پایه‌های نگهدارنده) آزمایش‌هایی با مشخصات هیدرولیکی مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۳ تعدادی از آزمایش‌های واقعی در پلان و مقطع به تصویر کشیده شده است. ابتدای هر آزمایش برای جلوگیری از آبشستگی ناخواسته در سطح بستر، کانال از انتهای پایین دست از آب پر و بعد از رسیدن به عمق قابل قبول جریان را ساکن نگه‌داشته و لوله در نقطه مورد نظر از ابتدای بستر قرار داده شده است. برای آبیگری اولیه کانال، جریان به آرامی برقرار می‌شد تا مانع از بهم خوردن بستر و تشکیل ریپل در سطح بستر شود. پس از هر آزمایش برای اندازه‌گیری میزان آبشستگی از یک عمق سنج که در عرض و طول فلوم براحتی حرکت می‌کرد استفاده شد. در

در رابطه بالا، d_s ماکزیم عمق آبشستگی، ρ چگالی آب، g شتاب گرانش زمین، V سرعت سیال، e فاصله جدار لوله از کف بستر رسوبی (ارتفاع پایه نگهدارنده خط لوله)، α زاویه انحراف خط لوله (این زاویه انحراف بین خط لوله و خط عمود بر دیوار کانال معرفی می‌شود)، d_{50} متوسط قطر رسوبات، D قطر لوله، h ارتفاع آب در کانال، τ تنش برشی کف کانال و C ضریب چسبندگی خاک هستند. لازم به ذکر است که کلیه واحدها متریک در نظر گرفته شد. تنش برشی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\tau = \gamma R S_0 \quad (2)$$

با ضرب اعداد بی‌بعد و تقسیم آنها بر یکدیگر و در نهایت پس از به دست آوردن کلیه پارامترهای بی‌بعد، معادله به صورت (۳) در می‌آید، همچنین به خاطر این که آزمایش‌ها برای یک نوع چسبندگی خاک انجام می‌پذیرد، از این رو رابطه (۳) برای حالتی که درصد رسوبات ۲۰ درصد باشد معرفی می‌شود:

$$\frac{d_s}{D} = f \left[\left(Rn \right), \left(Fr \right), \left(\frac{d}{D} \right), \left(\frac{h}{D} \right), \left(\frac{e}{D} \right), \alpha, \frac{C}{\tau} \right] \quad (3)$$

در روابط بالا عدد فرود Fr و τ^* تنش برشی بستر به ترتیب از روابط (۴) و (۵) بدست می‌آیند:

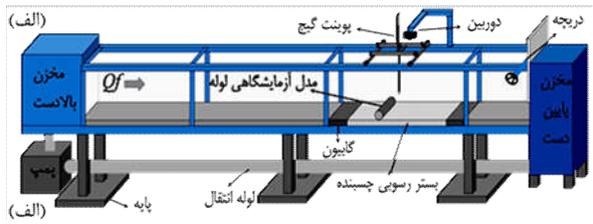
$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gy}} \quad (4)$$

$$\tau^* = \frac{y_n S_f}{((\rho_s - \rho_w) / \rho_w) d_{50}} \quad (5)$$

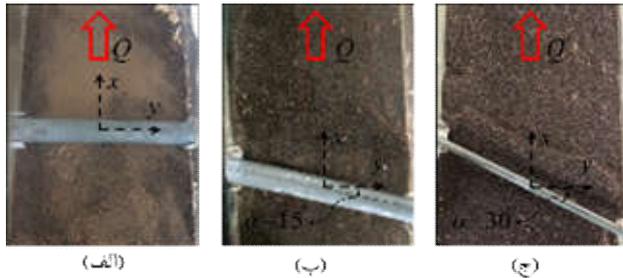
با توجه به این که آزمایش‌های آبشستگی در جریان آشفته انجام پذیرفته است، می‌توان از اثرات عدد رینولدز چشم پوشی کرد (۱۷ و ۱۸).

تجهیزات آزمایشگاهی

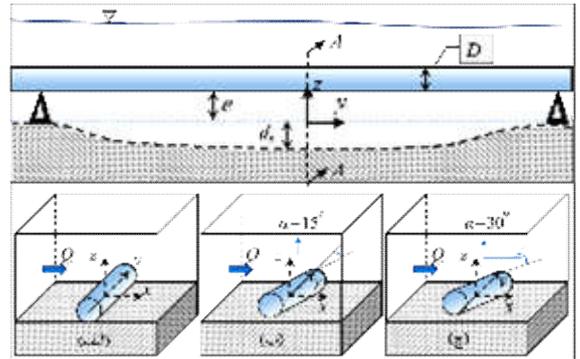
کانال آزمایشگاهی: کلیه آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی فلزی-شیشه‌ای آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات و آموزش



شکل ۱. کانال آزمایشگاهی و تجهیزات آن، (الف) شماتیک کانال آزمایشگاهی، (ب) کانال آزمایشگاهی



شکل ۳. وضعیت قرار گیری خطوط لوله با زوایای مختلف نسبت به کانال در حالت آزمایشگاهی، (الف) زاویه انحراف صفر، (ب) زاویه انحراف ۱۵ درجه، (ج) زاویه انحراف ۳۰ درجه.



شکل ۲. وضعیت قرار گیری خطوط لوله با زوایای مختلف نسبت به کانال، (الف) زاویه انحراف صفر، (ب) زاویه انحراف ۱۵ درجه، (ج) زاویه انحراف ۳۰ درجه.

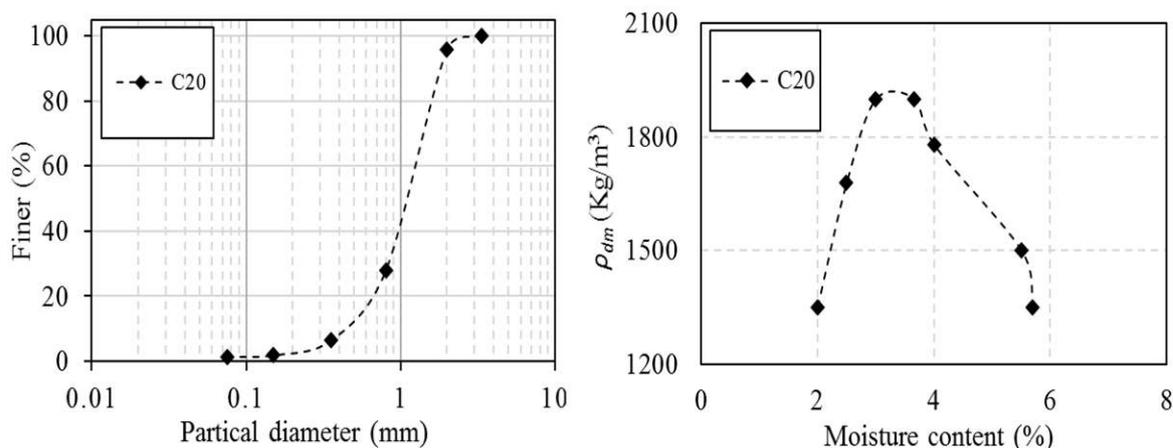
$$V_C^* = 0.0115 + 0.125 d_{50}^{1.4} \quad (7)$$

برای جلوگیری از تشکیل فرم بستر (ریپل) اندازه متوسط ذرات رسوبی باید بزرگتر از 0.7 میلی‌متر باشد ($d_{50} > 0.7 \text{ mm}$) (۴). در مطالعه حاضر از یک نوع دانه‌بندی با اندازه متوسط ذرات رسوبی 0.95 میلی‌متر که حاوی مقداری رس است استفاده و برای بدست آوردن خاک چسبنده از مخلوط کردن 20 درصد وزنی خاک رس بتونیت و 80 درصد وزنی ماسه با اندازه متوسط ذرات رسوبی $1/1$ میلی‌متر استفاده شد. به عبارتی از 200 کیلوگرم وزن رسوبات، 40 کیلوگرم رس و 160 کیلوگرم ماسه است. بستر کانال با مصالح چسبنده پر شد و دانه‌بندی آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

در جدول ۱ آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نمایش داده شده است. لازم به ذکر است، نامگذاری آزمایش‌ها در جدول ۱ بر اساس وضعیت فیزیکی و هیدرولیکی آزمایش‌ها

این آزمایش‌ها سرعت متوسط جریان ورودی ($V/V_c = 0.8-0.9$) تنظیم شد تا شرایط آبستگي آب زلال برقرار شود و شدت جریان آزمایش ثابت در نظر گرفته شد. سرعت بحرانی ورود V_c توسط رابطه لگاریمی (۶) بدست می‌آید (۷). از این‌رو به‌ازای سرعت بحرانی ایجاد شده در کانال، ماکزیمم ارتفاع آب برابر با 205 میلی‌متر برای حداکثر دبی 28 لیتر بر ثانیه بدست آمد. در نهایت آزمایش‌های آبستگي با حداکثر دبی 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 روش وزنی نیز برای محاسبه دبی در انتهای کانال نیز استفاده شد. لازم به ذکر است، برای تخمین مقدار سرعت برشی بحرانی از رابطه ارائه شده توسط صالحی و عظیمی (۱۷) استفاده شد (رابطه ۷).

$$\frac{V_C}{V_C^*} = 5.75 \text{Log} \left(5.53 \frac{h}{d_{50}} \right) \quad (6)$$



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی و رطوبت بهینه رسوبات استفاده شده در آزمایش‌ها

جدول ۱. نتایج آزمایش برش مستقیم به ازای سه نمونه

آزمایش	زاویه اصطکاک	چسبندگی (Kg/m^2)	درصد اشباع	وزن مخصوص مرطوب (g/cm^3)	وزن مخصوص خشک (g/cm^3)	ارتفاع (mm) رطوبت (درصد)
۱	۳۰	۱۸۰۰	۳۹/۳	۱/۹۲	۱/۸	۲۸
۲	۳۰	۱۸۰۰	۳۹/۳	۱/۹۲	۱/۸	۲۸
۳	۳۰	۱۸۰۰	۳۹/۳	۱/۹۲	۱/۸	۲۸

چسبنده از پارامترهای مهم در میزان آبشستگی هستند، سعی بر این بود که در آزمایش‌های مختلف این پارامترها ثابت نگه داشته شوند. برای آماده‌سازی بستر رسوبی، ابتدا مصالح بستر در محدوده‌ی در نظر گرفته شده به ضخامت ۳۰ سانتیمتر در کانال ریخته شده سپس لوله به آرامی روی بستر قرار گرفته شد. در هر آزمایش دبی وروری به کانال و عمق جریان اندازه‌گیری شده است. همچنین حداکثر عمق آبشستگی در هر آزمایش برداشت شده است. با توجه به اینکه بعد از هر آزمایش، بستر دچار فرسایش شده و در نتیجه آن حفره‌هایی در اطراف خطوط لوله ایجاد می‌شود.

محاسبه چسبندگی خاکدانه استفاده شده در آزمایش‌های آبشستگی زیر خطوط لوله، آزمایش برش مستقیم بر روی سه نمونه خاک، انجام پذیرفت، نتایج این آزمایش در

انجام پذیرفت. برای مثال در آزمایش شماره ۱، C_{20} نشانگر درصد رس، D_{40} نشانگر قطر ۴۰ میلیمتر لوله، e_0 نشانگر فاصله صفر بین لوله و بستر رسوبی و α_0 نمایانگر زاویه انحراف صفر درجه از بدنه کانال می‌باشد.

لازم به ذکر است سه ستون انتهایی جدول ۱، در جهت مقایسه‌های صورت گرفته بین آزمایش‌ها، با توجه به پارامتر معرفی شده در تیترا جدول، در نظر گرفته شده است. ستون شماره ۵، برای مقایسه تاثیر پایه‌ی نگهدارنده، ستون شماره ۶ برای مقایسه تاثیر زاویه و ستون شماره ۷، برای مقایسه‌های تاثیر قطر استفاده شد. در شکل ۴، میزان رطوبت بهینه رسوبات به ازای حداکثر تراکم نسبی و همچنین منحنی دانه‌بندی نمایش داده شده است.

از آنجا که میزان رطوبت و فشردگی (تراکم) رسوبات

شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل تنش برشی و تنش مستقیم به ازای جابه‌جایی صورت پذیرفته در مدل در حین آزمایش مشخص شده است. همچنین در جدول ۲ نتایج حاصل از این آزمایش نمایش داده شده است.

در جهت کاهش میزان حجم رسوبات برای آماده سازی بستر اولیه در بالادست و پایین دست کانال از ورقه‌های چوبی جهت بالا آوردن کف کانال استفاده شد. این امر موجب می‌گردد که حجم رسوبات استفاده شده کاهش پیدا کند. همچنین با توجه به نظر ملویل (۱۵)، در رسوبات جریان داری برقرار است. با توجه به شاخص انحراف معیار رسوبات مقدار D_{84} به D_{16} ، از روی منحنی دانه‌بندی رسوبات به ترتیب برابر با $1/0.2$ و $0/8$ میلیمتر محاسبه شد. با در نظر گرفتن نسبت این مقادیر، نسبت بدست آمده از مقدار $1/3$ کمتر و برابر با $1/275$ می‌باشد.

لازم به ذکر است. برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبات بر آبخستگی موضعی، انحراف معیار هندسی ذرات برای رسوبات با دانه‌بندی یکنواخت حدود $1/4$ در نظر گرفته شد (۶). انحراف معیار در این پژوهش $1/27$ بدست آمده که خود نشان‌دهنده یکنواختی ذرات است.

داده‌های آزمایشگاهی با مطالعات گذشته مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده شد. این مقایسات در شکل ۷ نمایش داده شده است. مقایسه‌ها بین داده‌های زمان تعادل آزمایشگاهی و مطالعات گذشته، بیانگر این مطلب است که آزمایش‌ها در زمان قابل قبولی به تعادل گودال آبخستگی رسیده‌اند. این مطلب نمایانگر صحت داده‌های گودال آبخستگی می‌باشد. همچنین، همان‌طور که در شکل ۷، مشخص است با تغییر بستر به بستر چسبنده (چسبندگی خاک با استفاده از آزمایش برش تک محوی برای خاک مخلوط شده (SC) با رس در حدود ۱۹ کیلونیوتن بر مترمربع اندازه گیری شد) میزان زمان تعادل کاهش پیدا می‌کند و نمودار برازش داده شده بر روی داده‌های آزمایشگاهی نسبت به مطالعات با بستر رسوبات غیر چسبنده به سمت چپ تغییر موقعیت می‌دهد (۸ و ۲۰). پیش‌بینی می‌شود، بیشتر شدن زمان به تعادل رسیدن گودال آبخستگی در خاک‌های چسبنده به خاطر وجود چسبندگی در بین خاکدانه‌های خاک است. این امر سبب می‌شود که خاک چسبنده در برابر جریان مقاومت برشی بیشتری را تحمل کند و در نهایت زمان به تعادل رسیدن گودال آبخستگی بیشتری داشته باشد. در شکل ۷، t زمان تعادل و T زمان پایه آزمایش‌ها و d_{se} گودال نهایی و در تعادل آبخستگی می‌باشد. $T^* = UT/D$ به‌عنوان عددی بی‌بعد در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن در شکل ۶ مشخص است. U سرعت متوسط جریان و D قطر لوله است.

تأثیر زاویه برخورد و ارتفاع پایه نگهدارنده خط لوله با زاویه انحراف صفر درجه بر آبخستگی

بعد از اتمام آزمایش‌ها، پروفیل آبخستگی در محور مرکزی (خط A-A شکل ۲) فلوم برداشت شد، اثر موقعیت لوله در تماس با کف عامل مهمی است که هر چه فاصله لوله با بستر افزایش (e) یابد، اثر حضور لوله بر عمق آبخستگی تعادلی بیشتر و در نتیجه عمق آبخستگی کاهش پیدا می‌کند (۱۱).

شکل ۸ پروفیل طولی آبخستگی اثر موقعیت لوله در تماس با کف برای زاویه صفر درجه را نشان می‌دهد. به‌ازای افزایش

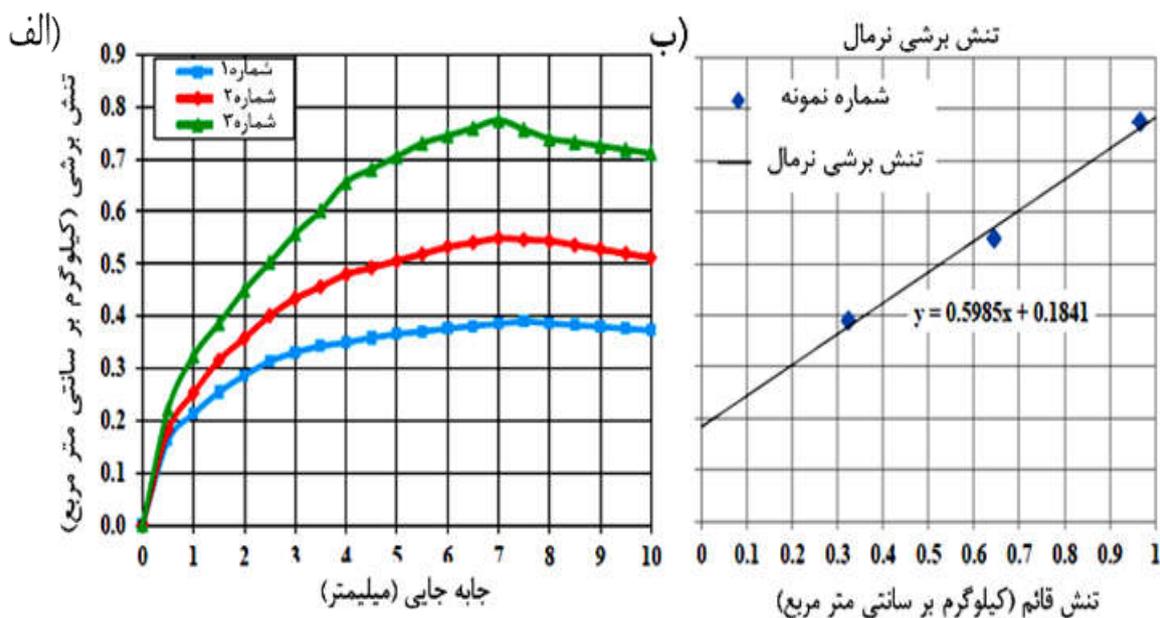
شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل تنش برشی و تنش مستقیم به ازای جابه‌جایی صورت پذیرفته در مدل در حین آزمایش مشخص شده است. همچنین در جدول ۲ نتایج حاصل از این آزمایش نمایش داده شده است.

در جهت کاهش میزان حجم رسوبات برای آماده سازی بستر اولیه در بالادست و پایین دست کانال از ورقه‌های چوبی جهت بالا آوردن کف کانال استفاده شد. این امر موجب می‌گردد که حجم رسوبات استفاده شده کاهش پیدا کند. همچنین با توجه به نظر ملویل (۱۵)، در رسوبات جریان داری برقرار است. با توجه به شاخص انحراف معیار رسوبات مقدار D_{84} به D_{16} ، از روی منحنی دانه‌بندی رسوبات به ترتیب برابر با $1/0.2$ و $0/8$ میلیمتر محاسبه شد. با در نظر گرفتن نسبت این مقادیر، نسبت بدست آمده از مقدار $1/3$ کمتر و برابر با $1/275$ می‌باشد.

لازم به ذکر است. برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبات بر آبخستگی موضعی، انحراف معیار هندسی ذرات برای رسوبات با دانه‌بندی یکنواخت حدود $1/4$ در نظر گرفته شد (۶). انحراف معیار در این پژوهش $1/27$ بدست آمده که خود نشان‌دهنده یکنواختی ذرات است.

نتایج و بحث

در این بخش تأثیر زاویه برخورد لوله، فاصله از بستر و قطر لوله بر میزان عمق آبخستگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها از روش تجربی استفاده شد. برای این منظور یک آزمایش طولانی مدت (حدود ۲۰ ساعت) با لوله‌ای به قطر ۱ سانتی‌متر و زوایای برخورد ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه انجام شد و منحنی تغییرات نسبی ماکزیم عمق آبخستگی نسبت به زمان نسبی (T^*) رسم شد (شکل ۶). معیار زمان تعادل در این پژوهش، مدت زمانی است که تغییرات عمق آبخستگی در ۳ ساعت متوالی بیش از ۱ میلی‌متر نباشد (۱۸). همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود بعد از حدود ۲ ساعت، افزایشی در عمق آبخستگی مشاهده نمی‌شود و آبخستگی به تعادل می‌رسد. همچنین برای اطمینان از رسیدن به حالت تعادل و همچنین صحت‌سنجی داده‌ها، زمان به تعادل رسیدن

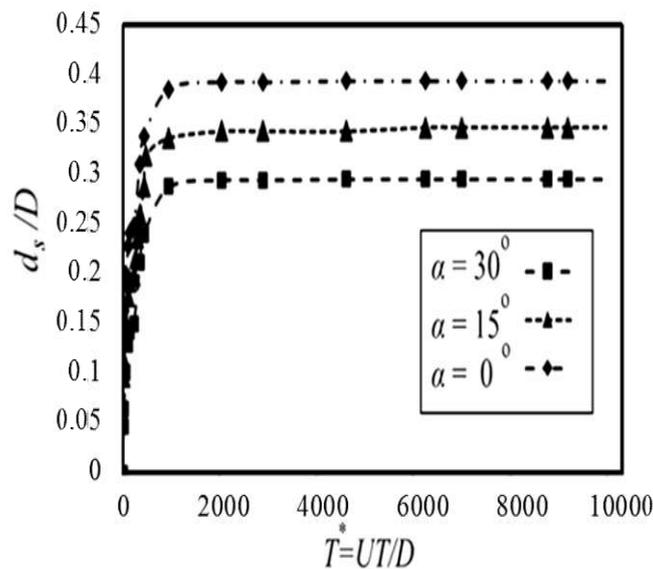


شکل ۵. نتایج آزمایش برش مستقیم برای سه نمونه از خاکدانه استفاده شده (رنگی در نسخه الکترونیکی)

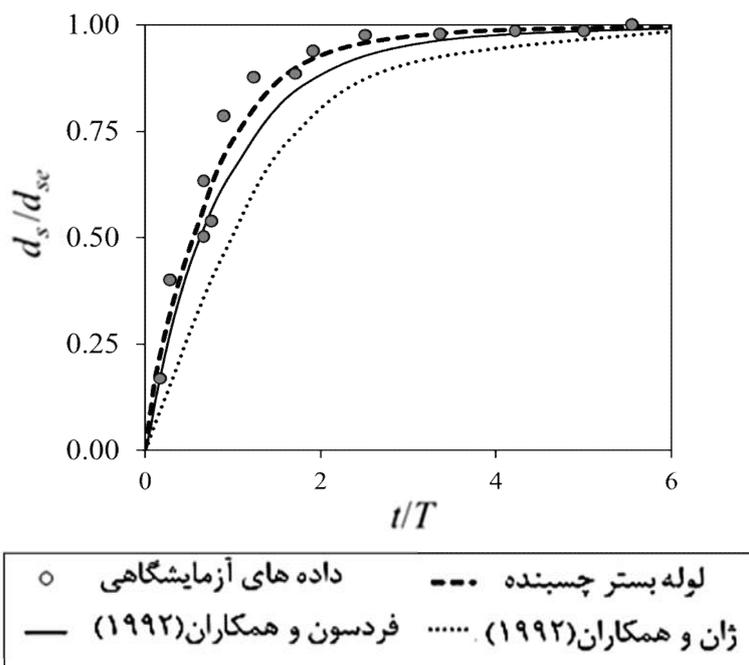
جدول ۲. آزمایش‌های خطوط لوله

شماره	آزمایش‌ها	ارتفاع پایه	D (mm)	α (degree)	ارتفاع پایه	نگهدارنده	تأثیر ارتفاع پایه	تأثیر زاویه	تأثیر قطر
۱	C20-D40e0 α 0	e = 0	۴۰	۰	e = 0	*	*	*	*
۲	C20-D40e10 α 0	e = D/4	۴۰	۰	e = D/4	*	*	*	*
۳	C20-D40e20 α 0	e = D/2	۴۰	۰	e = D/2	*	*	*	*
۴	C20-D40e0 α 15	e = 0	۴۰	۱۵	e = 0	*	*	*	*
۵	C20-D40e10 α 15	e = D/4	۴۰	۱۵	e = D/4	*	*	*	*
۶	C20-D40e20 α 15	e = D/2	۴۰	۱۵	e = D/2	*	*	*	*
۷	C20--D40e0 α 30	e = 0	۴۰	۳۰	e = 0	*	*	*	*
۸	C20-D40e10 α 30	e = D/4	۴۰	۳۰	e = D/4	*	*	*	*
۹	C20-D40e20 α 30	e = D/2	۴۰	۳۰	e = D/2	*	*	*	*
۱۰	C20--D20e0 α 0	e = 0	۲۰	۰	e = 0	*	*	*	*
۱۱	C20--D20e5 α 0	e = D/4	۲۰	۰	e = D/4	*	*	*	*
۱۲	C20--D10e0 α 0	e = 0	۱۰	۰	e = 0	*	*	*	*
۱۳	C20--D10e2.5 α 0	e = D/4	۱۰	۰	e = D/4	*	*	*	*

* نشان‌دهنده مقایسه نتایج با یکدیگر است



شکل ۶. منحنی بی بعد عمق آبستگي



شکل ۷. مقایسه زمان تعادل گودال آبستگي با مطالعات گذشته (۸ و ۲۰)

موجب کاهش تنش برشی می شود. با افزایش فاصله بین لوله و بستر، تنش برشی نیز کاهش می یابد و در نتیجه کاهش تنش برشی، عمق آبستگي نیز کاهش می یابد. بیشینه عمق آبستگي در زاویه برخورد صفر درجه در محور مرکزی لوله

فاصله بین لوله و بستر رسوبی چسبنده، آبستگي زیر لوله کمتر می شود، علت این امر این است که به ازای افزایش فاصله بین لوله و بستر رسوبی، میزان قدرت و جت عبور از زیر لوله فاصله و دامنه بیشتری برای عبور پیدا خواهد کرد. این امر

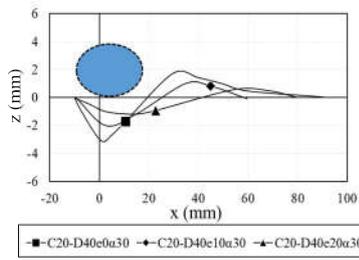
وضعیت داده (شکل ۱۲- الف) و به خاطر تغییر زاویه و بوجود آمدن مومنتوم عرضی در راستای خط لوله حتی انحرافی در جهت منحنی عرضی تشکیل شود. این جت باعث کاهش قدرت دو جت تشکیل شده در آزمایش‌ها با لوله مستقیم است. از این رو می‌توان بیان کرد، با افزایش زاویه‌ی انحراف، میزان آبشستگی در زیر خطوط لوله کاهش پیدا خواهد کرد (شکل ۱۱). با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر فاصله لوله از بستر افزایش یابد مقدار بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. به دلیل این که هر چه فاصله بین لوله و بستر کم باشد در این مرحله مقدار زیادی آب از زیر لوله عبور می‌کند که باعث به وجود آمدن جریانی با سرعت خیلی زیاد در فاصله بین لوله و بستر می‌شود، در نتیجه در روی بستر زیر خط لوله تنش‌های برشی خیلی بزرگی به وجود می‌آید ولی با ایجاد فاصله بین لوله و بستر سرعت جریان در زیر لوله کاهش می‌یابد و تنش برشی و عمق آبشستگی هم کم می‌شود.

در لوله‌های با زاویه برخورد صفر درجه تمام طول لوله در مسیر جریان قرار می‌گیرد هر چه به طرف محور کانال از دیواره‌ها فاصله گرفته شود. حفره هم می‌تواند افزایش پیدا کند اما در لوله‌های با زاویه برخورد ۱۵ و ۳۰ درجه قسمتی از لوله که به بالادست نزدیک‌تر است بیشتر و زودتر در معرض فرسایش قرار می‌گیرد و ماسه‌های شسته شده را با توجه به جهت لوله و بردار سرعت به سمت چپ و جلوی لوله می‌فرستد. به همین دلیل بیشینه عمق آبشستگی در زاویه برخورد صفر درجه در محور لوله اتفاق می‌افتد اما در لوله‌های با زاویه برخورد ۱۵ و ۳۰ درجه در قسمتی که به بالادست لوله نزدیک‌تر است در پایین دست اتفاق می‌افتد. اثر زاویه قرارگیری لوله یکی از فاکتورهای اساسی است. نتایج آزمایشگاهی نشانگر آن است

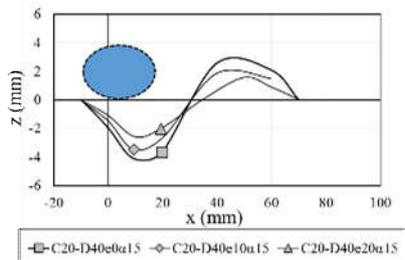
رخ می‌دهد، به طوری که بیشینه عمق آبشستگی و تپه متقارن در پایین دست لوله تقریباً در یک راستا قرار می‌گیرند. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از بستر، بیشینه تپه آبشستگی کاهش یافته است. همچنین در شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فاصله از بستر بیشینه عمق آبشستگی به سمت جلو پیشروی می‌کند. اما عمق نسبی کاهش پیدا کرده و تپه تشکیل شده در پایین دست لوله بیشتر گسترش یافته است.

تأثیر زاویه برخورد و ارتفاع پایه نگهدارنده خط لوله با زاویه انحراف بیشتر از صفر درجه بر آبشستگی

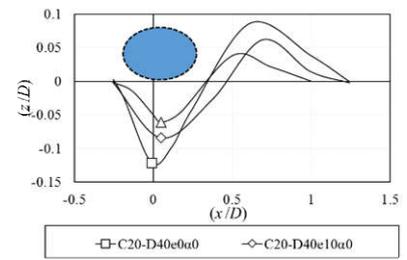
به دلیل تغییر زاویه برخورد آب، چگونگی برخورد آب با لوله نیز بر روند آبشستگی تأثیر دارد. تغییر جهت جریان، توسط لوله‌های با زاویه برخورد ۱۵ و ۳۰ درجه باعث ایجاد آبشستگی پایین دست می‌شود. این مقادیر به مراتب کمتر از لوله با زاویه صفر می‌باشد. میزان پروفیل آبشستگی در این آزمایش‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است. این اختلاف فشار باعث نشت جریان از زیر لوله می‌شود. وقتی سرعت افزایش می‌یابد فشار دینامیک نیز افزایش می‌یابد. همچنین در آزمایش‌های با زاویه برخورد ۳۰ و ۱۵ بیشینه عمق آبشستگی و تپه ماسه‌ای در یک راستا قرار نمی‌گیرند. گاهی پیش می‌آید که محل عمق آبشستگی عوض می‌شود به مقدار کمی به سمت محور کانال می‌آید. در نتیجه با بزرگتر شدن شکاف بین لوله و بستر ناشی از آبشستگی سرعت جریان در زیر لوله کاهش یافته و شدت فرسایش تونلی کاهش و به تدریج از بین می‌رود و عمق آبشستگی به تعادل می‌رسد. پیش‌بینی می‌شود، به ازای اعمال زاویه انحراف در خطوط لوله، جت‌های جریان تشکیل شده در زیر لوله و بالای آن تغییر



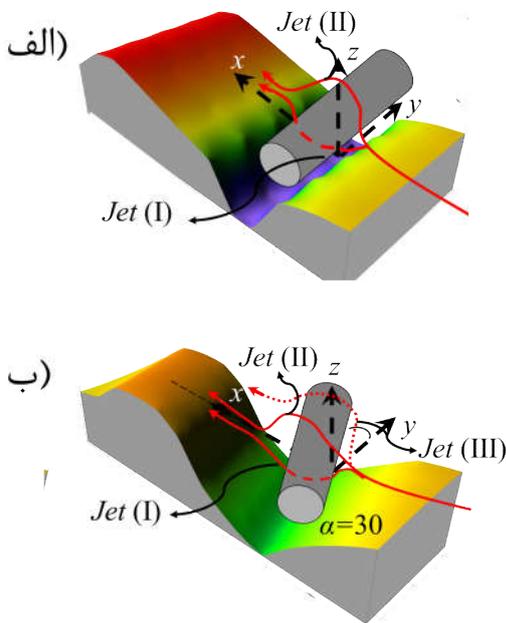
شکل ۸. پروفیل طولی آبستگي برای زاویه برخورد صفر



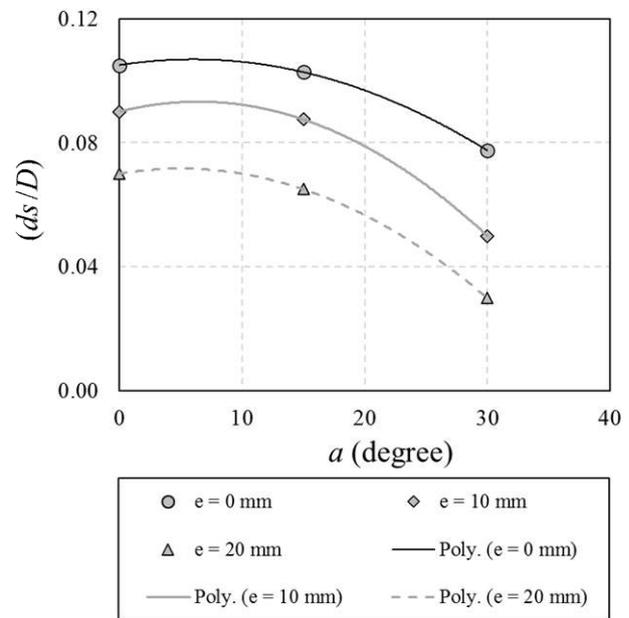
شکل ۹. پروفیل طولی آبستگي برای زاویه ۱۵ درجه.



شکل ۱۰. پروفیل طولی آبستگي برای زاویه ۳۰ درجه



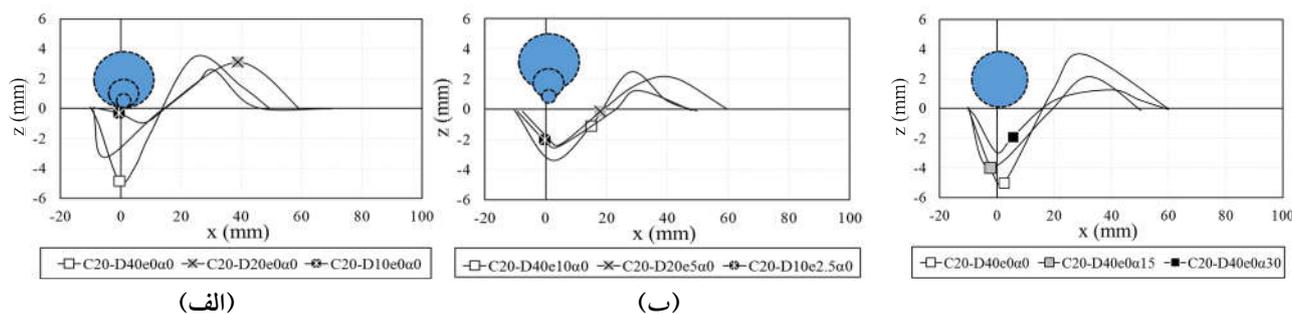
شکل ۱۱. تأثیر زاویه انحراف بر میزان آبستگي در خطوط لوله مختلف خطوط لوله، الف) زاویه انحراف صفر درجه، ب) زاویه انحراف ۳۰ درجه.



شکل ۱۲. جت‌های جریان تشکیل شده به‌ازای زوایای مختلف خطوط لوله، الف) زاویه انحراف صفر درجه، ب) زاویه انحراف ۳۰ درجه.

در زاویه‌های برخورد ۱۵ و ۳۰ درجه اختلاف زیادی در بین بیشینه عمق آبستگي در حالت‌های مختلف از بستر در مقایسه با زاویه برخورد صفر درجه مشاهده شد و با افزایش میزان فاصله بین لوله و بستر کانال، میزان عمق آبستگي کاهش پیدا می‌کند.

که با کاهش زاویه حمله (شکل ۱۳) عمق آبستگي کاهش می‌یابد. علت این امر مربوط به آن است که هر چه زاویه قرارگیری لوله کوچکتر باشد منحنی نیروی بالابرنده پهن‌تر خواهد شد، که این امر نشانگر شکل‌گیری چرخابه‌های کمتر با کاهش زاویه است. همچنین با توجه به شکل ۱۳ می‌توان گفت



شکل ۱۳. پروفیل‌های طولی آبستگي برای فاصله $e=0$ از بستر.

شکل ۱۴. نمودار مقایسه عمق آبستگي زیر خطوط لوله با قطرهای ۲۰، ۱۰ و ۴۰ میلی‌متر و زاویه صفر درجه

تأثیر قطر بر میزان آبستگي

در شکل ۱۴ پروفیل آبستگي زیر خطوط لوله با قطرهای ۱، ۲ و ۴ سانتی‌متری در دبي ۲۸ لیتر بر ثانیه ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت که قطر لوله بر میزان عمق آبستگي تأثیر دارد، به طوری که با افزایش قطر لوله عمق گودال آبستگي نیز افزایش می‌یابد و ریپل تشکیل شده در پایین دست لوله بیشتر گسترش یافته است و هرچه قطر لوله افزایش می‌یابد، عمق آبستگي نیز بدلیل تأثیری که روی جریان به سمت پایین و جریان‌های گردابی می‌گذارد، افزایش می‌یابد.

برای مقایسه بین نتایج آزمایش‌های خطوط لوله در بستر چسبنده، نتایج آبستگي آزمایش‌ها با e/D مختلف و همچنین d_s/D های مختلف با توجه به مطالعه موناکادا و آگویر (۱۶)، صورت پذیرفت. نتایج حاصل از مقایسه نشان داد، با افزایش فاصله بین لوله و بستر میزان عمق آبستگي کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۵). با مقایسه مقادیر عمق آبستگي با مطالعه گذشته می‌توان این نتیجه را بیان کرد که اگرچه دانه‌بندی مطالعه موناکادا و آگویر (۱۶)، بیشتر از ذرات متوسط مصالح (برابر با ۰/۹) می‌باشد ولی چسبندگی بین ذرات در تحقیق حاضر تأثیر مستقیم بر روند آبستگي گذاشته و مقدار عمق آبستگي را کاهش داده است.

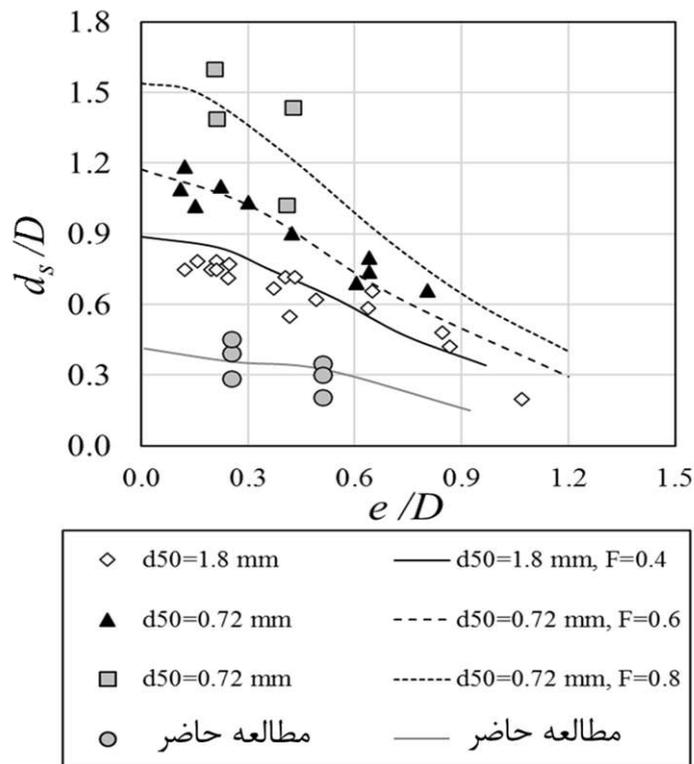
تخمین آبستگي

با هدف ارایه رابطه با توجه به رابطه (۴)، با در نظر گرفتن

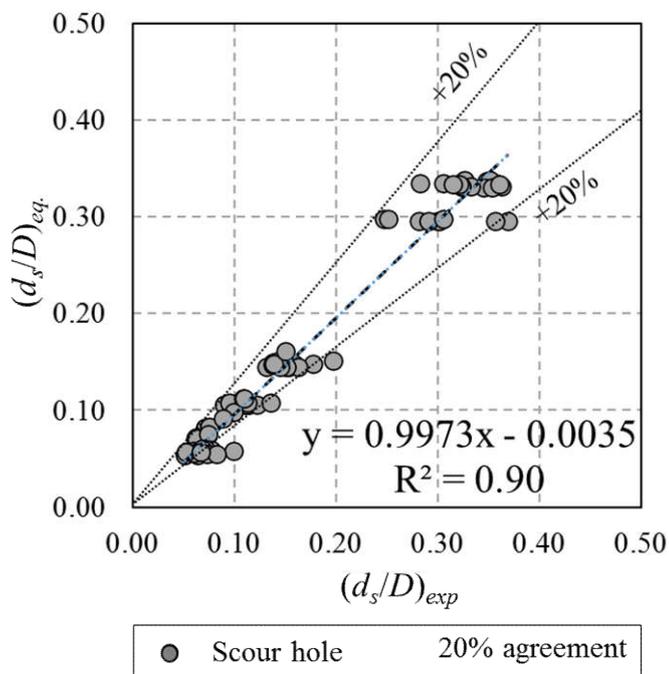
رابطه (۸) (معادله صفحه) و همچنین استفاده از تابع رگرسیون غیر خطی در نرم افزار Mathematical، رابطه‌ای در جهت تخمین میزان عمق آبستگي با استفاده از پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی ارایه شد. ضرایب این رابطه در قالب رابطه (۹) ارایه شده است. همچنین در جهت بررسی میزان دقت رابطه مقادیر تخمین زده شده از رابطه (۹) و مقادیر واقعی در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. مقایسه‌ها نشان داد رابطه (۹)، تخمین قابل قبولی برای میزان عمق آبستگي ماکزیمم در خطوط لوله با انحراف و فاصله از کف در بستر چسبنده دارد. لازم به ذکر است ضرایب معادله بر اساس تکنیک رگرسیون غیر خطی به ازای معادلات مختلف ریاضی در نرم‌افزارهای آماری قابل استخراج می‌باشند.

$$\left(\frac{d_s}{D}\right)_{eq} = C_1 \left(\frac{e}{DCos(\alpha C)}\right)^{C_2} + C_3 \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{C_4} + C_5 (Fr)^{C_6} + C_7 \left(\frac{C}{\tau}\right)^{C_7} + C_8 \quad (8)$$

$$\left(\frac{d_s}{D}\right)_{eq} = 0.03 \left(\frac{e}{DCos(\alpha C)}\right)^{0.11} + 4.1 \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^1 + 0.4 (Fr)^{0.1} + 0.04 \left(\frac{C}{\tau}\right)^{1.1} - 0.5 \quad (9)$$



شکل ۱۵. مقایسه فاصله لوله تا بستر رسوبی در خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده با استفاده از مطالعه موناکادا و همکاران (۱۶) (F میزان عدد فرود است)



شکل ۱۶. میزان دقت رابطه (۹) برای تخمین عمق آبستگي

نتیجه گیری

لوله‌هایی با فاصله کمتر از بستر در فاصله دورتری نسبت به گردابه‌های شکل گرفته در پشت لوله‌های با فاصله بیشتر از بستر به بستر برخورد می‌کنند.

۳) از سوی دیگر برای لوله‌های با زاویه برخورد ۱۵ و ۳۰ درجه در سراسر کانال بیشینه عمق آبستگي در دیوار سمت راست اتفاق می‌افتد چون تغییر جهت جریان توسط لوله‌های زاویه‌دار یک فشار متفاوت بین بالادست و پایین دست لوله ایجاد می‌کند و باعث حرکت و تغییر مکان رسوبات به سمت راست می‌شوند.

۴) با افزایش زاویه برخورد فرآیند گردابه‌فکنی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد در نتیجه عمق آبستگي کاهش می‌یابد.

۵) قطر لوله بر میزان عمق آبستگي تأثیر دارد، به طوری که با افزایش قطر لوله عمق گودال آبستگي نیز افزایش می‌یابد و ریپل تشکیل شده در پایین دست لوله بیشتر گسترش یافته است و هرچه قطر لوله افزایش می‌یابد، عمق آبستگي نیز بدلیل تأثیری که روی جریان به سمت پایین و جریان‌های گردابی می‌گذارد، افزایش می‌یابد.

در این پژوهش مشخصات حفره آبستگي موضعی زیر لوله‌های مستغرق تحت تأثیر تغییرات قطر، فاصله از کف و زاویه قرارگیری لوله به صورت آزمایشگاهی در رسوبات چسبنده و آب زلال مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به یافته‌های این تحقیق، نتایج حاصله بطور خلاصه به شرح زیر است:

۱) با افزایش فاصله لوله از بستر بیشینه عمق آبستگي ناشی از گردابه‌های برخاستگی کاهش می‌یابد علت این امر این است که با افزایش فاصله لوله از بستر گردابه‌های شکل گرفته از بالا و پایین لوله عبور می‌کنند و گردابه‌های شکل گرفته کوچک‌تر می‌شود و با قدرت کمتری به بستر برخورد می‌کنند اما در حالت مماس بر بستر گردابه‌ها بیشتر از بالای لوله عبور کرده که قابلیت انتقال رسوبات بیشتری را خواهند داشت بنابراین، عمق گودال آبستگي ناشی از گردابه‌های برخاستگی در این حالت عمیق‌تر خواهد بود.

۲) با کاهش فاصله از بستر موقعیت بیشینه عمق آبستگي در پایین دست لوله ناشی از گردابه‌های برخاستگی از نزدیکی لوله به سمت پایین دست پیشروی می‌کند علت این امر شاید بدین دلیل است که گردابه‌های شکل گرفته در پشت

منابع مورد استفاده

1. Ataiean, A. and M. Yasi. 2011. Local scour hole under the pipe line junction by river. *In: 11th Iran Hydraulic Conference, Urmia university, Iran (In Farsi).*
2. Bahrami, H., A. Hasnan Zadeh and D. Farsadi Zadeh. 2016. Controlling the scour hole under the submerged pipe line with submerged plates under the one direction flow. *Water and Soil Science*. 26(2): 179-190 (In Farsi).
3. Bijker, E. W. and W. Leeuwestein. 1984. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents. PP. 235-242. *In: Denness, B. (ed.). Seabed Mechanics, Springer, Dordrecht.*
4. Breusers, H. and A. J. Raudkivi. 1991. Vol. 2 of Scouring: Hydraulic Structures Design Manual Series. Taylor and Francis. Rotterdam, Netherlands.
5. Cheng, X. F., Y. X. Wang and G. Y. Wang. 2011. The Effect of the seabed proximity on the hydrodynamic forces of the piggyback pipeline under wave action. *In: 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam.*
6. Chiew, Y. M. 1991. Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 117(4): 452-466.
7. Day, S. and N. Singh. 2008. Clear-Water scour below underwater pipelines under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 134(5): 588-600.

8. Fredsoe, J., B. M. Sumer and M. M. Arnskov. 1991. Time scale for wave/current scour below pipelines. *In: The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, Edinburgh, The United Kingdom.
9. Guan, D., B. W. Melville and H. Friedrich. 2014. Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering* 140(1): 68-76.
10. Guan, D., B.W. Melville and H. Friedrich. 2015. Live-Bed Scour at Submerged Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 141(2): 04014071-12.
11. Ibrahim, A. and C. Nalluri 1986. Scour prediction around marine pipelines. *In: International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*. Tokyo, Japan.
12. Kabiri, Sh., and A. Hasan Zadeh. 2010. Controlling the scour hole under the submerged flow with using tail water approach. *In: 9th International Conference of Harbor and Ocean Structure*, Tabriz university, Iran (In Farsi).
13. Kabiri, Sh., A. Hasan Zadeh, F. Salmasi, D. Farsadi Zadeh and F. Eshtiagh. 2011. Effect of pipe roughness on scouring under submerged pipes under one-way flow and investigation of scour control. *In: 6th National Civil Conference*, Semnan University, Semnan, Iran (In Farsi).
14. Kjeldsen, S. P., O. Gjørsvik, K. G. Bringaker and J. Jacobsen. 1973. Local scour near offshore pipelines. *In: Proceedings of the 2nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, University of Iceland.
15. Melville, B. W. 1984. Live-bed scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 110(9):1234-1247.
16. Moncada, A. T. and J. Aguirre-Pe. 1999. Scour below pipeline in river crossings. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(9):953-958 .
17. Salehi, S. and A. H. Azimi. 2019. Discharge Characteristics of Weir-Orifice and Weir-Gate Structures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 145(11): 04019025.
18. Salehi, S., K. Esmaili and A. H. Azimi. 2019. Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 66: 99-110.
19. Voropayev, S. I., F. Y Testik, H. J. S. Fernando and D. L. Boyer. 2003. Burial and scour around short cylinder under progressive shoaling waves. *Ocean Engineering* 30(13): 1647-1667.
20. Zang, Z., Y. Chen, J. Zhang, Y. Tian and M. D. Esteban. 2021. Experimental study on local scour and onset of VIV of a pipeline on a silty seabed under steady currents. *Applied Ocean Research* 109: 102560.

Effect of Angle, Height of Support and Pipe Line Diameter Size on Scour Hole

N. Alami¹, M. Saneie^{2*} and H. Haji Kandi³

(Received: December 15-2020; Accepted: June 13-2021)

Abstract

Scouring holes under the oil, gas, and water pipelines threaten their stability by bending and demolishing. This phenomenon can cause damage to the environment and the oil and gas industry. The present study investigated the effect of the pipe diameter, the height of support, and the angle of the pipeline with flow direction by applying the experimental aspects to the cohesive sediments. The experiments were carried out by considering three angles of deviation as zero, 15, and 30 degree based on the flow direction. Three opening gaps were considered through the experiments based on the pipe height as 0, $D/2$, and $D/4$ from the sand bed. Furthermore, three pipe diameters were employed to investigate the effect of diameter size. The results indicated that by increasing the angle of deviation, the height of scour hole decreased significantly, however, the raising the opening gap between pipe and bed increased the sediment deposition and it causes the height of scour hole is decreased consequently which was constituted approximately 18 percent. Moreover, the pipe diameter affects the scour hole formation and its effect on a downward jet and horseshoe vortexes and the result indicate by increasing the pipe diameter the scour hole is increased based on its effect on the flow configuration. Finally, based on the experimental data, an equation was estimated to predict the scour depth by employing the non-linear regression technique.

Keywords: Scour hole, Pipe diameter, Angle of deviation, Submerged pipe line, Cohesive sediment, Fitting equation

1. Department of Water Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran.

3. Department of Water Civil Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: saneie_m@scwmri.ac.ir