

مدل‌سازی فیزیکی آبشستگی زیر لوله‌های مستغرق منفرد و دوتایی

ادیب حاج‌محمدی^۱، محمد ذونعمت کرمانی^{۲*} و مجید رحیم‌پور^۲

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و دانشیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۱۱

چکیده

آبشستگی موضعی در اطراف لوله‌های عبوری از بستر رودخانه‌ها به دلیل تحمل خسارت‌های زیاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی که در پی دارد همواره مورد توجه محققان و طراحان این سازه‌ها بوده است. این پژوهش با هدف بررسی جامع الگوی جریان، مکانیزم آبشستگی و توسعه زمانی چاله آبشستگی در اطراف لوله‌های مستغرق تحت جریان یک‌سویه، در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان اجرا شد. آزمایش‌ها برای دو حالت لوله منفرد و دوتایی موازی در فاصله‌های مختلف از یکدیگر و در شرایط هیدرولیکی متفاوت صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که در اثر برخورد جریان با لوله منفرد، فرآیند آبشستگی با شکل‌گیری یک جریان نشستی زیرسطحی از بالادست به سمت پایین دست لوله آغاز می‌شود و بعد از آن شکل‌گیری فرسایش تونلی و عبور جت جریان از زیر لوله عامل اصلی توسعه طولی و عمقی چاله آبشستگی است. در حالت دوتایی موازی، بسته به فاصله بین دو لوله، پروفیل‌های مختلفی برای چاله آبشستگی مشاهده می‌شود. نشان داده شد که با تغییر فاصله نسبی بین دو لوله از $S/D=0$ به $S/D=2$ ، حداکثر عمق آبشستگی برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۵۰ درصد و ۴۴ درصد افزایش می‌یابد. در این حالت (دوتایی)، اندرکنش جریان و لوله‌ها، سبب تضعیف گردابه‌های تشکیل شده در اطراف لوله‌ها می‌شود و بدین ترتیب عمق آبشستگی، در مقایسه با حالت لوله منفرد، کمتر است به طوری که حداکثر عمق آبشستگی در حالت لوله منفرد، $1/27$ برابر مقدار متناظر آن در حالت لوله‌های دوتایی است.

واژه‌های کلیدی

آبشستگی موضعی، الگوی جریان، لوله‌های مستغرق، مدل آزمایشگاهی

مقدمه

بستر رسوبی شکل می‌گیرد که به بزرگتر شدن ابعاد چاله آبشستگی در زیر لوله می‌انجامد. این پدیده می‌تواند منجر به گسیختگی لوله و ایجاد زیان‌های متعدد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی شود. بنابراین، بررسی عوامل موثر بر آبشستگی اطراف لوله‌های عبوری از بستر رودخانه‌ها و نحوه شکل‌گیری و گسترش گودال آبشستگی برای طراحان اهمیت زیادی دارد. بررسی منابع نشان می‌دهد که تا کنون مطالعات برای بررسی الگوی جریان و رسوب در اطراف لوله‌های عبوری از رودخانه‌ها محدود بوده

عبور لوله‌های انتقال سیال از بستر رودخانه، ضمن تغییر در الگوی جریان، سبب ایجاد آبشستگی موضعی در زیر این سازه‌ها می‌شود و پایداری آنها را تهدید می‌کند. در اثر برخورد جریان رودخانه با لوله، یک جریان رو به پایین در وجه بالادست لوله شکل می‌گیرد که سبب جدا شدن ذرات رسوب از بستر رودخانه و انتقال آنها به سمت پایین دست می‌شود. رسوبات زیر لوله به تدریج شسته می‌شود و یک جت جریان آب در فضای خالی بین لوله و

است. که h عمق جریان نزدیک‌شونده و D قطر لوله است. در شرایط استفاده از رسوبات غیر یکنواخت، عمق آبستگی به سبب ایجاد لایه پوششی روی بستر، کاهش می‌یابد.

عظمت‌الله و یوسف (Azamathulla & Yusoff, 2013) تأثیر زاویه قرارگیری لوله‌های مستغرق را بر آبستگی موضعی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و با تعیین تغییرات زمانی آبستگی خطوط لوله، رابطه‌ای رگرسیونی برای محاسبه عمق آبستگی در زیر لوله ارائه دادند. ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2015) آبستگی موضعی و توسعه زمانی حفره آبستگی را در اطراف لوله‌های دوتائی مشابه متوالی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای دو حالت آبستگی آب زلال و بستر زنده، عمق آبستگی در زیر لوله پایین‌دست بزرگتر از عمق آبستگی در لوله بالادست است. بیشترین عمق آبستگی در زیر لوله پایین‌دست هنگامی اتفاق افتاده که فاصله دو لوله $2/5$ برابر قطر لوله بوده است. حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2006) با بررسی آبستگی موضعی در اطراف خطوط لوله به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر لوله، عمق آبستگی و زمان تعادل آبستگی افزایش می‌یابد. همچنین، عمق نسبی گودال آبستگی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. خواجه‌زاد و همکاران (Khajehzad *et al.*, 2012) با بررسی الگوی جریان و آبستگی در اطراف لوله‌های مستغرق، تأثیر پارامترهای مختلف نظیر پوشش گیاهی، فاصله لوله‌ها نسبت به یکدیگر و تغییر عمق آب را روی آبستگی بررسی کردند؛ نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش عمق آب و فاصله دو لوله نسبت به هم، عمق آبستگی نیز افزایش می‌یابد. این محققان بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، روابطی برای تخمین تأثیر میزان تراکم پوشش گیاهی بر عمق آبستگی ارائه دادند و با بررسی فاصله‌های مختلف لوله‌ها نسبت به هم، نشان دادند که فاصله افقی $3d$ (د قطر لوله)

است. کیجلدسن و همکاران (Kjeldsen *et al.*, 1973) آبستگی موضعی در زیر لوله در جریان یک سوپه را بررسی و روابطی برای محاسبه عمق آبستگی ارائه کردند. چيو (Chiew, 1990) مکانیزم آبستگی اطراف خطوط لوله‌هایی را که از بستر دریا عبور می‌کنند بررسی کرده است. نتایج آزمایش‌های وی نشان می‌دهد که علت اصلی آبستگی، پدیده رگاب است. در اثر این پدیده، اختلاف فشار میان بالادست و پایین‌دست لوله، سبب نشت جریان از زیر لوله می‌شود. وی همچنین می‌گوید اگر نسبت عمق جریان به قطر لوله بیش از $3/5$ باشد، فرآیند آبستگی تونلی در زیر لوله شروع می‌شود که طی آن، حجم وسیعی از رسوبات از زیر لوله شسته می‌شود. مونکادا و همکاران (Moncada & Aguirre-Pe, 1999) آبستگی خطوط لوله را برای دو نوع رسوب مختلف و رقوم مختلف قرارگیری لوله از بستر به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش فاصله لوله از بستر، عمق آبستگی کم می‌شود. مشاهدات این محققان نشان می‌دهد که عدد رینولدز جریان تأثیر چندانی بر عمق آبستگی ندارد؛ آنها همچنین گزارش داده‌اند که با افزایش عدد فرود، عمق آبستگی افزایش می‌یابد. دی و سینگ (Dey & Singh, 2008) به بررسی آبستگی آب زلال زیر خطوط لوله با 5 قطر مختلف، در دو حالت رسوبات یکنواخت و رسوبات غیر یکنواخت پرداختند و تأثیر شکل سطح مقطع لوله را بر عمق آبستگی و همچنین نیمرخ آبستگی را در زمان‌های مختلف مطالعه کردند و ضریبی به نام فاکتور شکل را برای مقاطع دایره‌ای، مربعی با زاویه 45 درجه و مربعی با زاویه 90 درجه به دست آوردند. این محققان به این نتیجه رسیدند که عمق آبستگی در جریان‌های کم عمق با افزایش عمق جریان نزدیک‌شونده تا محدوده $h/D > 5$ ، افزایش می‌یابد

سرعت گسترش نسبت به عدد فرود بسیار حساس است ولی نسبت به پارامتر شیلدز حساسیت چندانی ندارد. با توجه به بررسی منابعی که در بالا توضیح داده شد، مشخص می‌شود که پژوهش‌های آبشستگی زیر لوله‌های مستغرق، تا کنون عمدتاً به مطالعه کلی فرآیند آبشستگی در زیر لوله منفرد و بررسی پارامترهای فاصله لوله از بستر و زاویه قرارگیری لوله اختصاص داشته است. در پژوهش حاضر، الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی زیر لوله‌ها در دو حالت لوله منفرد و دوتائی و در وضعیت‌های مختلف قرارگیری لوله‌ها در آزمایشگاه بررسی شده است. همچنین، توسعه زمانی چاله آبشستگی حالت‌های مختلف بررسی گردید. علاوه بر این، نیمرخ‌های عمقی توزیع سرعت جریان نزدیک‌شونده در هر حالت اندازه‌گیری و مشخصه‌های هندسی حفره آبشستگی تعیین شد. داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در این پژوهش قابل استفاده برای کالیبراسیون و واسنجی مدل‌های عددی است.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان، در یک فلوم آزمایشگاهی فلزی با دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۸، ارتفاع ۰/۶ و عرض ۰/۸ متر با شیب کف ۰/۰۰۱/۰ دنبال شد. برای اندازه‌گیری سطح آب و سطح رسوبات، از یک عمق سنج نقطه‌ای مکانیکی با دقت اندازه‌گیری $\pm 0/1$ میلی‌متر استفاده شد. دبی با استفاده از یک کنتور حجمی اندازه‌گیری شد که روی لوله ورودی به مخزن بالادست فلوم نصب شده بود. در انتهای فلوم، یک سرریز مستطیلی لبه تیز برای تنظیم ارتفاع آب در فلوم نصب گردید که اندازه‌گیری جریان نیز با آن مقدور بود. برای اندازه‌گیری توزیع عرضی و عمقی سرعت جریان در

بهترین فاصله‌ای است که به کاهش عمق آبشستگی می‌انجامد؛ ماکزیمم عمق آبشستگی در این فاصله افقی برابر ۱/۶ سانتی‌متر است.

ارشاد شب‌خانه و حکیم‌زاده (Arshad-Shabkhaneh & Hakimzadeh, 2015) الگوی جریان اطراف خط لوله منفرد نیمه مدفون را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند و اظهار داشتند که نتایج به دست آمده از اجرای مدل عددی با نتایج تجربی پژوهش آنها و سایر پژوهشگران تطابق نسبتاً خوبی دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش نسبت عمق دفن‌شدگی به قطر لوله، مقادیر طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش عمق دفن‌شدگی، از سرعت‌های بیشینه مثبت در بالای خط لوله و نیز از سرعت‌های بیشینه منفی در محل تشکیل گردابه‌ها کاسته می‌شود. هدایت‌بهرامی و همکاران (Hedayat-Bahrami *et al.*, 2016) تأثیر صفحات مستغرق را بر آبشستگی لوله‌های عبوری از بستر رودخانه به صورت آزمایشگاهی بررسی و مشاهده کردند که با استفاده از صفحه مستغرق، بیشینه عمق گودال آبشستگی و برآمدگی ایجاد شده در پایین‌دست لوله کاهش می‌یابد. همچنین افزایش فاصله لوله از بستر باعث می‌شود که گردابه‌های شکل گرفته در بالا و پایین لوله کمتر شوند، با قدرت کمتری به رسوبات برخورد کنند، و بدین ترتیب بیشینه عمق آبشستگی کاهش یابد. وو و چو (Wu & Chiew, 2010) به منظور مطالعه سرعت توسعه حفره آبشستگی در زیر خط لوله در شرایط بستر با رسوبات ماسه‌ای یکنواخت، به آزمایش‌هایی دست زدند و بر مبنای مشاهدات خود، گسترش سه بعدی خط لوله را به دو فاز سریع و کند تقسیم و اعلام کردند که در فاز سریع، گسترش حفره آبشستگی تند و سرعت آن ثابت است. در فاز کند، گسترش حفره کندتر و سرعت آن پایین است. همچنین،

مقاطع مختلف از سرعت‌سنج میکروپروپلر نیکسون با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد (شکل ۱). برای اندازه‌گیری سرعت در هر عمق، با قرار دادن پره سرعت‌سنج در آن نقطه، سرعت نقطه‌ای برداشت شد. جدول ۱ شبکه و زمان داده‌برداری سرعت را برای آزمایش‌های این پژوهش نشان می‌دهد.

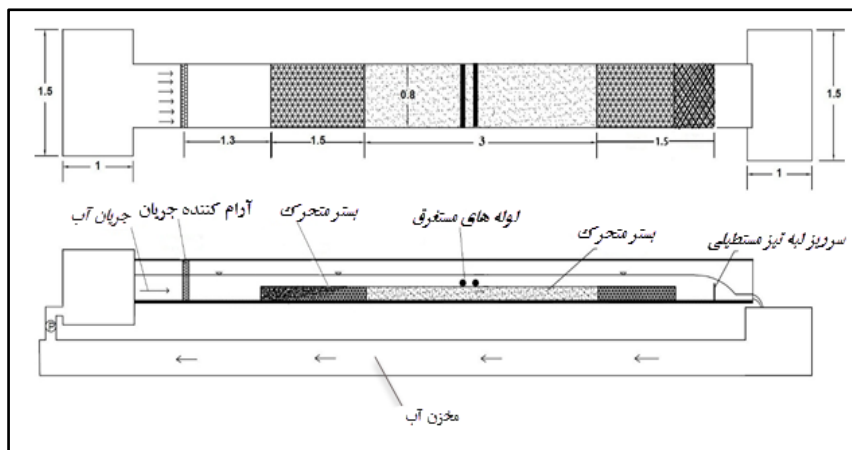


شکل ۱- سرعت‌سنج

جدول ۱- شبکه و زمان داده‌برداری سرعت

زمان (ثانیه)	y (متر)	X (متر)
بعد از زمان تعادل	۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶	-۱۰۰
بعد از زمان تعادل	۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶	-۳
بعد از زمان تعادل	۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶	+۳

در این جدول، پارامتر x فاصله افقی مرکز لوله اول را از محل اندازه‌گیری سرعت، پارامتر y اعماق اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای و پارامتر t زمان اندازه‌گیری سرعت را نشان می‌دهد. برای کاستن از تلاطم جریان ورودی به فلوم، یکسری صفحات مشبک در ابتدای ورودی فلوم به‌عنوان آرام‌کننده جریان تعبیه شد. همچنین، در بالادست و پایین‌دست بازه رسوبی مورد مطالعه، بسترهای کاذب نصب شد. شکل ۲ طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی و جانمایی مدل لوله‌ها را در بستر رسوبی نشان می‌دهد.

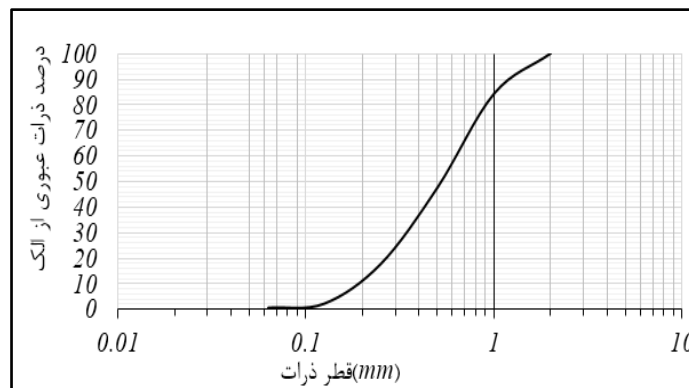


شکل ۲- طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی و جانمایی مدل لوله‌ها در بستر رسوبی

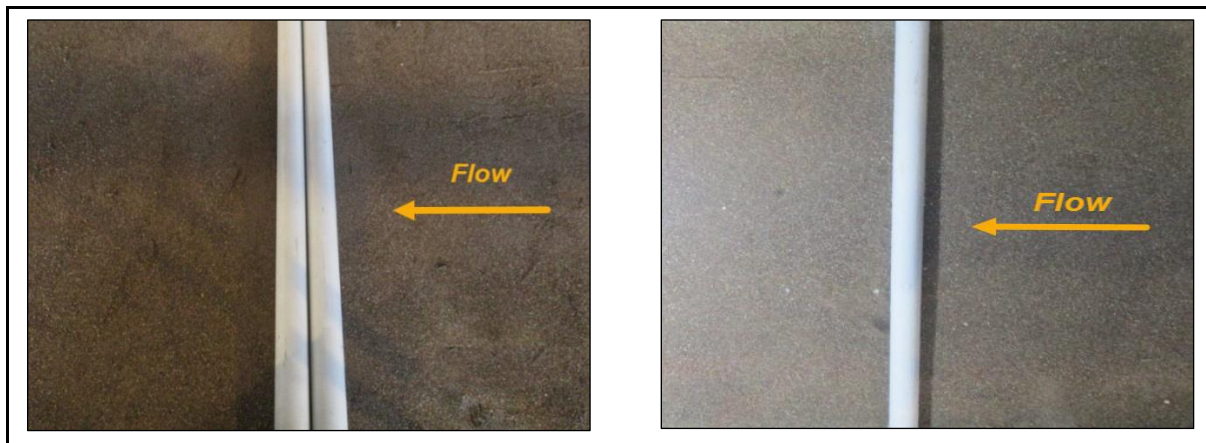
مدل‌سازی فیزیکی آبشستگی زیر لوله‌های مستغرق...

استفاده گردید. مدل لوله‌ها با چسب آکواریوم به دیواره کانال چسبانده شد. لوله‌ها در فاصله ۵ متری از ابتدای ورودی کانال تعبیه شدند تا اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان در فلوم فراهم شده باشد. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب منحنی دانه‌بندی رسوبات و نحوه قرارگیری لوله در فلوم را پیش از آغاز آزمایش‌ها نشان می‌دهد.

در این پژوهش، از مصالح با اندازه متوسط $D_{50} = 0.52$ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی $\sigma_g = 2.13$ ضریب یکنواختی $C_u = 3.31$ و ضریب انحراف $C_c = 1.02$ به‌عنوان مشخصات رسوبات بستر استفاده شد. همچنین، از لوله‌های پلاستیکی به قطر ۴ و طول ۸۰ سانتی‌متر (هم‌عرض فلوم) از جنس PVC



شکل ۳ - منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده

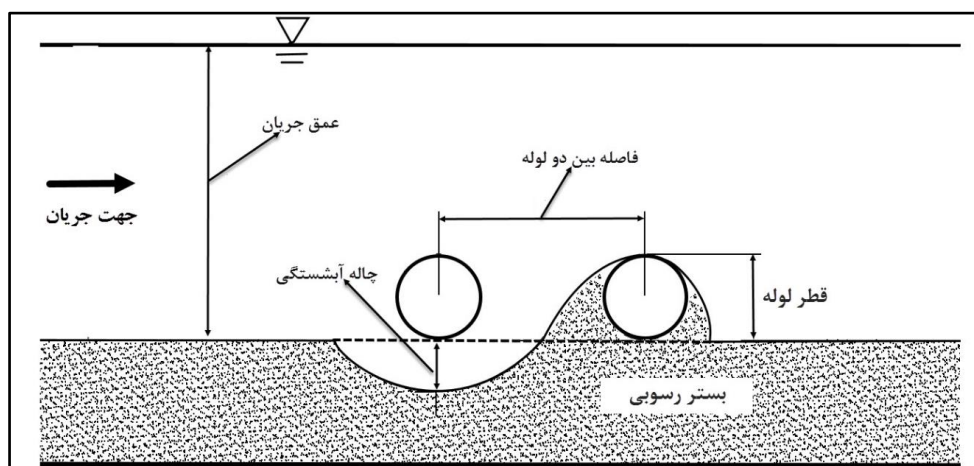


شکل ۴ - قرارگیری لوله‌ها بر بستر در حالت لوله منفرد و دوتایی به هم چسبیده

حفره آبشستگی (d_s) زیر لوله عبارت‌اند از: قطر لوله (D)، فاصله لوله‌ها از یکدیگر (S) قطر میانه رسوبات (d_{50})، عمق جریان (v)، سرعت جریان (V)، شتاب گرانش (g)، چگالی آب (ρ_w)، چگالی رسوب (ρ_s)، ویسکوزیته دینامیکی (μ)، فاصله لوله از بستر (e) و کشش سطحی (σ_g).

تحلیل ابعادی

برای تعیین پارامترهای بدون بعد تأثیرگذار بر آبشستگی زیر لوله‌های عبوری از روی بستر رودخانه، از تحلیل ابعادی استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر حداکثر عمق



شکل ۵- طرح شماتیک بستر رسوبی در اطراف لوله‌های موازی و معرفی پارامترهای معرفی شده در آنالیز ابعادی

بنابراین عدد رینولدز تأثیری بر آزمایش‌های این پژوهش ندارد. پارامتر e فاصله لوله از بستر در تمام آزمایش‌های این تحقیق ثابت و برابر صفر است. طبق موارد فوق، رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ خلاصه می‌شود.

$$\frac{d_s}{D} = \phi\left(\frac{Y}{D}, \frac{S}{D}, Fr\right) \quad (3)$$

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای بی‌بعد رابطه ۳ بر توپوگرافی و حداکثر عمق چاله آبشستگی و توسعه زمانی آن بررسی می‌شود.

روش اجرای آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در دو حالت: الف) لوله منفرد و ب) دوتایی اجرا شد. جریان با ۵ دبی مختلف: ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶ و ۲۸ لیتر بر ثانیه در فلوم برقرار و الگوی آبشستگی در هر حالت بررسی شد. مشخصات آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

حداکثر عمق آبشستگی را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای فوق، مطابق رابطه ۱، بیان کرد:

$$d_s = \phi(D, d_{50}, Y, V, g, \rho_w, \rho_s, \sigma_g, \mu, S, e) \quad (1)$$

با استفاده از قضیه π باکینگهام، متغیرهای بیان شده در رابطه ۱ را می‌توان به فرم پارامترهای بدون بعد و به صورت رابطه ۲ ارائه داد:

$$\frac{d_s}{D} = \phi\left(\frac{Y}{D}, \frac{S}{D}, \frac{e}{D}, G_s, W_e, R_e, Fr\right) \quad (2)$$

در رابطه ۲، با توجه به اینکه نوع رسوبات مورد استفاده یکسان است، پارامتر G_s در تمام آزمایش‌های این پژوهش ثابت است و تأثیر آن در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین، شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها به گونه‌ای است که عدد وبر تأثیری بر فرایند آبشستگی نداشته است. علاوه بر این، در تمامی آزمایش‌ها جریان متلاطم بوده و

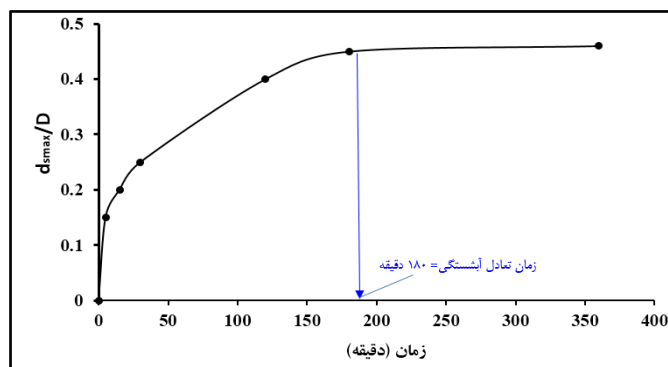
جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی و هندسی آزمایش‌ها

فاصله لوله‌ها	Fr_d	$\frac{V}{V_c}$	Y (cm)	Fr	تعداد لوله	آزمایش	فاصله لوله‌ها	Fr_d	$\frac{V}{V_c}$	Y (cm)	Fr	تعداد لوله	آزمایش
۰/۵D	۰/۸۲۳	۰/۴۱۳	۱۴/۸	۰/۱۵۴	۲	R14	-	۰/۹۵۲	۰/۴۸	۱۶/۳	۰/۱۷	۱	R1
۰/۵D	۰/۷۶۱	۰/۳۸۲	۱۴/۵	۰/۱۴۴	۲	R15	-	۰/۹۲۹	۰/۴۶۷	۱۵/۷	۰/۱۶۵	۱	R2
D	۰/۹۵۲	۰/۴۸	۱۶/۳	۰/۱۷	۲	R16	-	۰/۸۷۲	۰/۴۳۷	۱۵/۲	۰/۱۶۱	۱	R3
D	۰/۹۲۹	۰/۴۶۷	۱۵/۷	۰/۱۶۵	۲	R17	-	۰/۸۲۳	۰/۴۱۳	۱۴/۸	۰/۱۵۴	۱	R4
D	۰/۸۷۲	۰/۴۳۷	۱۵/۲	۰/۱۶۱	۲	R18	-	۰/۷۶۱	۰/۳۸۲	۱۴/۵	۰/۱۴۴	۱	R5
D	۰/۸۲۳	۰/۴۱۳	۱۴/۸	۰/۱۵۴	۲	R19	.	۰/۹۵۲	۰/۴۸	۱۶/۳	۰/۱۷	۲	R6
D	۰/۷۶۱	۰/۳۸۲	۱۴/۵	۰/۱۴۴	۲	R20	.	۰/۹۲۹	۰/۴۶۷	۱۵/۷	۰/۱۶۵	۲	R7
۲D	۰/۹۵۲	۰/۴۸	۱۶/۳	۰/۱۷	۲	R21	.	۰/۸۷۲	۰/۴۳۷	۱۵/۲	۰/۱۶۱	۲	R8
۲D	۰/۹۲۹	۰/۴۶۷	۱۵/۷	۰/۱۶۵	۲	R22	.	۰/۸۲۳	۰/۴۱۳	۱۴/۸	۰/۱۵۴	۲	R9
۲D	۰/۸۷۲	۰/۴۳۷	۱۵/۲	۰/۱۶۱	۲	R23	.	۰/۷۶۱	۰/۳۸۲	۱۴/۵	۰/۱۴۴	۲	R10
۲D	۰/۸۲۳	۰/۴۱۳	۱۴/۸	۰/۱۵۴	۲	R24	۰/۵D	۰/۹۵۲	۰/۴۸	۱۶/۳	۰/۱۷	۲	R11
۲D	۰/۷۶۱	۰/۳۸۲	۱۴/۵	۰/۱۴۴	۲	R25	۰/۵D	۰/۹۲۹	۰/۴۶۷	۱۵/۷	۰/۱۶۵	۲	R12
							۰/۵D	۰/۸۷۲	۰/۴۳۷	۱۵/۲	۰/۱۶۱	۲	R13

* D قطر لوله، Fr عدد فرود جریان، Y عمق جریان، V/V_c نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی، و Fr_d عدد فرود جرمی است.

آبشستگی زیر لوله با عمق‌سنج در فاصله‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری شد. براساس معیار کومار و همکاران (Kumar et al., 1999)، زمان تعادل به این صورت تعریف شد که تغییرات عمق آبشستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد. بدین ترتیب، مطابق با آنچه در شکل ۶ دیده می‌شود، مدت زمان آزمایش‌ها سه ساعت در نظر گرفته شد. در انتهای هر آزمایش، با خاموش کردن پمپ و پس از زهکشی آب باقیمانده در داخل فلوم، عمق آبشستگی اندازه‌گیری و توپوگرافی بستر رسوبی تهیه می‌شد.

قبل از شروع هر آزمایش، بستر رسوبی با استفاده از مالهٔ بنایی مسطح و لوله‌ها در محل مورد نظر تعبیه شد. همچنین، برای حصول اطمینان از افقی بودن لوله، از تراز لیزری استفاده شد. برای جلوگیری از فرسایش ناخواسته ناشی از شکل‌گیری جریان کم‌عمق روی بستر رسوبی، ابتدا فلوم با شیلنگی که به شیر آب متصل بود به آرامی آبدگیری شد و بعد از ایجاد عمق مورد نظر در داخل فلوم (رقوم تاج سرریز انتهایی)، جریان مورد نظر هر آزمایش در فلوم برقرار گردید. دبی جریان با شیر فلکه‌ای تنظیم می‌شد که روی لوله ورودی به مخزن بالادست فلوم قرار داشت. همزمان با شروع آزمایش، توسعهٔ زمانی پروفیل



شکل ۶ - زمان تعادل آبشستگی برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه در فاصله $S/D=1$

نتایج و بحث

همان‌طور که پیش از این گفته شد، هدف از پژوهش حاضر بررسی فرایند آبشستگی در اطراف و زیر خطوط لوله‌های مستغرق در دبی‌های مختلف و آرایش‌های مختلف لوله، از نظر جانمایی و تعداد، است. در ادامه، نتایج مشاهدات آزمایشگاهی ارائه و تحلیل می‌گردد.

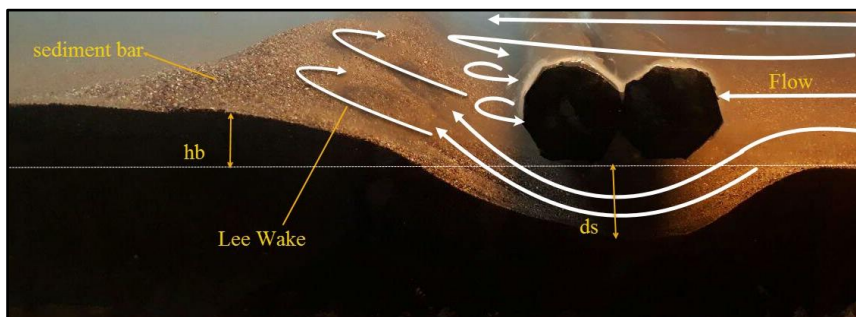
مکانیزم آبشستگی در اطراف لوله‌های مستغرق

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در اثر برخورد جریان با لوله، یک اختلاف فشار میان بالادست و پایین‌دست لوله ایجاد و باعث شکل‌گیری جریان نشتی در زیر لوله گردید. این جریان سبب شسته شدن مواد رسوبی زیر لوله شد و به تدریج فرآیندهای فرسایشی را شدت بخشید. بعد از گذشت زمانی اندک (بین ۲ تا ۴ دقیقه)، جریان نشتی قوی‌تر شد و رسوبات را با شدت بیشتر از زیر لوله شسته به جریان عمومی فلوم تزریق کرد و بدین ترتیب آبشستگی زیر لوله به صورت مشهود اتفاق افتاد. سامر و همکاران (Sumer *et al.*, 2001) از این فرآیند با عنوان پدیده رگاب یاد کردند. از این مرحله به بعد، عامل اصلی آبشستگی زیر لوله، فرسایش تونلی است که بر اثر جت جریان ایجاد شده در زیر لوله روی می‌دهد. جت جریان با سرعت و تنش برشی بالا رسوبات را از زیر لوله می‌شوید و به سمت پایین‌دست منتقل می‌کند. بدین ترتیب عمق و ابعاد چاله آبشستگی بیشتر می‌شود و حجم وسیعی از رسوبات از زیر لوله فرسایش می‌یابد.

در حالت کاربرد لوله‌های دوتائی در فواصل مختلف از

هم، رسوباتی که در اثر آبشستگی لوله بالادست از زیر آن شسته می‌شوند بعد از برخورد با وجه بالادست لوله دوم، سقوط می‌کنند و در مجاورت آن تجمع می‌یابند. تهنشینی رسوبات در وجه بالادست لوله دوم نقش حفاظ را برای آن ایفا می‌کند. علاوه بر این، با شکل‌گیری پشته رسوبی بین لوله‌های دوتائی، جریان تونلی که از زیر لوله اول عبور کند دیگر قادر نیست رسوبات بستر را از حفره آبشستگی ایجاد شده در زیر لوله اول خارج سازد. به همین دلیل در همه آزمایش‌هایی که در آنها لوله‌های دوتائی وجود داشت، حداکثر عمق آبشستگی همواره کمتر از عمق آبشستگی با لوله منفرد بوده است. مقداری از رسوبات شسته شده از زیر لوله اول، تحت تأثیر جریان چرخشی ایجاد شده در وجه پایین‌دست لوله دوم، تهنشین می‌شود و بدین ترتیب لوله‌ای که در پایین‌دست قرار دارد کاملاً در مقابل آبشستگی محفوظ می‌ماند. این پدیده را دی و سینگ (Dey & Singh, 2008) نیز گزارش داده‌اند.

در شکل ۷، نیمرخ طولی حفره آبشستگی در حالت لوله‌های دوتائی با فاصله $S/D=0$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، جریان در برخورد با لوله‌ها به دو قسمت تفکیک می‌شود. یک دسته از خطوط جریان بعد از برخورد به لوله، به صورت جریان پایین‌رونده به بستر رسوبی برخورد می‌کنند و بعد از فرسایش بستر رسوبی در زیر لوله‌ها، یک جت جریان تشکیل می‌دهند که رسوبات را با شدت زیادی می‌شویند و به سمت پایین‌دست منتقل می‌کنند. نتیجه این فرایند، گسترش حفره آبشستگی در زیر لوله‌ها و ایجاد تپه‌ای رسوبی و یکنواخت در پایین‌دست است.

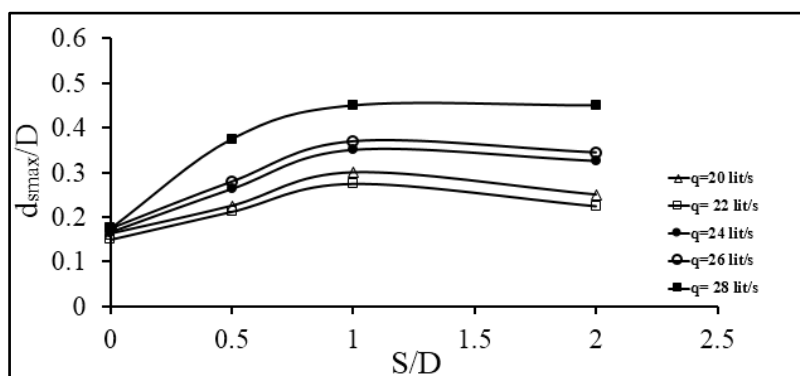


شکل ۷- گردابه‌های تشکیل شده بر پایه مشاهدات آزمایشگاهی برای لوله‌های دوتائی به هم چسبیده

در مقایسه با آزمایش‌های دیگر، رخ می‌دهد. با افزایش فاصله بین لوله‌های دوتائی تا مقدار $S/D=1$ ، به دلیل ایجاد پشته رسوبی در بین لوله‌های دوتائی، انحراف خطوط جریان بعد از عبور از لوله اول شدیدتر می‌شود و فرآیند جدا کردن ذرات رسوب از بستر تا عمق بیشتری ادامه می‌یابد. همچنین، کم بودن فاصله بین لوله‌های دوتائی موجب انقباض جریان بین لوله‌های دوتائی و در نتیجه افزایش سرعت و تنش برشی جت جریان عبوری از بین لوله‌ها می‌شود و بدین ترتیب عمق آبستگی در زیر لوله اول افزایش می‌یابد. در محدوده $S/D=1$ تا $S/D=2$ ، جت جریان خروجی از بین دو لوله فضای کافی برای پیوستن به جریان عمومی فلوم دارد و به همین دلیل تغییر چندانی در عمق آبستگی زیر لوله اول مشاهده نمی‌شود و عمق آبستگی در مقدار $0/45$ ثابت مانده است. با مشاهده شکل ۸ مشخص می‌شود که با افزایش دبی جریان، عمق آبستگی نیز در همه فواصل نسبی بین لوله‌های دوتائی افزایش یافته است. روند تغییرات عمق آبستگی زیر لوله اول در مقابل تغییرات فاصله نسبی لوله‌های دوتائی برای سایر دبی‌های جریان، با دبی‌های رسم شده در شکل مشابه است.

تأثیر فاصله دو لوله بر ابعاد چاله آبستگی و نمودار توزیع سرعت جریان

با تغییر فاصله بین لوله‌های دوتائی، الگوی جریان و آبستگی به شدت تحت تأثیر قرار گرفت و وضعیت‌های متفاوتی در اطراف لوله ایجاد شد. در این پژوهش، چهار فاصله نسبی لوله‌ها از هم $(0, 0/5, 1, 2)$ در نظر گرفته شد و در هر حالت حداکثر عمق آبستگی ایجاد شده در مرکز زیر لوله اول و حداکثر ارتفاع پشته آبستگی اندازه‌گیری شد، شکل ۸ روند تغییرات حداکثر عمق آبستگی لوله اول را در مقابل تغییر فاصله بین لوله‌های دوتائی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش فاصله بین لوله‌های دوتائی تا $S/D=1$ ، عمق آبستگی برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه تا $0/45$ افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر فاصله بین لوله‌های دوتائی برای محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، عمق آبستگی در مقدار $0/45$ ثابت باقی می‌ماند. در حالتی که لوله‌ها به صورت دوتائی به هم متصل‌اند، طول مسیری که جریان نشستی باید طی کند بیشتر از حالت لوله منفرد است. به همین دلیل، در حالت لوله‌های دوتائی متصل به هم، فرآیند شروع آبستگی تونلی با یک تأخیر زمانی بیشتری،

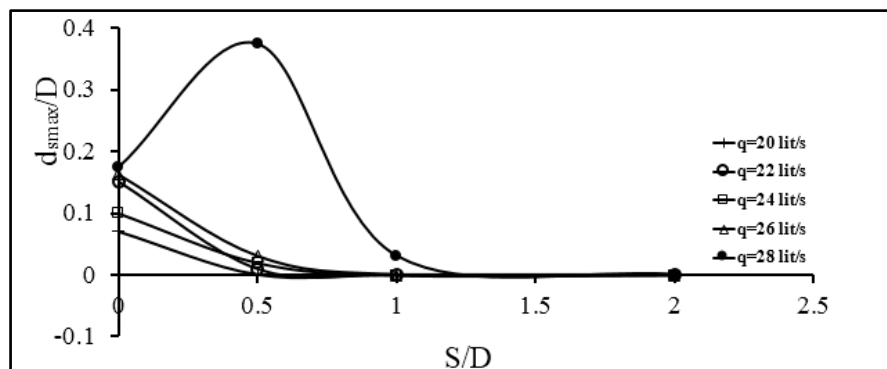


شکل ۸- تغییرات عمق آبشستگی لوله‌های مستغرق در فواصل مختلف

می‌رسد با افزایش فاصله بین لوله‌های دوتائی، مقداری آب به‌صورت ساکن در این فاصله تجمع می‌یابد که گرادیان هیدرولیکی را در دو طرف لوله پایین‌دست کاهش می‌دهد و از تبدیل جریان نشستی به جریان انتقالی در زیر لوله دوم جلوگیری می‌کند. در فاصله $S/D=0.5$ برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه آبشستگی در زیر لوله دوم افزایش یافته است دلیل این مسئله این است که در این فاصله، با توجه به فاصله نزدیک‌تر لوله‌ها به‌صورت دوتائی (نسبت به حالت $S/D=1$)، وقتی جت جریان از زیر لوله اول عبور می‌کند جریان مستقیماً به لوله دوم برخورد خواهد کرد و پشته رسوبی بین دو لوله شسته می‌شود و آبشستگی بیشتری زیر لوله دوم رخ می‌دهد.

حداکثر عمق آبشستگی زیر لوله دوم

تغییرات عمق آبشستگی در زیر لوله دوم (پایین‌دست)، نسبت به فاصله بین لوله‌ها، در شکل ۹ نشان داده شده است. مکانیزم آبشستگی در این حالت تا حد زیادی متفاوت با لوله اول است. در این حالت، بیشترین عمق آبشستگی در حالتی مشاهده می‌شود که لوله‌های دوتائی به هم چسبیده‌اند. با افزایش فاصله لوله‌های دوتائی، عمق آبشستگی در محدوده $S/D=1$ تا $S/D=2$ کاهش می‌یابد و نهایتاً برای فاصله نسبی $S/D=2$ به صفر می‌رسد. در حالت $S/D=2$ ، جت‌های جریان که رسوبات را از زیر لوله اول می‌شوید و به جریان عمومی فلوم تزریق می‌کند، قادر به فرسایش رسوبات زیر لوله دوم نیست و بدین ترتیب آبشستگی در اطراف لوله دوم اتفاق نمی‌افتد. به‌نظر



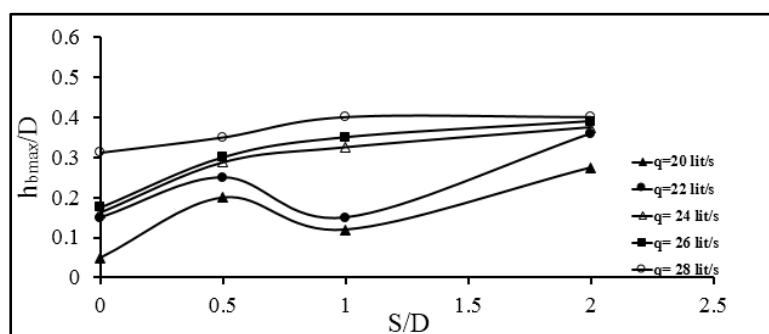
شکل ۹- حداکثر عمق آبشستگی لوله دوم در فاصله‌های مختلف

ارتفاع پشته رسوبی

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در همه آزمایش‌ها یک پشته رسوبی در بین لوله‌ها به صورت دوتائی شکل می‌گیرد که در سرتاسر عرض فلوم دارای ارتفاع یکسانی است. این پشته رسوبی به مانند حفاظی عمل می‌کند که لوله پایین دست را در مقابل آبشستگی حفظ می‌کند. شکل ۱۰ تأثیر فاصله نسبی بین لوله‌های دوتائی را بر ارتفاع پشته رسوبی تشکیل شده بین آنها برای جریان‌های ۲۰ تا ۲۸ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان ارتفاع نسبی پشته رسوبی در همه فواصل نسبی بین لوله‌های دوتائی نیز افزایش پیدا می‌کند به طوری که ارتفاع نسبی پشته رسوبی برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه حدود ۶ برابر بیشتر از ارتفاع نسبی پشته رسوبی برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه در حالت $S/D=0$ است. همچنین، طول نسبی پشته رسوبی برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه در حالت $S/D=0$ در مقایسه با حالت $S/D=0.5$ حدود ۲۰ درصد افزایش نشان می‌دهد. به‌طور کلی، با افزایش مقدار S/D تا

$S/D=1$ ، ارتفاع پشته رسوبی افزایش می‌یابد ولی برای فواصل نسبی بیشتر، ارتفاع پشته رسوبی به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. در حالت $S/D=0, 0.5$ برای همه دبی‌ها در پایین دست لوله دوم تپه رسوبی تشکیل شده است. در حالت $S/D=1, 2$ برای همه دبی‌ها محل شکل‌گیری پشته رسوبی بین لوله‌های دوتائی بوده است. در حالت دوم، برای دبی‌های کم، جت جریانی که از زیر لوله اول عبور کرده و از بین دو لوله مسیر خود را به سمت پایین دست ادامه داده است قدرت فرسایش کمتری، در مقایسه با جت جریان ایجاد شده در دبی‌های بالا، داشته است. بنابراین در دبی‌های کم، رسوب کمتری از زیر لوله اول فرسایش یافته که به صورت پشته رسوبی با ارتفاع کمتر خودش را نشان داده است. در این دبی‌ها وقتی S/D افزایش یابد، سطح مقطع وسیع‌تری از جریان در بین لوله‌های دوتائی شکل می‌گیرد و جریان بیشتری از بین دو لوله عبور می‌کند که می‌تواند رسوبات بیشتری را از زیر لوله اول بشوید و پشته رسوبی را با ارتفاع بیشتر تشکیل بدهد.



شکل ۱۰ - ارتفاع پشته رسوبی در فواصل مختلف

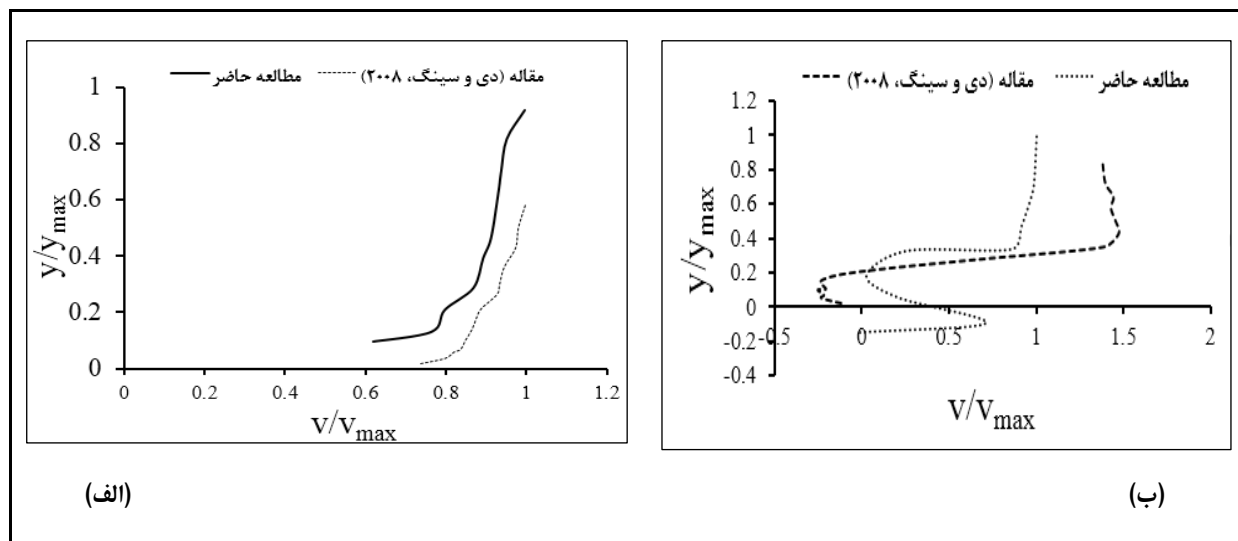
توزیع سرعت جریان

در شکل ۱۱ نیمرخ عمودی توزیع سرعت برای آزمایش با دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه در پژوهش حاضر، در مقایسه با نیمرخ عمودی توزیع سرعت برای آزمایش‌های دی و سینگ (Dey & Singh, 2008) با دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه، ارائه شده است. سرعت در مقاطع بالادست و مقطع

قرارگیری لوله در راستای محور مرکزی لوله اندازه‌گیری شد. همان‌طور که مشخص است، در مقطع بالادست (حالت الف) در فاصله یک متری از مرکز لوله، سرعت جریان از رقوم بستر تا عمق ۰/۰۸ متر روند افزایشی دارد و از نقطه ۰/۰۸ به بعد تا نزدیکی سطح آب مقدار آن ثابت است. در محل قرارگیری لوله

دی و سینگ (Dey & Singh, 2008) نیز با مشاهدات این پژوهش همخوانی دارد. تحت تأثیر حضور لوله، به دلیل کاهش سطح مقطع جریان، نیمرخ توزیع سرعت نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. در این حالت، سرعت جریان افزایش یافته و جت جریان ایجاد شده در زیر لوله، سبب اعمال نیروی برشی بیشتری بر رسوبات شده است و بدین ترتیب چاله آبستگی گسترش یافته است.

(حالت ب) در فاصله ۳ سانتی متری از مرکز لوله، به دلیل حضور لوله در مسیر جریان، توزیع سرعت جریان به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است. در اثر برخورد جریان با جدار بالادست لوله، سرعت جریان صفر است و با دور شدن از رقوم خط مرکزی لوله، سرعت در بالا و پایین لوله افزایش یافته است. سرعت در زیر لوله، نسبت به سرعت در بالای آن، به دلیل انحنای بیشتر خطوط جریان، کمتر است. نتایج مشاهدات



شکل ۱۱- توزیع سرعت جریان

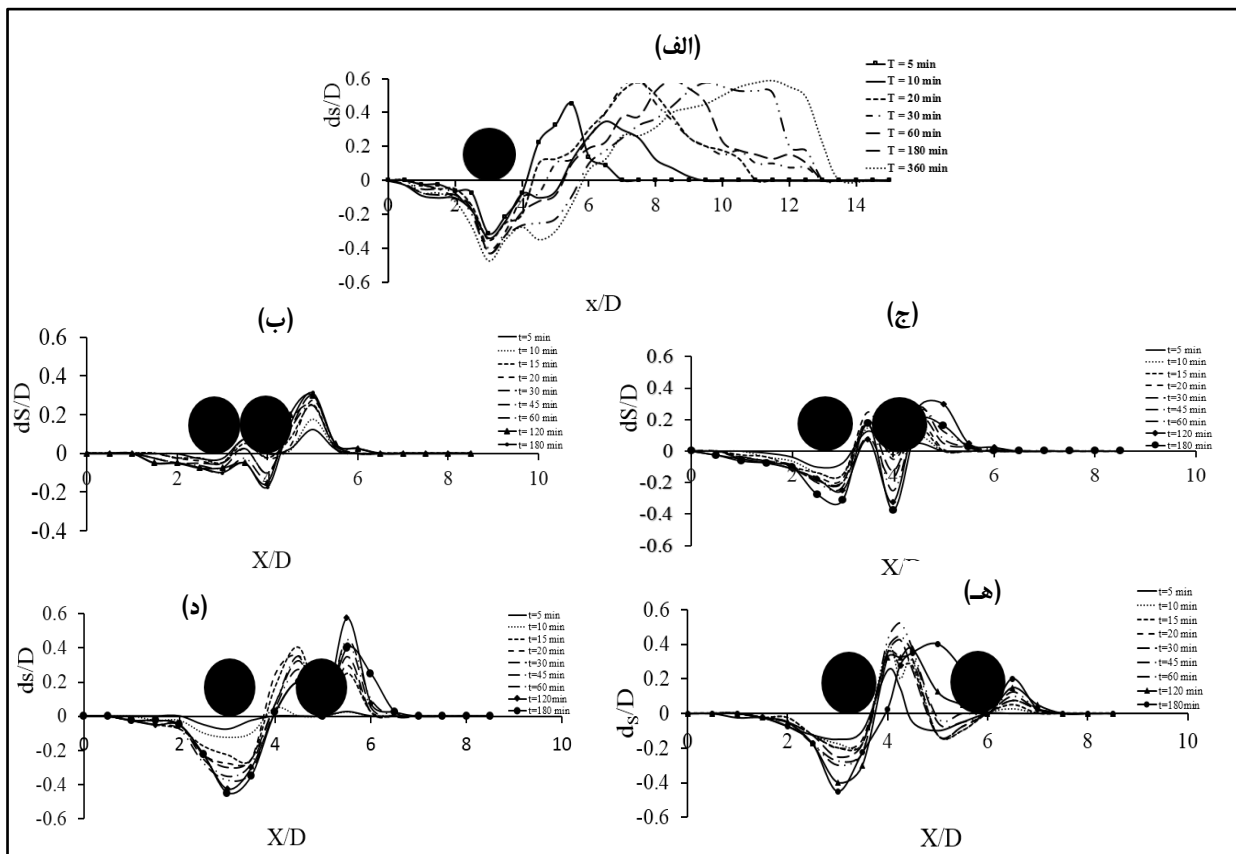
دقیقه، به مقدار تقریباً ثابت رسیده است. رسوباتی که از زیر لوله شسته شده‌اند بلافاصله در پایین دست لوله به صورت یک پشته رسوبی تجمع یافته‌اند. ارتفاع این پشته رسوبی در دقایق اولیه آزمایش زیاد و طول آن کم است ولی با گذشت زمان، ارتفاع آن کاهش و طول آن افزایش یافته است. به طور مثال، بعد از پنج دقیقه از شروع آزمایش، ارتفاع و طول پشته رسوبی نسبت به قطر لوله برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه، به ترتیب ۰/۴۵ و ۹ است در حالی که بعد از گذشت ۱۸۰ دقیقه از شروع آزمایش، مقدار آن به ترتیب به ۰/۶ و ۱۳ رسیده است. همچنین، ارتفاع و طول پشته رسوبی نسبت به قطر لوله برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه در پنج دقیقه اولیه آزمایش به ترتیب ۰/۱۷ و

توسعه زمانی چاله آبستگی

شکل ۱۲ نمودار توسعه زمانی پروفیل آبستگی را در دو حالت لوله منفرد و دوتائی با فواصل مختلف برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. در این شکل، محور عمودی نشان دهنده نسبت عمق آبستگی به قطر لوله و محور افقی نشان دهنده نسبت طول حفره آبستگی به قطر لوله است. همان طور که مشخص است، برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه برای هر دو حالت لوله منفرد و دوتائی، در دقایق اولیه آزمایش، تغییرات عمق چاله آبستگی بسیار زیاد است ولی با گذشت زمان از سرعت تغییر عمق کاسته شده است. تغییرات عمق نسبی آبستگی در پنج دقیقه نخست آزمایش ۰/۳- است ولی بعد از گذشت ۱۸۰

دیگر، رسوبات از زیر لوله اول شسته و در پایین دست لوله دوم ته‌نشین شده‌اند (حالت ب). با افزایش فاصله بین لوله‌ها، جریان بعد از شستن رسوبات در زیر لوله اول، رسوبات را از فضای خالی بین دو لوله به جریان عمومی فلوم تزریق می‌کند؛ در این حالت، آبشستگی در زیر لوله دوم (پایین دست) رخ نمی‌دهد (حالت د و ه). رسوباتی که در پایین دست لوله دوم ته‌نشین شده‌اند در واقع همان ذرات شسته شده‌ای هستند که از زیر لوله اول فرسایش یافته و پس از غلتیدن از روی تاج لوله دوم در وجه پایین دست آن ته‌نشین شده‌اند (حالت د و ه). در این حالت، لوله دوم و پشته رسوبی ایجاد شده در پایین دست آن مانع گسترش طولی حفره آبشستگی می‌شود. در جدول ۳ مشخصات ارتفاعی پشته رسوبی و حداکثر عمق آبشستگی برای لوله منفرد و دوتائی ارائه شده است.

۲ بوده ولی طی ۱۸۰ دقیقه به ۰/۳۳ و ۷ رسیده است. نسبت ارتفاع و طول نسبی پشته رسوبی در حالت $S/D=2$ در پنج دقیقه اول برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه ۲/۵ برابر بیشتر است تا برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه. این نسبت، بعد از گذشت ۱۸۰ دقیقه، به ۱/۶ برابر کاهش یافته است. روند کلی توسعه زمانی آبشستگی برای دبی‌های دیگر مشابه با همین حالت است ولی مقادیر آنها بسته به هر دبی متفاوت است. به طور مثال، حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده در دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه (حداکثر دبی)، نسبت به دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه (حداقل دبی)، ۱/۵ برابر است. در این حالت، گستره طولی پروفیل آبشستگی ۴ برابر افزایش یافته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که همواره حداکثر عمق آبشستگی دقیقاً در زیر لوله رخ می‌دهد. در حالت لوله‌های دوتائی به هم چسبیده، آبشستگی و حرکت رسوبات در اثر جریان آب فقط از زیر لوله‌هاست و به عبارت



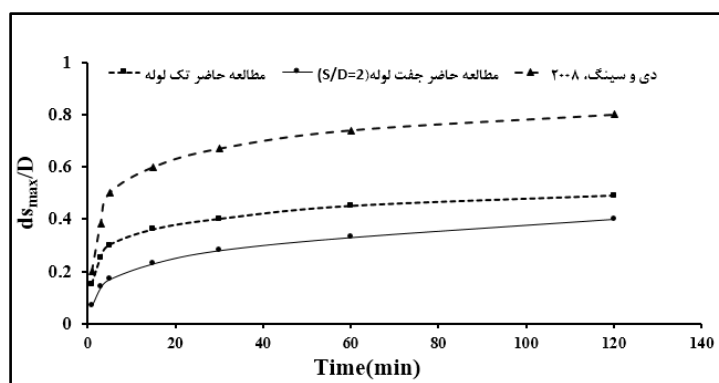
شکل ۱۲- توسعه زمانی پروفیل آبشستگی در حالت‌های مختلف قرارگیری لوله برای دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه

جدول ۳- نتایج اندازه گیری‌های صورت گرفته در این پژوهش

عدد فرود جریان					مشخصات	فاصله نسبی	لوله منفرد
۰/۱۷	۰/۱۶۵	۰/۱۶۱	۰/۱۵۴	۰/۱۴۴	حفره		
-۰/۴۷۵	-۰/۴۲۵	-۰/۴	-۰/۳۵	-۰/۳	d_{smax}/D		لوله منفرد
۰/۵۸۷۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۳۳۷۵	h_b/D	----	
-۰/۱۷۵	-۰/۱۲۵	-۰/۱	-۰/۲۲۵	-۰/۲	d_{smax}/D	$S/D=0$	لوله منفرد
۰/۳۱۲۵	۰/۱۶۵	۰/۱۷۵	۰/۲	۰/۰۵	h_b/D		
-۰/۳۷۵	-۰/۲۵	-۰/۲۶۲۵	-۰/۲۱۲۵	-۰/۲۲۵	d_{smax}/D	$S/D=0.5$	دو تایی
۰/۳۲۵	۰/۲۸۷۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۶۲۵	h_b/D		
-۰/۴۵	-۰/۳۵	-۰/۳۵	-۰/۲۷۵	-۰/۳	d_{smax}/D	$S/D=1$	دو تایی
۰/۴	۰/۳۲۵	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۲۷۵	h_b/D		
-۰/۴۵	-۰/۳۲۵	-۰/۳۲۵	-۰/۲۲۵	-۰/۲۵	d_{smax}/D	$S/D=2$	دو تایی
۰/۴	۰/۳۷۵	۰/۳۵	۰/۳۷۵	۰/۴	h_b/D		

ثابت می‌رسد که همان عمق تعادلی آبشستگی است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، این روند برای آزمایش‌های دی و سینگ (Dey & Singh, 2008) نیز برقرار است با این تفاوت که دبی‌های بالاتر در آزمایش‌های این محققان باعث شده است که در زمان‌های متناظر، عمق آبشستگی در آن پژوهش نسبت به عمق آبشستگی در مطالعه حاضر بیشتر باشد.

شکل ۱۳ تغییرات حداکثر عمق آبشستگی را برای زمان‌های مختلف در پژوهش حاضر، در مقایسه با تحقیق دی و سینگ (Dey & Singh, 2008)، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، منحنی تغییرات زمانی عمق حداکثر آبشستگی در دقایق ابتدایی آزمایش شیب زیادی دارد که حاکی از سرعت بالای فرآیند آبشستگی در این دقایق است. با گذشت زمان، شیب منحنی به تدریج کاهش می‌یابد و نهایتاً به مقدار تقریباً



شکل ۱۳- تغییرات زمانی عمق آبشستگی

نتیجه‌گیری

بیشتر، ارتفاع پشته رسوبی به مقداری تقریباً ثابت می‌رسد. برای $S/D=1, 2$ پشته رسوبی به مانند حفاظی عمل می‌کند که لوله پایین‌دست را در مقابل آبخستگی حفظ می‌کند. این پدیده را حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2006) نیز مشاهده نموده‌اند. با افزایش فاصله بین دو لوله، عمق آبخستگی در زیر لوله اول افزایش می‌یابد، فاصله نسبی $S/D=1$ با افزایش فاصله بین دو لوله، در واقع فضای بیشتری برای خروج جت جریان از بین لوله‌ها به‌صورت دوتائی فراهم می‌شود و با افزایش سطح مقطع، قدرت جت جریان کاهش می‌یابد.

عبور لوله از بستر رودخانه ممکن است سبب آبخستگی رسوبات بستر و منجر به شکست لوله گردد. هدف از این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و مکانیزم آبخستگی در زیر خطوط لوله در دو حالت لوله منفرد و لوله‌های دوتائی موازی بوده است. بدین‌منظور تأثیر فاصله بین لوله‌ها و شرایط هیدرولیکی جریان بر توسعه زمانی عمق چاله آبخستگی بررسی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار S/D تا $S/D=1$ ، ارتفاع پشته رسوبی افزایش می‌یابد ولی برای فواصل نسبی

مراجع

- Arshad-Shabkhaneh, B. and Hakimzadeh, H. 2015. Investigation into effect of burial depth of offshore pipelines intandem position on flow separation using the experimental and numerical models. *J. Civil Environ. Eng.* 45(1): 1-16. (in Persian)
- Azamathulla, H. M. and Yusoff, M. A. M. 2013. Soft computing for prediction of river pipeline scour depth. *Neural Comput. Appl.* 23(7-8): 2465-2469.
- Chiew, Y. M. 1990. Mechanics of local scour around submarin pipelines. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 116(4): 515-529.
- Dey, S. and Singh, N. P. 2008. Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow. *J. Hydraul. Eng.* 134(5): 588-600.
- Hedayat-Bahrami, P. Hosienzadeh-Dalir, A. Katourany, S. and Farsadizadeh, D. 2016. Laboratory study on the impact of collision angle of flow on scour under the submerged pipe. *J. Soil Water Sci.* 26, 179-190
- Hosseini, D., Hakimzadeh, H. and Gheyasi, R. 2007. Investigation of local scour process around pipelines using the numerical and physical models. *J. Marine Eng.* 3(5): 37-52. (in Persian)
- Khajehzad, A., Hajikandi, H. and Soleymani, Sh. 2012. Investiigation of geometry of scour hole below two parallel submerged pipes affected by vegetation coverage. *Proceeding of 11th Iranian Hydraulic Conference.* Nov. 7-8. Urmia, Iran. (in Persian)
- Kjeldsen, S. P., Gjorsvik, O., Bringaker, K. G. and Jacobsen, J. 1973. Local scour near offshore pipelines. *Proceedings of the Second International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions (POAC).* Aug. 27-30. Reykjavik, Iceland.
- Kumar, V., Raju, K. G. R. and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *J. Hydraul. Eng.* 125(12): 1302-1305.
- Moncada, A. T. and Aguirre-Pe, J. 1999. Scour below pipeline in river crossings. *J. Hydraul. Eng.* 125(9): 953-958.
- Sumer, B. M., Truelsen, C., Sichmann, T. and Fredsøe, J. 2001. Onset of scour below pipelines and self-burial. *Coastal Eng.* 42(4): 313-335.
- Wu, Y., and Chiew, Y. M. 2010. Three-dimensional scour at submarine pipelines in unidirectional steady current. *5th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5).* Nov. 7-10. San Francisco, USA.
- Zhao, M., Vaidya, S., Zhang, Q. and Cheng, L. 2015. Local scour around two pipelines in tandem in steady current. *Coastal Eng.* 98, 1-15.

Physical Modeling of Scour below Single and Double Submerged Pipes

A. Haj-Mohammadi, M. Zounemat-Kermani* and M. Rahimpour

* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: zounemat@uk.ac.ir

Received: 14 April 2017, Accepted: 2 December 2017

Due to considerable economic, environmental and social impacts, scouring around pipelines has been focus of consideration by different researchers and designers of hydraulic structures. Present research was carried out to investigate the flow pattern, scour mechanism, and temporal evolution of scour hole around the submerged pipes at the Hydraulic Laboratory of Department of Water Engineering located in Shahid Bahonar University of Kerman. The experiments were performed for single pipe and two parallel pipes (double pipes) with different spacing and hydraulic conditions. The results showed that, when water flows around the pipe, the scour process started by establishment the piping flow from pipe upstream side to downstream side. Next, the tunneling erosion was occurred and a flow jet passed below the pipeline, which was the main factor for the development of scour hole. In the case of double pipes, depending on the spacing between the two pipes, different profiles were observed at the scour hole. For both cases of single and double pipes, by increasing the flow discharge, the depth of the scour hole increased. In addition, the observations revealed that the scour depth for single pipe was always more than the double pipes. In the case of double pipes, the interactions between flow and pipes weakened the vortices strength. Under this circumstance, the depth of scour hole at single pipe was less than double pipes, so that, for the discharge of 28 L/s, the maximum scour depth of the single pipe was 1.27 times more than that of the double pipes.

Key Words: Experimental Model, Flow Pattern, Local Scour, Submerged Pipes