نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و سه / شماره چهارم / زمستان ۱۳۹۸

بررسی آزمایشگاهی تأثیر برخی از پارامترهای غیرماندگاری بر آبشستگی زیر خط لوله عبوری در عرض و بستر جریان

اسمعیل شاکر*، سید محمود کاشفی‌پور و محمود شفاعی بجستان[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸)

چکیده

یکی از عوامل شکست خطوط لوله متقاطع با رودخانه‌ها که منجر به نفوذ سیال عبوری از لوله به درون رودخانه می‌شود، آبشستگی زیر آنها تحت تأثیر عبور جریان رودخانه است. پژوهشگران بسیاری تاکنون در خصوص مکانیزم آبشستگی زیر خط لوله تحت جریان یک‌سویه و توسعه آن مطالعه کرده‌اند اما تمامی این مطالعات در شرایط جریان ماندگار بوده است. درحالی که مطالعات صورت گرفته نشان‌دهنده اهمیت بررسی آبشستگی در زمان‌های سیلابی رودخانه و در شرایط جریان غیرماندگار است. به همین دلیل هدف از مطالعه حاضر، بررسی آبشستگی زیر خط لوله عبوری از بستر رودخانه در شرایط غیرماندگار است. برای این منظور برخی پارامترهای مؤثر بر هیدروگراف‌های در نظر گرفته شده، تغییر داده شد و نتایج آن با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در شرایط ماندگار مقایسه شد. از نتایج این پژوهش می‌توان به نسبت ۳۴ تا ۶۹ درصدی آبشستگی در شرایط غیرماندگار نسبت به شرایط ماندگار و همچنین افزایش ۷ تا ۲۲ درصدی عمق آبشستگی با افزایش دبی پیک هیدروگراف در شرایط آزمایش‌های ارائه شده در پژوهش اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، جریان غیرماندگار، خط لوله عبوری عرضی، هیدروگراف

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

*: مسئول مکاتبات: esmaeil.shaker@yahoo.com

مقدمه

آبشستگی زیر خطوط لوله عبوری از بستر رودخانه‌ها که انتقال‌دهنده سیالاتی مانند آب، نفت، گاز و یا هر سیال دیگر هستند، تحت اثر عبور جریان آب رودخانه اتفاق می‌افتد. وقتی یک خط لوله در تقاطع با رودخانه قرار گرفته و از بستر آن عبور می‌کند، نیروی هیدرودینامیک وارد بر آن و همچنین گرادیان فشار بین بالادست و پایین‌دست لوله سبب ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که آن گردابه‌ها موجب آبشستگی در زیر و اطراف خط لوله می‌شود. این آبشستگی ممکن است منجر به از بین رفتن تکیه‌گاه لوله در فاصله نسبتاً طولانی شده و تحت اثر لرزش‌های ناشی از گردابه‌های ایجاد شده منجر به خستگی و در نهایت شکست خط لوله در بستر رودخانه شود. شکستگی خط لوله در بستر رودخانه ضمن ایجاد مشکلات زیاد اجرایی برای ترمیم آن منجر به نفوذ سیالات موجود در خط لوله به رودخانه و ایجاد مشکلات حاد زیست‌محیطی می‌شود. به همین دلیل بررسی این مسئله از سال‌های گذشته یکی از موضوعات مورد علاقه پژوهشگران علم انتقال رسوب و مهندسی رودخانه بوده است.

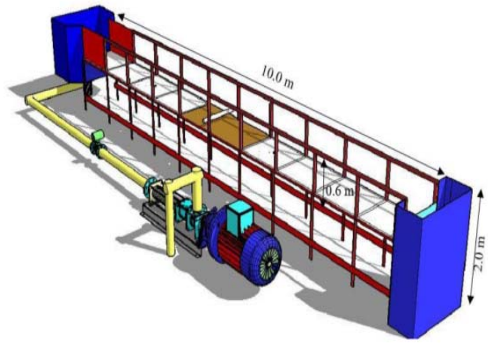
یکی از قدیمی‌ترین مطالعات مربوط به بررسی آبشستگی زیر لوله عبوری از بستر رودخانه مربوط به جلدسن و همکاران (۶) است که بررسی صورت گرفته توسط ایشان منجر به استخراج رابطه‌ای شد که عمق آبشستگی را فقط به قطر لوله و سرعت جریان مرتبط می‌داند. اما با گذشت زمان پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه به‌صورت آزمایشگاهی و عددی صورت گرفت. یکی از کامل‌ترین مطالعات صورت گرفته در این زمینه توسط دی و سینگ (۴) صورت گرفته است. در این مطالعه تأثیر عوامل مختلف از جمله قطر لوله، سطح مقطع لوله، عمق جریان نزدیک‌شونده، دانه‌بندی رسوبات و سپر شدن بستر (Armoring) بر آبشستگی بررسی شده است. از نتایج این مطالعه می‌توان به افزایش عمق آبشستگی با افزایش عمق جریان نزدیک‌شونده تا حداکثر پنج برابر قطر لوله و کاهش عمق گودال آبشستگی با سپر شدن بستر اشاره کرد. عظمت‌اله و همکاران (۱) تأثیر تغییر زاویه لوله نسبت به امتداد جریان رودخانه را بررسی کردند و با بررسی چهار زاویه قرارگیری به این نتیجه رسیدند که تغییر زاویه تنها باعث جابه‌جایی محل گودال آبشستگی می‌شود و تأثیر چندانی بر عمق آبشستگی ندارد. ژائو و همکاران (۱۳) ضمن یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی زیر یک خط لوله مرکب متوالی و با فواصل مختلف از هم و در دو حالت بستر زنده و آب زلال پرداختند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان می‌دهد که عمق گودال آبشستگی زیر هر دو لوله بالادست و پایین‌دست در خط لوله مرکب بیشتر از عمق گودال آبشستگی زیر خط لوله منفرد بود و در خط لوله مرکب گودال آبشستگی زیر لوله پایین‌دست بزرگ‌تر از گودال آبشستگی زیر لوله بالادست است. همچنین با توجه به عدم جایگزینی گودال آبشستگی با رسوبات بالادست در شرایط آب زلال، عمق آبشستگی در حالت آب زلال بیشتر از عمق آبشستگی در شرایط بستر زنده است. پیش فرض مطالعات اشاره شده و همچنین کلیه مطالعات صورت گرفته در این زمینه جاری شدن یک جریان ماندگار با دبی نزدیک به دبی بحرانی مصالح بستر و در یک زمان ثابت و مشخص است. درحالی که در طبیعت و در هنگام وقوع سیلاب آبشستگی متأثر از جریان ماندگار نیست و مطالعات مختلف نشان می‌دهد شرایط غیرماندگار موجود در آبراهه در طبیعت بر الگوی جریان و رسوب مؤثر است (۹). زیرا با تغییر دبی و سرعت و در نتیجه تنش‌برشی جریان در طول عبور یک جریان غیرماندگار، میزان و غلظت رسوب انتقال‌یافته که خود تابع سرعت و تنش‌برشی جریان است، متغیر است و بنابراین قرار دادن یک دبی بحرانی به‌عنوان دبی جریان ماندگار و بررسی و استخراج روابط مربوط به انتقال رسوب و آبشستگی اطراف سازه‌های مختلف برمبنای این دبی مستلزم در نظر گرفتن تخمین و تقریب زیادی است. با توجه به قرار گرفتن شبکه‌های وسیع انتقال نفت خام، گاز طبیعی، آب و فاضلاب در مسیر رودخانه‌ها و همچنین وقوع سیلاب‌هایی که در دوره‌های زمانی مختلف در رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد، لزوم مطالعه الگوی جریان

اطراف خطوط لوله و همچنین بررسی آبشستگی اطراف لوله از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به مطالب گفته شده در خصوص اهمیت مطالعه الگوی جریان و آبشستگی در اثر جریان غیرماندگار در سال‌های گذشته، پژوهشگران به بررسی این موضوع پرداختند. اما غالب مطالعات صورت گرفته در این زمینه درخصوص مطالعه آبشستگی تحت‌تأثیر جریان غیرماندگار اطراف پایه و تکیه‌گاه پل‌ها بوده است و با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، هنوز مطالعه جامعی در خصوص تأثیر غیرماندگاری جریان بر آبشستگی زیر خط لوله صورت نگرفته است. اولویتو و همکاران (۱۰) ضمن یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی پیرامون پایه و تکیه‌گاه پل در جریان غیرماندگار پرداختند. بدین‌منظور ایشان هیدروگراف‌هایی با مشخصات متفاوت در آزمایشگاه ایجاد و آبشستگی پیرامون پایه پل تحت اثر عبور این هیدروگراف‌ها را اندازه‌گیری کردند. سپس با تقسیم هر هیدروگراف به پله‌های زمانی و با فرض ثابت بودن دبی و عبور جریان دائمی در هر پله با استفاده از روابط موجود برای آبشستگی تحت اثر جریان دائمی آبشستگی هر پله را محاسبه و با محاسبه مجموع آبشستگی در پله‌های مختلف بیشترین آبشستگی را محاسبه کردند. لینک و همکاران (۸) به بررسی آزمایشگاهی و عددی آبشستگی اطراف پایه پل در شرایط جریان غیرماندگار و با هیدروگراف‌هایی با مشخصات متفاوت پرداختند. ایشان ضمن تهیه مدل آزمایشگاهی بررسی آبشستگی تحت جریان غیرماندگار، برای اولین بار اقدام به توسعه مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان آبشستگی موسوم به DFW (Dimensionless, Effective Flow Work Model) کردند. نتایج آزمایش‌ها و خروجی مدل ایشان نشان‌دهنده تأثیر فاکتورهای مختلف هیدروگراف بر میزان آبشستگی نهایی و همچنین میزان آبشستگی در زمان آزمایش‌هاست. کریمایی طبرستانی و زراتی (۱۲) آبشستگی اطراف پایه پل هنگام عبور هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده را به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آبشستگی نهایی و توسعه آبشستگی هنگام آزمایش‌های ایشان توسط چند دوربین با کیفیت فیلم‌برداری مناسب برداشت و ثبت شد. ایشان در این مطالعه تأثیر تغییرات در شاخه بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف و همچنین تغییرات دبی ماکزیمم بر آبشستگی را مطالعه کردند. از نتایج مطالعات ایشان می‌توان به تأثیر بیشتر دبی پیک هیدروگراف بر آبشستگی نسبت به سایر پارامترها اشاره کرد. همچنین ایشان با بررسی نسبت زمان شاخه پایین‌رونده هیدروگراف (t_f) به زمان شاخه بالارونده هیدروگراف (t_r) نتیجه گرفتند افزایش نسبت $^{t_f}/_{t_r}$ موجب افزایش عمق گودال آبشستگی می‌شود. باباخانی و قدسیان (دو) به مطالعه آبشستگی پیرامون آبشکن تیغه‌ای در شرایط جریان غیرماندگار پرداختند. در این مطالعه آزمایش‌هایی با هدف بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر هیدروگراف از قبیل شدت جریان پیک، زمان تداوم و زمان پیک هیدروگراف انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که عمق آبشستگی نهایی ناشی از جریان غیرماندگار همواره کمتر از عمق آبشستگی نهایی ناشی از جریان ماندگار با دبی متناظر با دبی پیک هیدروگراف است، همچنین شدت جریان پیک بر عمق آبشستگی ناشی از عبور هیدروگراف تأثیر زیادی دارد.

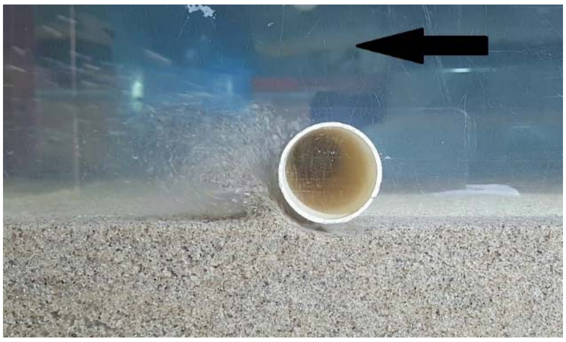
همان‌گونه که مشاهده می‌شود تاکنون مطالعات زیادی روی آبشستگی زیر خط لوله در شرایط جریان ماندگار و همچنین آبشستگی پایه و تکیه‌گاه پل در شرایط جریان غیرماندگار صورت گرفته اما در خصوص آبشستگی زیر خط لوله در شرایط جریان غیرماندگار تاکنون مطالعه جامعی صورت نگرفته است. به همین دلیل مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی زیر خط لوله جریان در شرایط غیرماندگار و با تغییر نسبت زمان پیک به زمان تداوم و همچنین شدت جریان پیک هیدروگراف می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین اشاره شد، هدف از این پژوهش بررسی آبشستگی اطراف یک لوله منفرد عبوری از مقطع و بستر رودخانه تحت‌تأثیر جریان ماندگار و غیرماندگار



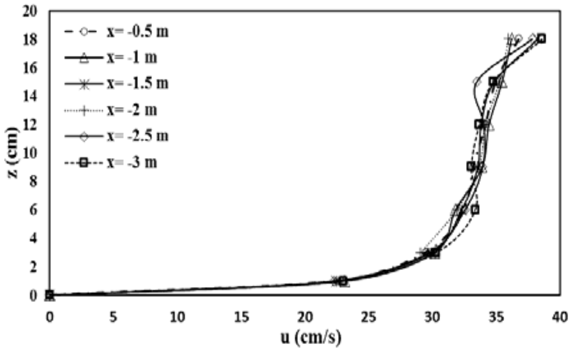
شکل ۱. نمایه فلوم مورد استفاده



شکل ۲. نمایی از آبشستگی زیر خط لوله

است. برای انجام این آزمایش‌ها یک فلوم آزمایشگاهی مستقیم به طول ۱۳ متر (۱۰ متر طول مستقیم جریان)، عرض ۰/۷۴ متر و ارتفاع ۰/۶ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته و نصب شد (شکل ۱). جداره فلوم از جنس شیشه و جنس کف گالوانیزه بوده و جریان آب داخل فلوم کاملاً قابل مشاهده است. فلوم ساخته شده دارای مخازنی در ابتدا و انتهای فلوم و قسمتی برای آرام کردن جریان است. برای بررسی پدیده آبشستگی در اطراف لوله عبوری از عرض مجرا، در میانه فلوم و با بالا آوردن کف فلوم در محدوده‌ای به طول دو متر و به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر رسوباتی با اندازه متوسط (d_{50}) ۰/۷ میلی‌متر، چگالی نسبی ۲/۶۵ و انحراف معیار استاندارد (σ_g) ۱/۴ ریخته شد. برای کنترل عمق جریان در فلوم از دریچه‌ای کشویی در پایین‌دست استفاده شد که برای جلوگیری از برگشت امواجی که به انتهای فلوم می‌رسد، دریچه از پایین به سمت بالا بسته می‌شود. همچنین برای کنترل دبی جریان از یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیس استفاده شد. برای ایجاد جریان غیرماندگار در فلوم سیستمی طراحی شد که شامل دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است. این سیستم بعد از انجام واسنجی و دریافت داده‌های زمان و دبی مربوط به هیدروگراف موردنظر از کاربر و با فراخوانی دبی جریان از دبی‌سنج دستوراتی برای ایجاد تغییرات در دور موتور و در نتیجه دبی جریان به موتور ارسال می‌کند. واسط بین کاربر و سیستم سخت‌افزاری یک نرم‌افزار مبتنی بر رایانه است که هیدروگراف مدنظر کاربر را به‌صورت یک فایل در قالب اکسل دریافت می‌کند و بعد از انجام پردازش‌های مورد نیاز دستورات لازم برای تنظیم دبی را به سیستم ارسال می‌کند. به‌منظور مدل‌سازی خط لوله از لوله‌هایی از جنس پی‌وی‌سی و با سه قطر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر استفاده شد. لوله‌ها در کل آزمایش‌ها به شکل عمود بر جریان و روی سطح بستر قرار داشتند. برای جلوگیری از ایجاد فرم بستر و آبشستگی ناخواسته در ابتدای آزمایش ابتدا دریچه انتهایی فلوم تا عمقی بیشتر از عمق مدنظر بسته می‌شد سپس پمپ روشن شده و آب با دبی خیلی ناچیز در حد چند لیتر بر ثانیه در فلوم جاری می‌شد تا بستر به‌آرامی اشباع شود. بعد از بالا آمدن آب در فلوم لوله کارگذاری می‌شد و با تراز و گونیا از صحت کارگذاری آن اطمینان حاصل می‌شد. بعد از کارگذاری لوله به‌آرامی با تغییر در ارتفاع دریچه آب به عمق اولیه جریان به‌ازای دبی پایه هیدروگراف رسید و پمپ با توجه به نوع آزمایش شروع به‌کار می‌کرد. در هنگام آزمایش و در بازه‌های زمانی مختلف عمق آبشستگی زیر لوله توسط یک دوربین با کیفیت ۶۰ فریم بر ثانیه و به‌طور همزمان با یک دستگاه عمق‌سنج دیجیتال نصب شده روی یک ارابه و با دقت ۰/۱ میلی‌متر قرائت می‌شد. شکل (۲) نمایی از آبشستگی زیر مدل لوله کار گذاشته شده در فلوم آزمایشگاهی مطالعه حاضر است.

آزمایش‌های مربوط به این پژوهش در دو قسمت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت. عمق و دبی جریان در آزمایش‌های ماندگار و غیرماندگار به شکلی انتخاب شدند که هم در آزمایش‌های ماندگار و هم آزمایش‌های غیرماندگار شرایط آزمایش‌های آب زلال برقرار باشد. بدین منظور سرعت جریان



شکل ۳. توزیع عمقی سرعت در مقاطع طولی در بالادست محل قرارگیری لوله

در آزمایش‌های ماندگار و همچنین شرایط پیک آزمایش‌های غیرماندگار به‌میزان ۹۵ درصد سرعت بحرانی محدود شد. همچنین محدود عدد فرود برای آزمایش‌های حاضر بین ۰/۲ تا ۰/۲۷ است. برای براورد سرعت بحرانی از رابطه لگاریتمی لاچلان و ملویل (۷) استفاده شد.

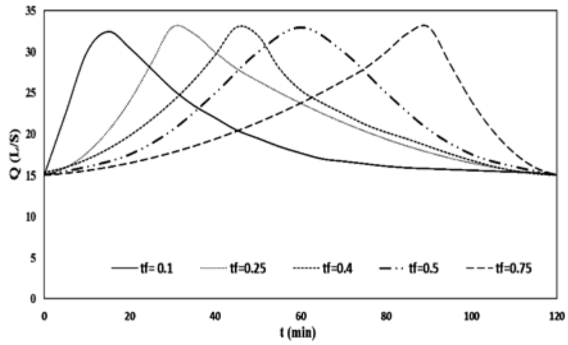
$$\frac{V_C}{V_{*C}} = ۵/۷۵۱ \log\left(۵/۵۳ \frac{y}{d_{۵۰}}\right) \quad (۱)$$

در رابطه (۱) V_c سرعت بحرانی رسوبات بر اساس دیاگرام شیلدز، $d_{۵۰}$ قطر متوسط رسوبات و y عمق جریان نزدیک‌شونده است. با توجه به رابطه (۱) و شرایط موجود در آزمایشگاه، چنانچه دبی به‌میزان ۳۵ لیتر بر ثانیه و فرود متناظر آن ۰/۲۷ برسد، آستانه حرکت ذرات اتفاق می‌افتد. همچنین آزمایش‌های انجام گرفته نشان داد برای دبی کمتر از ۱۵ لیتر در ثانیه و فرود متناظر آن ۰/۲ برای لوله به قطر ۶۰ میلی‌متر آبشستگی اتفاق نمی‌افتد، بنابراین دبی پایه هیدروگراف‌ها معادل ۱۵ لیتر بر ثانیه و دبی پیک هیدروگراف‌ها معادل ۳۳ لیتر در ثانیه در نظر گرفته شد.

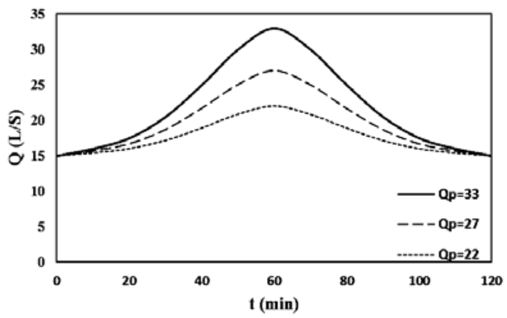
با توجه به اینکه آزمایش‌های مطالعه حاضر اولین آزمایش‌های انجام شده به‌وسیله این فلوم بود نیاز به بررسی جریان در طول فلوم برای تعیین محل مناسب برای کارگذاری لوله در فلوم وجود داشت که بدین منظور و برای اطمینان از توسعه جریان در هم نزدیک‌شونده به محدوده آزمایش‌ها در فلوم، میدان جریان در بالادست محل مدنظر برای کارگذاری لوله، روی بستر زبر به‌وسیله یک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی الکترومغناطیس JFE ALEC ساخت کشور ژاپن و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۱۸ سانتی‌متر برداشت شد. زمان نمونه‌برداری بسته به موقعیت نقاط متفاوت بوده و نمونه‌برداری با فرکانس ۲۰ مگاهرتز صورت گرفته است. شکل (۳) نشان دهنده توزیع عمودی سرعت متوسط در مقاطع با فواصل مختلف از محل قرارگیری لوله به‌سمت بالادست جریان و در میانه فلوم است. اولین مقطع به فاصله نیم‌متری از محل نصب لوله و مقطع‌های بعدی هرکدام به فاصله نیم‌متر از مقطع قبلی و به‌سمت بالادست برداشت شدند.

با توجه به شکل (۳) انطباق پروفیل‌های سرعت بر هم از فاصله سه متری و مقاطع بعد نشان‌دهنده یکنواختی جریان و همچنین نزدیک بودن پروفیل سرعت عمقی به فرم لگاریتمی نشان‌دهنده توسعه‌یافتگی لایه مرزی جریان در فلوم است.

برای نیل به اهداف مدنظر پژوهش در مجموع ۲۴ آزمایش که سه مورد آنها در شرایط ماندگار و ۲۱ مورد در شرایط غیرماندگار هستند طراحی و اجرا و نتایج آنها بررسی شد. در بخش ماندگار تعداد سه آزمایش به‌عنوان شاهد با دبی پیک و زمان تداوم مشابه با آزمایش‌های غیرماندگار و در سه قطر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر انجام شد تا از نتایج آن برای مقایسه با نتایج آزمایش‌های غیرماندگار استفاده شود. در بخش غیرماندگار ۲۱ هیدروگراف تولید شده و آبشستگی تحت اثر عبور این هیدروگراف‌ها بررسی شده است. هدف از مطالعه این بخش بررسی تأثیر قطر لوله و فاکتور نسبت زمان پیک هیدروگراف به زمان تداوم آن و همچنین تأثیر دبی پیک هیدروگراف بر آبشستگی ایجاد شده در زیر لوله و همچنین مقایسه نتایج با حالت ماندگار است. بدین منظور هیدروگراف‌هایی با پنج نسبت زمان پیک به زمان تداوم ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۷۵ و سه قطر لوله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر و در مجموع ۱۵ آزمایش و سه هیدروگراف با نسبت زمان پیک به زمان تداوم ۰/۵ و سه دبی پیک ۲۲، ۲۷ و ۳۳ لیتر بر ثانیه و در سه قطر لوله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر و در مجموع ۹ آزمایش (سه آزمایش تکراری و مربوط به قسمت پیشین) بررسی می‌شوند.



شکل ۴. هیدروگراف‌های استفاده شده برای بررسی تأثیر نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف



شکل ۵. هیدروگراف‌های استفاده شده برای بررسی تأثیر دبی پیک هیدروگراف

شکل (۴) نشان‌دهنده هیدروگراف‌های استفاده شده برای بررسی تأثیر نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف و شکل (۵) نشان‌دهنده هیدروگراف‌های استفاده شده برای بررسی تأثیر دبی پیک هیدروگراف بر آبشستگی زیر خط لوله است. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد دبی پیک در هیدروگراف‌ها ۳۳ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد تا شرایط آزمایش‌ها در محدود آب زلال باقی بماند و با بررسی تعدادی از هیدروگراف‌های موجود در مقیاس واقعی رودخانه‌ها، زمان تداوم هیدروگراف‌ها دو ساعت در نظر گرفته شد. جدول (۱) نشان‌دهنده مشخصات آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش است.

نتایج و بحث

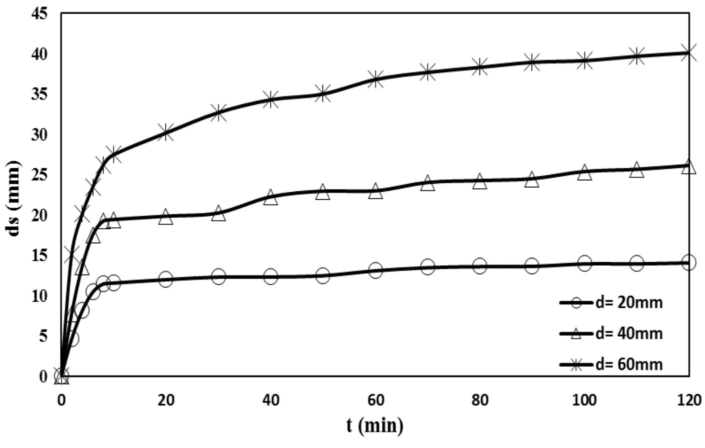
بررسی آزمایش‌های انجام شده در شرایط ماندگار

در این بخش تغییرات عمق آبشستگی حداکثر با گذشت زمان، در مدت دو ساعت انجام آزمایش برای جریان ماندگار با دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه، و عدد فرود ۰/۲۷ و برای سه قطر لوله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که برای ایجاد همپوشانی مناسب با زمان تداوم هیدروگراف‌ها و برای ایجاد امکان مقایسه بین نتایج حالت ماندگار و غیرماندگار، طول آزمایش‌ها دو ساعت در نظر گرفته شد. با برقراری جریان در کانال، گرادیان فشاری بین دو سمت لوله عبوری از مقطع کانال به‌وجود می‌آید که این گرادیان فشار موجب تراوش زیر بستر می‌شود و با توجه به اینکه فشار با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد، افزایش سرعت باعث افزایش گرادیان فشار و جوشش رسوب از زیر لوله شده و در این مرحله آبشستگی زیر لوله آغاز می‌شود. با ادامه افزایش سرعت تراوش جریان، بعد از مدت کوتاهی سطح رسوب زیر لوله گسیخته می‌شود که به این مرحله پایپینگ گفته می‌شود. در اثر پدیده پایپینگ شکاف کوچکی بین لوله و بستر به‌وجود می‌آید که مقدار قابل توجهی از جریان وارد آن می‌شود و این مسئله موجب افزایش شدید تنش‌برشی جریان تنش‌برشی زیر خط لوله تا بیش از سه برابر تنش‌برشی جریان نزدیک شونده می‌شود (۶). درنتیجه مقدار زیادی از رسوبات زیر خط لوله دچار آبشستگی شده و شکاف به‌وجود آمده بزرگ‌تر و مخلوط آب و رسوب از آن خارج می‌شود. این روند آبشستگی به فرسایش تونلی معروف است. با افزایش سایز شکاف سرعت در شکاف کاهش‌یافته و فرسایش تونلی به‌تدریج متوقف می‌شود. به‌دنبال فرسایش تونلی فرم بستر دون در پایین‌دست لوله تشکیل شده و به‌تدریج به‌سمت پایین‌دست حرکت می‌کند.

در این مرحله آبشستگی در اثر حضور گردابه‌های تشکیل‌شده در پایین‌دست لوله ادامه می‌یابد، این گردابه‌ها در پایان آبشستگی تونلی و وقتی اندازه شکاف به حد معینی رسید به‌وجود آمده و باعث آبشستگی می‌شود و این روند تا رسیدن به تعادل گودال آبشستگی ادامه می‌یابد. شکل (۶) نشان‌دهنده توسعه زمانی بیشترین عمق آبشستگی برای دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه و سه قطر لوله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر است.

جدول ۱. جدول مشخصات آزمایش‌های پژوهش

ردیف	نوع آزمایش	نام آزمایش	قطر لوله (میلی‌متر)	نسبت شدت جریان اوج هیدروگراف به شدت جریان بحرانی	زمان اوج (دقیقه)
۱	ماندگار	S۱	۲۰	–	–
۲	ماندگار	S۲	۴۰	–	–
۳	ماندگار	S۳	۶۰	–	–
۴	غیرماندگار	UH۱	۲۰	۰/۶۵	۶۰
۵	غیرماندگار	UH۲	۴۰	۰/۶۵	۶۰
۶	غیرماندگار	UH۳	۶۰	۰/۶۵	۶۰
۷	غیرماندگار	UH۴	۲۰	۰/۷۵	۶۰
۸	غیرماندگار	UH۵	۴۰	۰/۷۵	۶۰
۹	غیرماندگار	UH۶	۶۰	۰/۷۵	۶۰
۱۰	غیرماندگار	UH۷	۲۰	۰/۹۵	۶۰
۱۱	غیرماندگار	UH۸	۴۰	۰/۹۵	۶۰
۱۲	غیرماندگار	UH۹	۶۰	۰/۹۵	۶۰
۱۳	غیرماندگار	UH۱۰	۲۰	۰/۹۵	۱۲
۱۴	غیرماندگار	UH۱۱	۴۰	۰/۹۵	۱۲
۱۵	غیرماندگار	UH۱۲	۶۰	۰/۹۵	۱۲
۱۶	غیرماندگار	UH۱۳	۲۰	۰/۹۵	۳۰
۱۷	غیرماندگار	UH۱۴	۴۰	۰/۹۵	۳۰
۱۸	غیرماندگار	UH۱۵	۶۰	۰/۹۵	۳۰
۱۹	غیرماندگار	UH۱۶	۲۰	۰/۹۵	۴۸
۲۰	غیرماندگار	UH۱۷	۴۰	۰/۹۵	۴۸
۲۱	غیرماندگار	UH۱۸	۶۰	۰/۹۵	۴۸
۲۲	غیرماندگار	UH۱۹	۲۰	۰/۹۵	۹۰
۲۳	غیرماندگار	UH۲۰	۴۰	۰/۹۵	۹۰
۲۴	غیرماندگار	UH۲۱	۶۰	۰/۹۵	۹۰



شکل ۶. توسعه زمانی بیشترین عمق آبشستگی در شرایط ماندگار

جدول ۲. توسعه عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف نسبت به عمق نهایی آبشستگی

زمان (دقیقه)	قطر لوله		
	۲۰ میلی‌متر	۴۰ میلی‌متر	۶۰ میلی‌متر
۱۰	۸۲ درصد	۷۴ درصد	۶۸ درصد
۲۰	۸۵ درصد	۷۶ درصد	۷۵ درصد
۴۰	۸۸ درصد	۸۵ درصد	۸۵ درصد
۸۰	۹۷ درصد	۹۴ درصد	۹۴ درصد
۱۲۰	۱۰۰ درصد	۱۰۰ درصد	۱۰۰ درصد

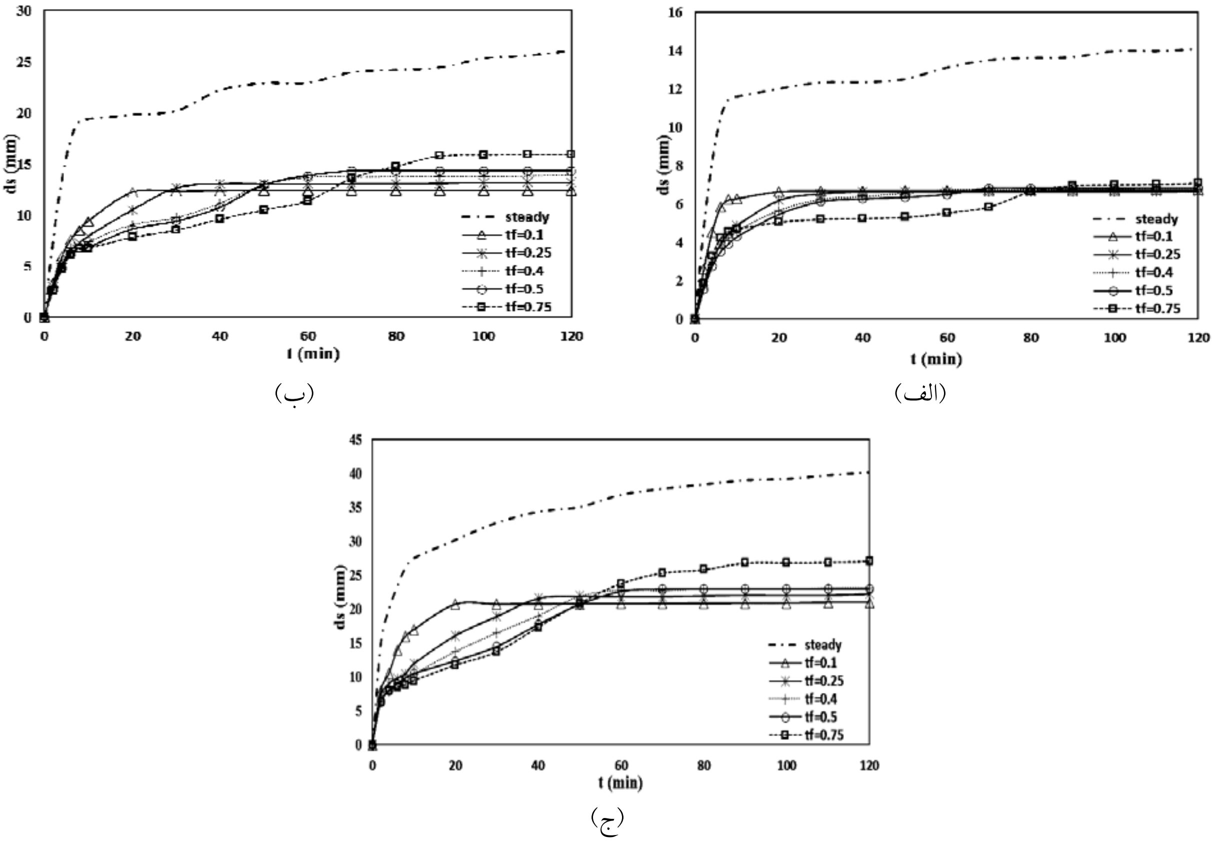
همانطوری که در شکل مشخص است، افزایش قطر لوله باعث تغییر زیادی در عمق آبشستگی در بازه‌های زمانی مختلف از شروع آبشستگی می‌شود، چنانچه سه برابر شدن قطر لوله از ۲۰ میلی‌متر به ۶۰ میلی‌متر منجر به افزایش ۱۸۵ درصدی عمق آبشستگی شده است. همچنین عمق آبشستگی زیر لوله با قطر ۶۰ میلی‌متر، به اندازه ۵۳ درصد بیشتر از عمق آبشستگی زیر لوله ۴۰ میلی‌متری است. علت این مسئله افزایش گرادیان فشار با افزایش قطر لوله و در نتیجه افزایش سرعت جریان ورودی به تونل زیر لوله و به‌دنبال آن افزایش تنش برشی وارد بر بستر است که این افزایش تنش برشی موجب آبشستگی بیشتر بستر در زیر لوله می‌شود. با توجه به شکل (۶) منحنی آبشستگی مربوط به قطر لوله ۶۰ میلی‌متر بیشترین و منحنی مربوط به قطر لوله ۲۰ میلی‌متر کمترین شیب را دارد که نشان‌دهنده افزایش سرعت آبشستگی زیر لوله با افزایش قطر آن است. البته با توجه به شکل (۶) و جدول (۲) که نشان‌دهنده تغیرات درصد عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف نسبت به عمق آبشستگی در پایان آزمایش‌هاست، اگرچه سرعت آبشستگی با افزایش قطر لوله افزایش می‌یابد ولی با افزایش قطر لوله درصد کمتری از آبشستگی در زمان‌های اولیه رخ می‌دهد به‌طوری که در لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر ۸۲ درصد از آبشستگی کل در ۱۰ دقیقه ابتدایی رخ می‌دهد درحالی که این میزان برای لوله با قطر ۴۰ میلی‌متر ۷۴ درصد و برای لوله با قطر ۶۰ میلی‌متر ۶۸ درصد است.

با توجه به شکل (۶) در پایان زمان آزمایش‌ها منحنی توسعه آبشستگی برای هر سه قطر لوله همچنان دارای شیب بوده و افقی نشده است که این مسئله نشان‌دهنده عدم تعادل گودال آبشستگی زیر لوله در طول زمان آزمایش‌هاست.

بررسی آزمایش‌های انجام شده در شرایط غیرماندگار

۱- بررسی تأثیر فاکتور نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف بر آبشستگی

همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین ذکر شد با توجه به شرایط جریان رودخانه‌ها در طبیعت بررسی آزمایشگاهی آبشستگی بستر تحت اثر سازه‌های گوناگون در شرایط جریان غیرماندگار واقع‌بینانه‌تر است. به همین دلیل هدف اصلی و نوآوری این مطالعه بررسی آبشستگی زیر خط لوله متقاطع با رودخانه در شرایط جریان غیرماندگار است. الگوی جریان در حالت غیرماندگار هم تقریباً مشابه با حالت ماندگار است با این تفاوت که میزان تنش وارده بر بستر از طرف جریان در حالت غیرماندگار ثابت نیست و با توجه به هیدروگراف عبوری متغیر است. بنابراین برخلاف جریان ماندگار که در آن رسوبات ریخته شده از دیواره بالادست به درون گودال آبشستگی و همچنین رسوبات کنده‌شده از کف پیوسته توسط جریان از گودال آبشستگی خارج می‌شوند تا گودال به تعادل برسد، در حالت غیرماندگار بعد از مدتی از عبور هیدروگراف جریان قادر نیست تا رسوبات را از گودال خارج کند، بنابراین بعد از مدتی یک پشته ثانویه درون گودال آبشستگی شکل می‌گیرد که در برخی آزمایش‌ها پس‌روی این پشته به‌سمت لوله باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود. بعد از گذشت مدتی از عبور پیک



شکل ۷. توسعه گودال آبشستگی زیر لوله ناشی از عبور جریان ماندگار و جریان غیرماندگار با هیدروگراف‌های متفاوت برای سه قطر متفاوت لوله: الف) ۲۰ میلی‌متر، ب) ۴۰ میلی‌متر و ج) ۶۰ میلی‌متر

هیدروگراف با توجه به کاهش شدت جریان و تضعیف گردابه‌های ایجاد شده، بیشترین عمق آبشستگی تغییر نمی‌کند اما تا زمان معینی بعد از توقف افزایش عمق آبشستگی، بعضی از مشخصات گودال مانند ارتفاع پشته پایین‌دست تغییر کرده و کم می‌شود ولی این تغییرات نیز بعد از کاهش بیشتر قدرت جریان، کاهش می‌یابد. شکل (۷) نشان‌دهنده توسعه گودال آبشستگی زیر لوله با سه قطر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر تحت اثر عبور جریان ماندگار و جریان غیرماندگار با هیدروگراف‌هایی با پنج نسبت زمان پیک به زمان تداوم ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۷۵ است.

با توجه به شکل (۷) در تمامی آزمایش‌های شرایط غیرماندگار هم عمق آبشستگی در هنگام انجام آزمایش‌ها و هم عمق آبشستگی نهایی به‌میزان قابل توجهی کمتر از عمق آبشستگی در شرایط جریان ماندگار است. با توجه به شکل (۷) و جدول (۳) که نشان‌دهنده نسبت عمق آبشستگی آزمایش‌های غیرماندگار با هیدروگراف‌های متفاوت در زمان‌های مختلف نسبت به عمق آبشستگی در آزمایش‌های ماندگار است، برای لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر نسبت عمق آبشستگی در شرایط غیرماندگار به آبشستگی در شرایط ماندگار در هیدروگراف و زمان‌های مختلف بین ۳۷ تا ۵۵ درصد است. این میزان برای لوله با قطر ۴۰ میلی‌متر بین ۳۵ تا ۶۵ درصد و برای لوله با قطر ۶۰ میلی‌متر بین ۳۴ تا ۶۹ درصد است.

با توجه به جدول (۳) نسبت آبشستگی برای جریان غیرماندگار به جریان ماندگار برای هیدروگراف‌ها و قطرهای مختلف لوله بررسی شده در این آزمایش‌ها بین ۳۴ تا ۶۹ درصد است. با توجه به شکل (۷) در هر سه قطر لوله منحنی آبشستگی در شرایط جریان ماندگار دارای شیب بیشتری در شروع آبشستگی نسبت به منحنی‌های آزمایش‌های غیرماندگار

جدول ۳. نسبت عمق آبشستگی آزمایش‌های غیرماندگار به آزمایش‌های ماندگار (به‌صورت درصد) در زمان‌های مختلف برای سه قطر متفاوت: الف) ۲۰ میلی‌متر، ب) ۴۰ میلی‌متر و ج) ۶۰ میلی‌متر

(الف)

زمان	نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف				
(دقیقه)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۴	۰/۵	۰/۷۵
۱۰	۵۴	۴۲	۴۰	۳۷	۴۱
۲۰	۵۵	۵۱	۴۷	۴۵	۴۲
۴۰	۵۴	۵۴	۵۲	۵۱	۴۳
۸۰	۴۹	۴۹	۴۹	۵۰	۴۹
۱۲۰	۴۸	۴۷	۴۸	۴۸	۵۰

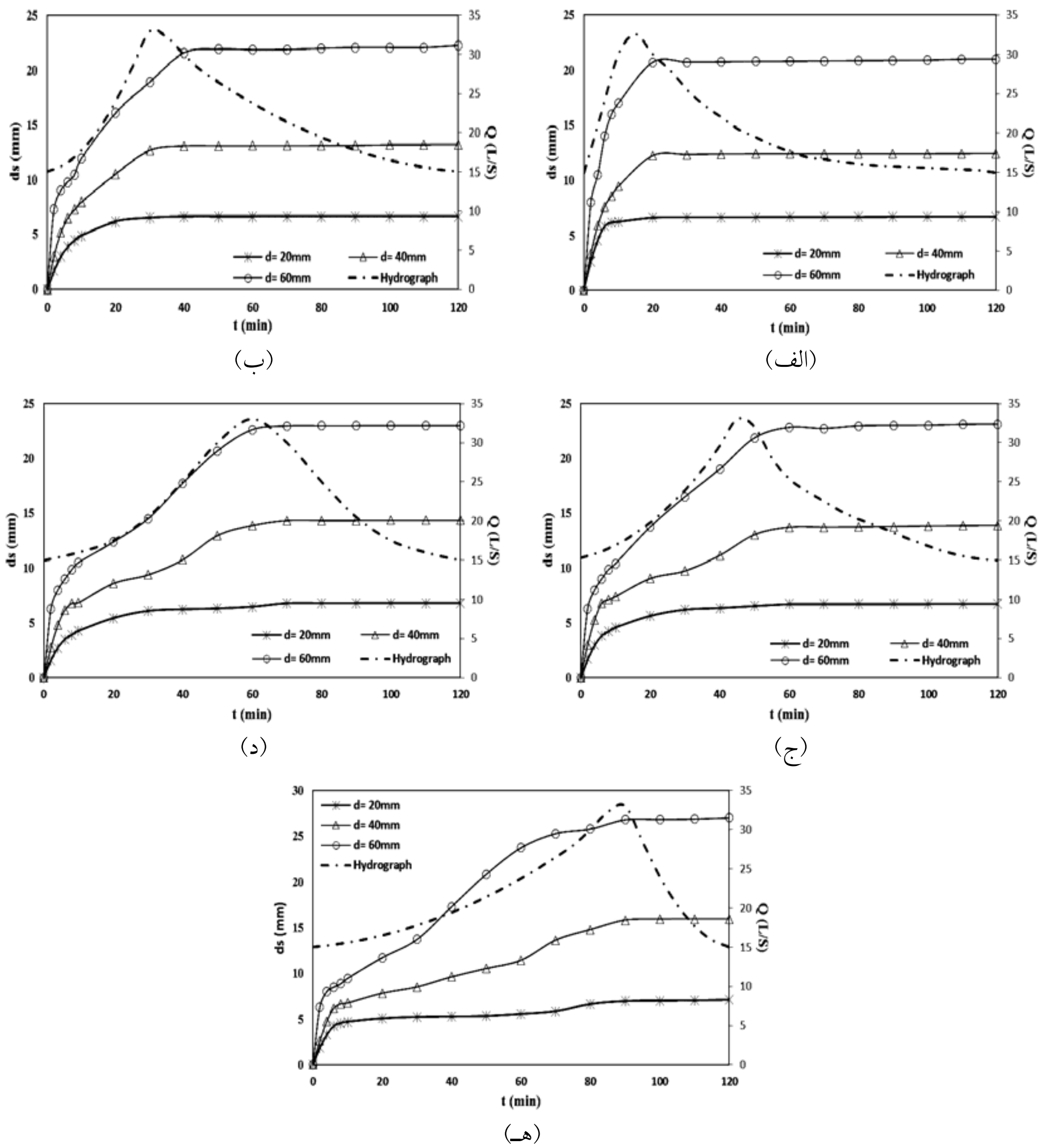
(ب)

زمان	نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف				
(دقیقه)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۴	۰/۵	۰/۷۵
۱۰	۴۹	۴۱	۳۸	۳۵	۳۵
۲۰	۶۲	۵۳	۴۶	۴۴	۴۰
۴۰	۵۶	۵۹	۵۰	۴۸	۴۳
۸۰	۵۱	۵۴	۵۷	۵۹	۶۰
۱۲۰	۴۸	۵۱	۵۳	۵۵	۶۱

(ج)

زمان	نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف				
(دقیقه)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۴	۰/۵	۰/۷۵
۱۰	۶۲	۴۳	۳۸	۳۸	۳۴
۲۰	۶۹	۵۳	۴۵	۴۱	۳۹
۴۰	۶۰	۶۱	۵۵	۵۲	۵۰
۸۰	۵۴	۵۷	۶۰	۶۰	۶۷
۱۲۰	۵۲	۵۵	۵۸	۵۸	۶۷

است که علت این مسئله وارد شدن بیشترین تنش برشی جریان بر بستر از ابتدای آزمایش و در نتیجه آبشستگی سریع بستر است. درحالی که در شرایط غیرماندگار بسته به هیدروگراف اعمالی، تنش‌برشی به تدریج به بستر وارد می‌شود که این مسئله منجر به کاهش شیب منحنی توسعه آبشستگی نسبت به زمان می‌شود. با توجه به شکل (۷) هر چقدر که طول شاخه بالارونده هیدروگراف کوتاه‌تر باشد و یا به‌عبارتی نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف کمتر باشد، شیب منحنی آبشستگی بیشتر است که علت آن رسیدن سریع‌تر هیدروگراف به دبی پیک و بیشترین تنش‌برشی وارد بر بستر است. با توجه به شکل (۷) در آزمایش‌های شرایط غیرماندگار بعد از رسیدن هیدروگراف‌ها به زمان پیک و تا مدت کوتاهی پس از آن و تا زمانی که شرایط لازم برای خروج رسوبات کنده شده از گودال آبشستگی وجوددارد، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد اما پس از این زمان تغییری در عمق گودال آبشستگی رخ نمی‌دهد. اولیویتو و همکاران (۱۰) و کریمایی طبرستانی و زراتی (۱۲) در خصوص آبشستگی پایه و کوله‌های پل و باباخانی و قدسیان (۲۲دو) در خصوص آبشستگی آبشکن‌های رودخانه‌ای در شرایط جریان غیرماندگار به نتایج مشابهی دست یافتند. همچنین چنگ و همکاران (۳) با مطالعه آبشستگی پایه پل در شرایط جریان غیرماندگار نتیجه گرفتند افزایش سرعت جریان تا دبی پیک هیدروگراف باعث تغییرات شدید عمق آبشستگی می‌شود اما بعد از آن و در شاخه نزولی تغییرات عمق آبشستگی بسیار ناچیز است. با بررسی شکل (۷) مشاهده می‌شود در آزمایش‌های مربوط به لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر منحنی‌های آبشستگی همپوشانی بیشتری با هم نسبت به آزمایش‌های



شکل ۸. توسعه گودال آبشستگی زیر لوله با قطرهای متفاوت ناشی از عبور جریان غیرماندگار با هیدروگراف‌های با نسبت زمان پیک به زمان تداوم: الف) ۰/۱، ب) ۰/۲۵، ج) ۰/۴، د) ۰/۵ و هـ) ۰/۷۵

مربوط به لوله با قطر ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر دارند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزایش قطر لوله باعث افزایش تأثیرات جریان غیرماندگار بر آبشستگی می‌شود. با توجه به شکل (۷) و جدول (۳) زمان پیک هیدروگراف هم بر توسعه گودال آبشستگی و هم بر عمق نهایی آبشستگی مؤثر است. درحالی که کریمایی طبرستانی و زراتی (۱۱) تغییر زمان پیک را فقط بر روند توسعه گودال مؤثر دانستند و عمق نهایی آبشستگی را مستقل از زمان پیک هیدروگراف اعلام کرده‌اند که علت این مسئله علاوه بر تفاوت ساختاری آبشستگی خط لوله و پایه پل می‌تواند در تفاوت در زمان تداوم هیدروگراف‌های مورد استفاده و زمان کوتاه‌تر هیدروگراف‌ها در مطالعه کریمایی طبرستانی و زراتی (۲) باشد. شکل (۸) نشان‌دهنده تغییرات آبشستگی زیر لوله با قطرهای مختلف و با عبور هیدروگراف با نسبت‌های زمان پیک به زمان تداوم متفاوت است. با توجه به شکل (۸) هر چه شیب

شاخه بالارونده هیدروگراف تندتر باشد، عمق آبشستگی سریع‌تر به‌میزان نهایی خود نزدیک می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۸) در تمامی حالات تأثیرگذارترین عامل هیدروگراف بر آبشستگی زمان پیک و یا همان شیب شاخه بالارونده هیدروگراف است و شاخه پایین‌رونده هیدروگراف تأثیر چندانی بر عمق آبشستگی نمی‌گذارد. پژوهشگران پیشین مانند چنگ و همکاران (۳) و اولیویتو و همکاران (۱۰) در خصوص پایه پل و باباخانی و قدسیان (۲) در خصوص آبشکن‌ها به نتایج مشابهی در خصوص کم‌اثر بودن شاخه پایین‌رونده هیدروگراف بر آبشستگی رسیده‌اند ولی کریمایی طبرستانی و زراتی (۱۲) علت تأثیر کم شاخه پایین‌رونده را در این آزمایش‌ها طولانی بودن زمان تداوم آزمایش‌ها دانسته و با انجام آزمایش‌هایی با زمان تداوم ۲ تا ۲۳۶ دقیقه تأثیر شاخه پایین‌رونده هیدروگراف بر عمق آبشستگی پایه پل را بررسی کرده است.

در شرایط جریان غیرماندگار نیز همانند شرایط ماندگار، افزایش قطر لوله منجر به افزایش عمق گودال آبشستگی می‌شود. به‌طوری که برای هیدروگراف‌های مختلف افزایش سه برابری قطر لوله منجر به افزایش ۲۰۰ تا ۲۸۰ درصدی عمق گودال آبشستگی شده است.

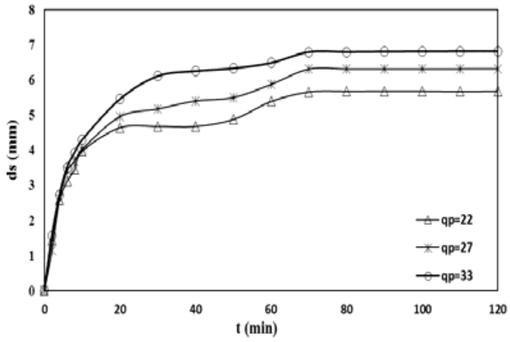
با توجه به شکل (۸) در حالت غیرماندگار نیز مانند حالت ماندگار با افزایش قطر لوله منحنی‌های آبشستگی با شیب بیشتر و در نتیجه با سرعت بیشتری شروع می‌شود که این مسئله نشان‌دهنده افزایش تنش‌برشی جریان بر بستر با افزایش قطر لوله در شرایط آزمایش‌های غیرماندگار همانند آزمایش‌ها با شرایط ماندگار است.

۲- بررسی تأثیر دبی پیک هیدروگراف بر آبشستگی

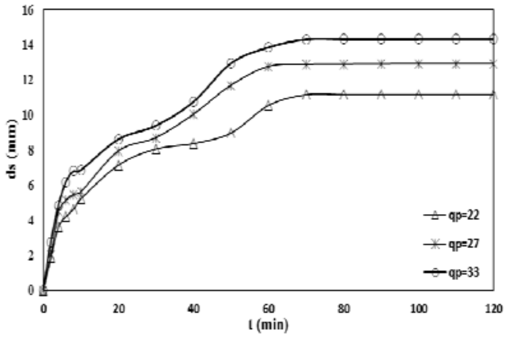
یکی از عوامل مؤثر در آبشستگی در شرایط جریان غیرماندگار شدت جریان وارده در پیک هیدروگراف است. به همین منظور تأثیر شدت جریان در پیک هیدروگراف در مطالعه حاضر بررسی شد. بدین منظور سه شدت جریان متفاوت در حالت پیک و در سه قطر لوله بررسی شدند. بحرانی‌ترین مورد، حالتی است که بیشترین شدت تنش‌برشی جریان بر بستر وارد شود درحالی که هنوز شرایط بستر زنده برقرار باشد. این حالت که در آن شدت جریان معادل ۹۵ درصد شدت جریان بحرانی و دبی برابر ۳۳ لیتر بر ثانیه است، بررسی شد، همچنین در دو حالت نسبت شدت جریان اوج به شدت جریان بحرانی ۷۵ درصد و ۶۵ درصد که هرکدام معادل دبی ۲۷ و ۲۲ لیتر هستند نیز آزمایش‌هایی انجام گرفته و نتایج حاصل مقایسه شد. شکل (۹) نشان‌دهنده توسعه گودال آبشستگی زیر لوله با سه قطر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر تحت اثر عبور جریان ماندگار و جریان غیرماندگار با هیدروگراف‌هایی با سه دبی پیک ۲۲، ۲۷ و ۳۳ لیتر بر ثانیه است.

با توجه به شکل (۹) میزان دبی پیک هیدرروگراف هم بر توسعه آبشستگی و هم بر آبشستگی در پایان آزمایش‌ها مؤثر است. علت این مسئله افزایش تنش‌برشی وارده بر بستر با افزایش دبی و در نتیجه سرعت جریان است. که این مسئله موجب کنده شدن بیشتر ذرات رسوب از کف و انتقال آنها به خارج از گودال آبشستگی می‌شود. جدول (۴) نشان‌دهنده اختلاف آبشستگی ناشی از عبور هیدروگراف با دبی پیک ۳۳ لیتر بر ثانیه نسبت به هیدروگراف با دبی پیک ۲۷ و ۲۲ لیتر بر ثانیه است.

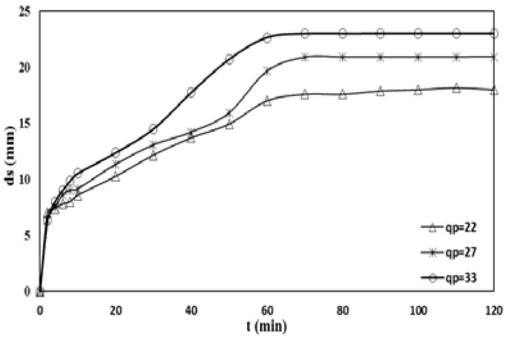
با توجه به جدول (۴) عمق آبشستگی برای هیدروگراف‌های با دبی پیک ۲۲ و ۲۷ لیتر بر ثانیه بین ۲۵ تا ۶ درصد کمتر از آبشستگی تحت اثر عبور هیدروگراف با دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه برای هر سه عمق است. در این قسمت هم همانند قسمت قبل کاهش قطر لوله موجب کاهش تأثیر تغییرات مشخصات هیدروگراف بر آبشستگی شده است و افزایش قطر لوله موجب افزایش عمق آبشستگی زیر لوله می‌شود. مطالعه صورت گرفته توسط باباخانی و قدسیان (۲) در زمینه آبشستگی اطراف آبشکن‌های تیغه‌ای در جریان غیرماندگار نیز نشان‌دهنده افزایش حدود ۳۵ درصدی عمق آبشستگی با افزایش ۲۵ درصدی دبی پیک هیدروگراف است. همچنین کریمایی طبرستانی و زراتی (۱۲) افزایش ۴۵ درصدی عمق آبشستگی پایه پل



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. توسعه گودال آبشستگی زیر لوله ناشی از عبور جریان ماندگار و جریان غیرماندگار با هیدروگراف‌های با دبی پیک متفاوت برای سه قطر لوله: الف) ۲۰ میلی‌متر، ب) ۴۰ میلی‌متر و ج) ۶۰ میلی‌متر

جدول ۴. اختلاف عمق آبشستگی ناشی از هیدروگراف با دبی پیک ۳۳ لیتر بر ثانیه با هیدروگراف با دبی پیک ۲۲ و ۲۷ لیتر بر ثانیه برای سه قطر لوله: الف) ۲۰ میلیمتر، ب) ۴۰ میلیمتر و ج) ۶۰ میلیمتر

الف

زمان	دبی پیک هیدروگراف (لیتر بر ثانیه)		
(دقیقه)	۲۲	۲۷	۳۳
۱۰	۷ درصد	۶ درصد	۰ درصد
۲۰	۱۵ درصد	۱۰درصد	۰ درصد
۴۰	۲۵ درصد	۱۴ درصد	۰ درصد
۸۰	۱۶ درصد	۷ درصد	۰ درصد
۱۲۰	۱۶ درصد	۷ درصد	۰ درصد

ب

زمان	دبی پیک هیدروگراف (لیتر بر ثانیه)		
(دقیقه)	۲۲	۲۷	۳۳
۱۰	۲۴ درصد	۱۸ درصد	۰ درصد
۲۰	۱۷ درصد	۸ درصد	۰ درصد
۴۰	۲۲ درصد	۷ درصد	۰ درصد
۸۰	۲۲ درصد	۱۰درصد	۰ درصد
۱۲۰	۲۲ درصد	۱۰ درصد	۰ درصد

ج

زمان	دبی پیک هیدروگراف (لیتر بر ثانیه)		
(دقیقه)	۲۲	۲۷	۳۳
۱۰	۱۸ درصد	۱۳ درصد	۰ درصد
۲۰	۱۷ درصد	۸ درصد	۰ درصد
۴۰	۲۲ درصد	۲۰ درصد	۰ درصد
۸۰	۲۳ درصد	۹ درصد	۰ درصد
۱۲۰	۲۲ درصد	۹ درصد	۰ درصد

با افزایش ۲۰ درصدی شدت جریان پیک هیدروگراف را گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد هدف از مطالعه حاضر بررسی غیرماندگاری جریان بر آبشستگی زیر لوله عبوری از بستر رودخانه است. بدین‌منظور داده‌های حاصل از آزمایش‌های آبشستگی زیر لوله در شرایط جریان ماندگار و همچنین شرایط جریان غیرماندگار با تغییر در برخی مشخصات هیدروگراف‌های جریان تجزیه و تحلیل شد. نتایج کلی این پژوهش نشان داد شرایط و میزان آبشستگی در شرایط جریان ماندگار نسبت به شرایط جریان غیرماندگار متفاوت است، همچنین ایجاد تغییراتی در مشخصات هیدروگراف مانند دبی پیک و یا فاکتورهای زمانی هیدروگراف نیز آبشستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار، افزایش قطر لوله منجر به افزایش عمق گودال آبشستگی می‌شود، به‌گونه‌ای که افزایش سه برابری قطر لوله در آزمایش‌ها منجر به افزایش ۱۸۵ درصدی عمق گودال آبشستگی شده است.

بخش زیادی از آبشستگی صورت گرفته در زیر لوله در شرایط ماندگار در چند دقیقه ابتدایی صورت می‌گیرد، به‌طوری که با توجه به قطر لوله بین ۶۸ تا ۸۲ درصد از آبشستگی نهایی در ۱۰ دقیقه ابتدایی و معادل ۱۰ درصد کل زمان آزمایش رخ می‌دهد. عمق آبشستگی ناشی از شرایط جریان غیرماندگار پس از مدت کوتاهی از پیک هیدروگراف به‌میزان نهایی خود می‌رسد و بعد از این زمان تغییری در عمق آبشستگی ایجاد نمی‌شود.

عمق آبشستگی نهایی در شرایط جریان غیرماندگار نسبت به شرایط جریان ماندگار در تمامی حالات مورد بررسی کمتر بوده است و نسبت آبشستگی برای جریان غیرماندگار به جریان ماندگار برای هیدروگراف‌ها و قطرهای مختلف لوله بررسی شده در این مطالعه بین ۳۴ تا ۶۹ درصد است که این مسئله نشان‌دهنده اهمیت مطالعه آبشستگی در شرایط جریان غیرماندگار است.

در شرایط ماندگار و برای زمانی مشابه با زمان تداوم هیدروگراف‌های مورد بررسی، تا پایان زمان آزمایش عمق آبشستگی افزایش می‌یابد اما در شرایط غیرماندگار پس از عبور پیک هیدروگراف به واسطه کاهش تنش‌های برشی وارد بر کف، عمق آبشستگی ثابت می‌ماند.

افزایش شیب شاخه بالارونده هیدروگراف باعث می‌شود عمق آبشستگی با سرعت بیشتری به نزدیکی میزان نهایی خود برسد اما شیب شاخه پایین رونده هیدروگراف تأثیر چندانی بر روند آبشستگی و عمق نهایی آبشستگی ندارد.

تغییر در دبی پیک هیدروگراف با تغییر در شدت جریان و تنش‌برشی وارد بر بستر موجب تغییر در عمق آبشستگی می‌شود. به‌طوری که با افزایش دبی پیک هیدروگراف از ۲۲ لیتر بر ثانیه به ۲۴ و ۳۳ لیتر بر ثانیه عمق آبشستگی در قطرهای مختلف بین ۷ تا ۲۲ درصد افزایش می‌یابد که این مسئله نشان‌دهنده تأثیر دبی پیک هیدروگراف بر آبشستگی است.

پیشنهاد می‌شود تأثیر سایر عوامل مؤثر بر هیدروگراف‌ها مانند زمان تداوم و رفتار شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده و همچنین عوامل مؤثر بر خط لوله مانند عمق کارگذاری، زاویه برخورد و لوله های مرکب و همچنین راهکارهای حفاظتی از خط لوله در برابر آبشستگی در شرایط غیرماندگار بررسی شود.

منابع مورد استفاده

1. Azamathulla, H. M., M. A. M. Yusoff and Z. A. Hasan. 2014. Scour below submerged skewed pipeline. *Journal of Hydrology* 509: 615–620.
2. Babakhani, A., M. Ghodsian and A. Schleiss. 2018. Experimental Investigation of Normral Hydrograph Characteristics Effect on Scour Around Spur dike. *Modares Civil Engineering Journal* 18(4): 25–36.
3. Chang, W. Y., J. S. Lai and C. L. Yen. 2004. Evolution of Scour depth at circular bridge piers. *Journal of*

Hydraulic Engineering 130 (9): 905–913.
4. Dey, S. and N. P. Singh. 2008. Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 134 (5): 588–600.
5. Jensen, B. L., B. M. Sumer, H. R. Jensen and J. Fredsoe. 1990. Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 112(3): 206-221.
6. Kjeldsen, S. P., O. Gjorsvik, K. G. Bringaker and J. Jacobsen. 1973. Local scour near offshore pipelines. *In:* Proceeding of the 2nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, University of Iceland. Reykjavik. Iceland.
7. Lauchlan, C. S. and B. W. Melville. 2001. Riprap protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(5): 412–418.
8. Link, O., C. Castillo, A. Pizarro, A. Rojas, B. Ettmer, C. Escauriaza and S. Manfreda. 2017 A model of bridge pier scour during flood waves. *Journal of Hydraulic Research* 55(3): 310–323.
9. Lu, J., Z. Z. Shi, J. H. Hong, J. J. Lee, R. Raikar. 2011. Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(1): 45–56.
10. Oliveto, G., W. H. Hager and F. Asce. 2005. Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering* 1312: 97–105.
11. Tabarestani, M. K. and A. R. Zarrati. 2014. Influence of Pick Time of Hydrograph on Bridge Pier Scour. *Hydraulic Journal of Iranian Hydraulic Association* 9(3): 15–32.
12. Tabarestani, M. K. and A. R. Zarrati. 2017. Local scour calculation around bridge pier during flood event. *KSCE Journal of Civil Engineering. Korean Society of Civil Engineers* 21(4): 1462–1472.
13. Zhao, M., S. Vaidya, Q. Zhang and L. Cheng. 2015. Local scour around two pipelines in tandem in steady current. *Journal of Coastal Engineering* 98: 1–15.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 23, Winter 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Experimental Investigation on the Influence of Some Unsteady Flow Parameters on Bed Scour under the Pipeline Crossing Across the Current

E. Shaker*, S. M. Kashefipour and M. Shafaei Bajestan[1]

(Received: December 2-2018 ; Accepted: February 17-2019)

Abstract

Erosion under the conveying pipeline affected by river flow at the cross to rivers is one the important reasons for breaking the pipelines that can lead to leakage. While the mechanism of erosion under the conveying pipeline in steady flow has been studied by many researchers, studies have shown the importance of scouring research in flood times under unsteady conditions. So, this study has been concerned with the investigation of bed river erosion under the conveying pipeline at the conflict of river in unsteady condition. To achieve this aim, some effective hydrograph's parameters were changed in different scenarios and the results were compared to the steady condition. The result showed the erosion's ratio of unsteady condition to steady one was 34 to 69 percent. Also, the rise of flood hydrograph's peak led to increasing depth erosion from 7% to 22%.

Keywords: Scour, Unsteady current, Pipeline, Hydrograph

1. Department of Water Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
*: Corresponding author: esmaeil.shaker@yahoo.com