

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

اسماعیل شاکر*، سید محمود کاشفی پور و محمود شفاعی بجمستان^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 به صورت 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 به عنوان دبی جریان ماندگار و بررسی و استخراج روابط مربوط به انتقال رسوب و آبشستگی اطراف سازه‌های مختلف بر مبنای 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

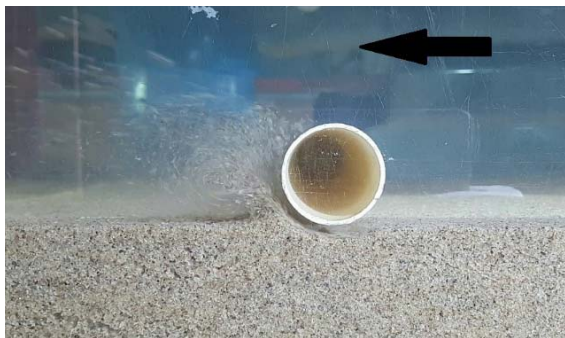
آزمایش‌های ایشان توسط چند دوربین با کیفیت فیلم‌برداری مناسب برداشت و ثبت شد. ایشان در این مطالعه تأثیر تغییرات در شاخه بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف و همچنین تغییرات دبی ماکزیمم بر آبشستگی را مطالعه کردند. از نتایج مطالعات ایشان می‌توان به تأثیر بیشتر دبی پیک هیدروگراف بر آبشستگی نسبت به سایر پارامترها 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.

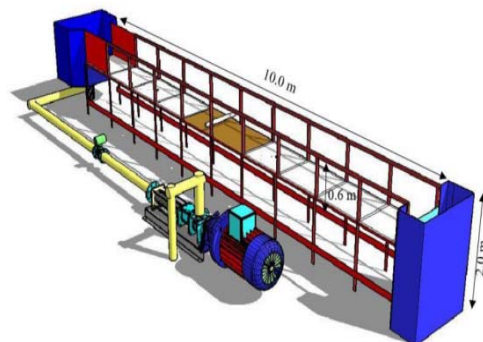
مواد و روش‌ها

همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین اشاره شد، هدف از این پژوهش بررسی آبشستگی اطراف پایه پل هنگام عبور مقطع و بستر رودخانه تحت تأثیر جریان ماندگار و غیرماندگار

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 در خصوص مطالعه آبشستگی تحت تأثیر 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 به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آبشستگی نهایی و توسعه آبشستگی هنگام



شکل ۲. نمایی از آبشستگی زیر خط لوله



شکل ۱. نمایه فلوم مورد استفاده

می‌کند و بعد از انجام پردازش‌های مورد نیاز دستورات لازم برای تنظیم دبی را به سیستم ارسال می‌کند. به منظور 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 به آرامی اشباع شود. بعد از بالا آمدن آب در فلوم کارگذاری می‌شد و با تراز و گونیا از صحت کارگذاری آن اطمینان حاصل می‌شد. بعد از کارگذاری لوله به آرامی با تغییر در ارتفاع دریچه آب به عمق اولیه جریان به‌ازای دبی پایه هیدروگراف رسید و پمپ با توجه به نوع آزمایش شروع به کار 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 ارباب 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.

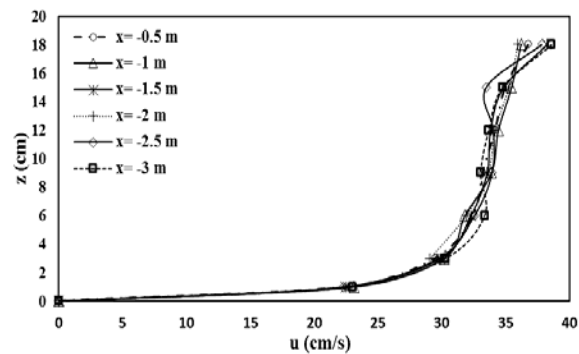
آزمایش‌های مربوط به این پژوهش در دو قسمت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت. عمق و دبی جریان در آزمایش‌های ماندگار و غیرماندگار به شکلی انتخاب شدند که هم در آزمایش‌های ماندگار و هم آزمایش‌های غیرماندگار شرایط آزمایش‌های آب زلال برقرار باشد. بدین منظور سرعت جریان

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 پایین دست 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

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 به سمت 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 به سمت 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 بر 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.



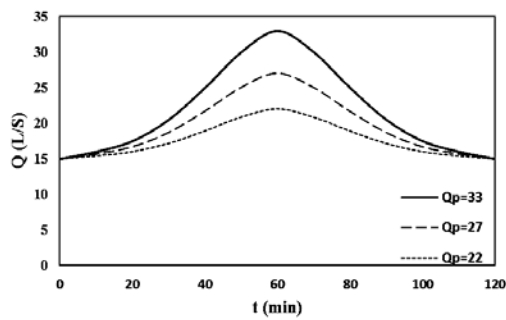
شکل ۳. توزیع عمقی سرعت در مقاطع طولی در بالادست محل قرارگیری لوله

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

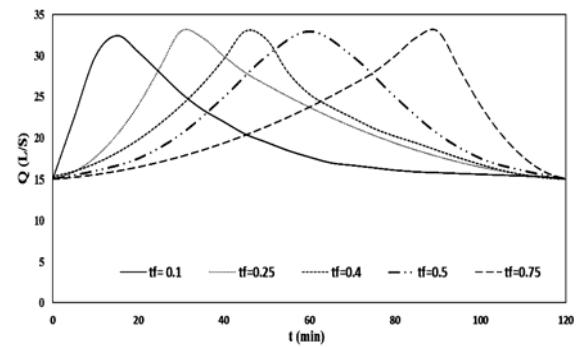
$$\frac{V_C}{V_{*C}} = 5.751 \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱) V_C سرعت بحرانی رسوبات بر اساس دیاگرام شیلدز، d_{50} قطر متوسط رسوبات و y عمق جریان نزدیک‌شونده است. با توجه به رابطه (۱) و شرایط موجود در آزمایشگاه، چنانچه دبی به میزان 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 بر 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 بر 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



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



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

مستقیم دارد، افزایش سرعت باعث افزایش گرادیان فشار و جوشش رسوب از زیر لوله شده و در این مرحله آبستگي زیر لوله آغاز می‌شود. با ادامه افزایش سرعت تراوش جریان، بعد از مدت کوتاهی سطح رسوب زیر لوله گسیخته می‌شود که به این مرحله پایینی گفته می‌شود. در اثر پدیده پایینی شکاف کوچکی بین لوله و بستر به وجود می‌آید که مقدار قابل توجهی از جریان وارد آن می‌شود و این مسئله موجب افزایش شدید تنش برشی جریان تنش برشی زیر خط لوله تا بیش از سه برابر تنش برشی جریان نزدیک شونده می‌شود (۶). در نتیجه مقدار زیادی از رسوبات زیر خط لوله دچار آبستگي شده و شکاف به وجود آمده بزرگ‌تر و مخلوط آب و رسوب از آن خارج می‌شود. این روند آبستگي به فرسایش تونلی معروف است. با افزایش سایز شکاف سرعت در شکاف کاهش یافته و فرسایش تونلی به تدریج متوقف می‌شود. به دنبال فرسایش تونلی فرم بستر دون در پایین دست لوله تشکیل شده و به تدریج به سمت پایین دست حرکت می‌کند.

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

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 آبستگي 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.

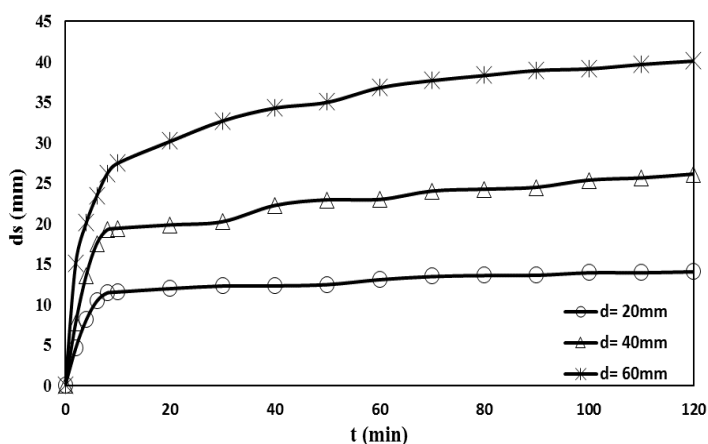
نتایج و بحث

بررسی آزمایش‌های انجام شده در شرایط ماندگار

در این بخش تغییرات عمق آبستگي 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 به وجود می‌آید که این گرادیان فشار موجب تراوش زیر بستر می‌شود و با توجه به اینکه فشار با توان دوم سرعت رابطه

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	غیر ماندگار	UH۱	۲۰	۰/۶۵	۶۰
۵	غیر ماندگار	UH۲	۴۰	۰/۶۵	۶۰
۶	غیر ماندگار	UH۳	۶۰	۰/۶۵	۶۰
۷	غیر ماندگار	UH۴	۲۰	۰/۷۵	۶۰
۸	غیر ماندگار	UH۵	۴۰	۰/۷۵	۶۰
۹	غیر ماندگار	UH۶	۶۰	۰/۷۵	۶۰
۱۰	غیر ماندگار	UH۷	۲۰	۰/۹۵	۶۰
۱۱	غیر ماندگار	UH۸	۴۰	۰/۹۵	۶۰
۱۲	غیر ماندگار	UH۹	۶۰	۰/۹۵	۶۰
۱۳	غیر ماندگار	UH۱۰	۲۰	۰/۹۵	۱۲
۱۴	غیر ماندگار	UH۱۱	۴۰	۰/۹۵	۱۲
۱۵	غیر ماندگار	UH۱۲	۶۰	۰/۹۵	۱۲
۱۶	غیر ماندگار	UH۱۳	۲۰	۰/۹۵	۳۰
۱۷	غیر ماندگار	UH۱۴	۴۰	۰/۹۵	۳۰
۱۸	غیر ماندگار	UH۱۵	۶۰	۰/۹۵	۳۰
۱۹	غیر ماندگار	UH۱۶	۲۰	۰/۹۵	۴۸
۲۰	غیر ماندگار	UH۱۷	۴۰	۰/۹۵	۴۸
۲۱	غیر ماندگار	UH۱۸	۶۰	۰/۹۵	۴۸
۲۲	غیر ماندگار	UH۱۹	۲۰	۰/۹۵	۹۰
۲۳	غیر ماندگار	UH۲۰	۴۰	۰/۹۵	۹۰
۲۴	غیر ماندگار	UH۲۱	۶۰	۰/۹۵	۹۰



شکل ۶. توسعه زمانی بیشترین عمق آبشستگی در شرایط ماندگار

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

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

افقی نشده است که این مسئله نشان‌دهنده عدم تعادل گودال آبستگي زیر لوله در طول زمان آزمایش‌هاست.

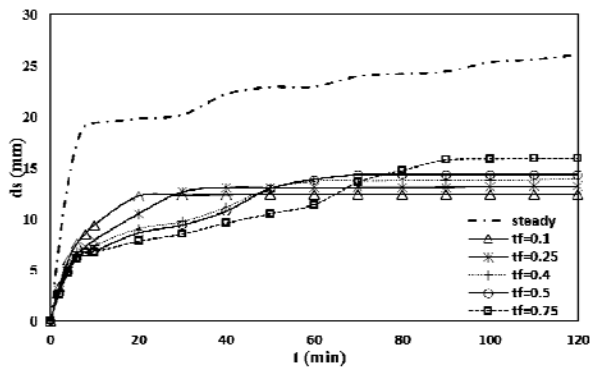
بررسی آزمایش‌های انجام شده در شرایط غیرماندگار

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

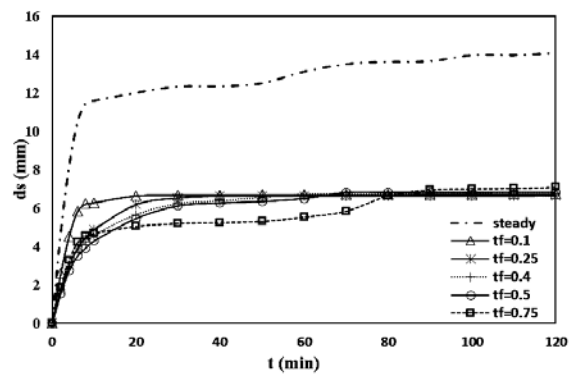
همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین ذکر شد با توجه به شرایط جریان رودخانه‌ها در طبیعت بررسی آزمایشگاهی آبستگي بستر تحت اثر سازه‌های گوناگون در شرایط جریان غیرماندگار واقع‌بینانه‌تر است. به همین دلیل هدف اصلی و نوآوری این مطالعه بررسی آبستگي زیر خط لوله متقاطع با رودخانه در شرایط جریان غیرماندگار است. الگوی 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 آبستگي و همچنین رسوبات کنده‌شده از کف پیوسته توسط جریان از گودال آبستگي 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 آبستگي شکل می‌گیرد که در برخی آزمایش‌ها پس‌روی این پشته به سمت لوله باعث کاهش عمق آبستگي می‌شود. بعد از گذشت مدتی از عبور پیک

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

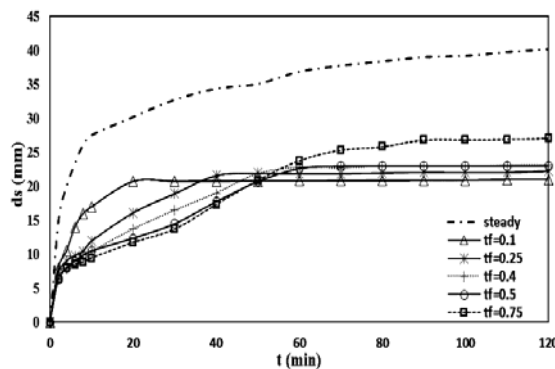
با توجه به شکل (۶) در پایان زمان آزمایش‌ها منحنی توسعه آبستگي برای هر سه قطر لوله همچنان دارای شیب بوده و



(ب)



(الف)



(ج)

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

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

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 پایین دست 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)

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

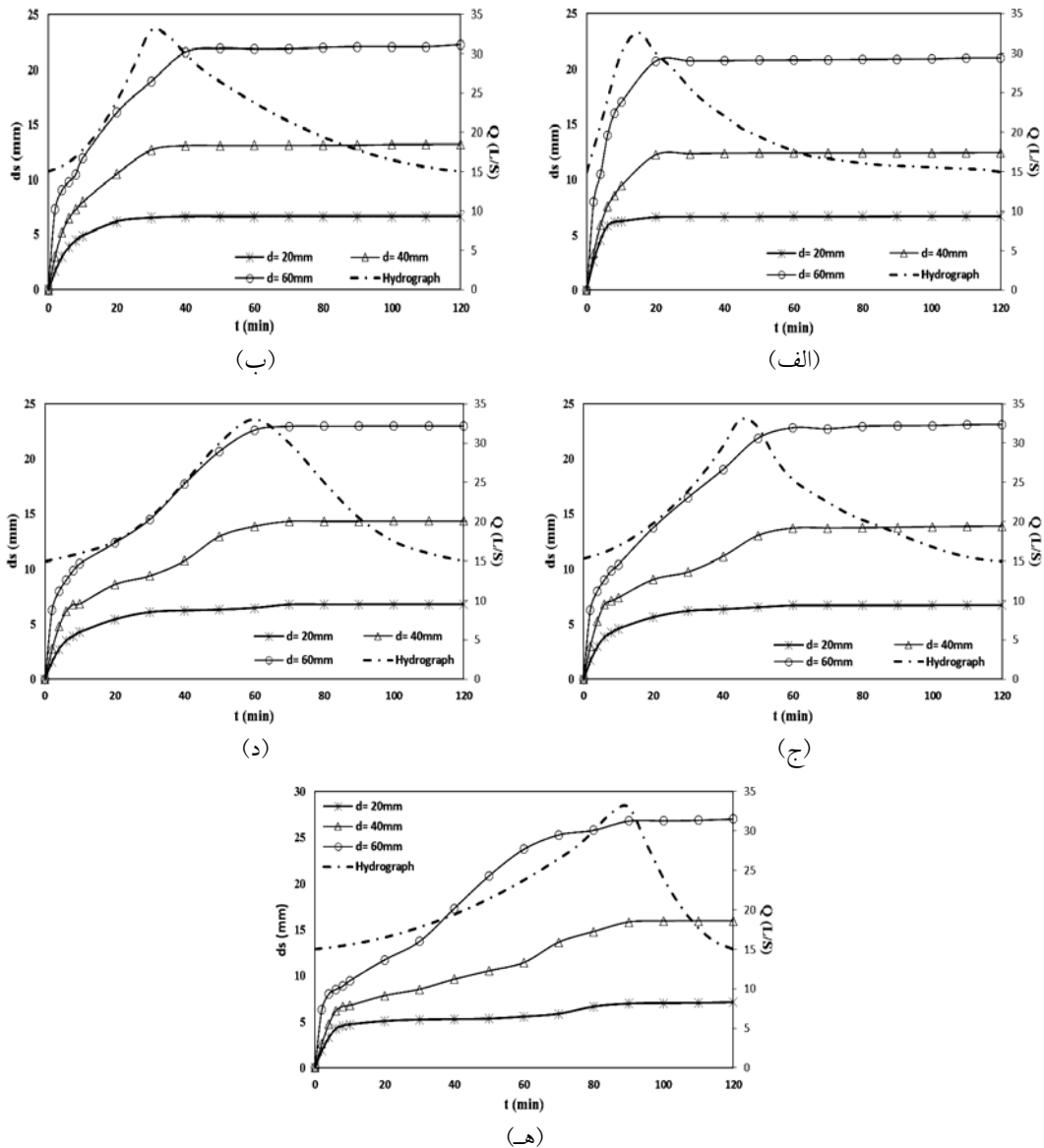
(ب)						(الف)					
نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف					زمان	نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف					زمان
۰/۷۵	۰/۵	۰/۴	۰/۲۵	۰/۱	(دقیقه)	۰/۷۵	۰/۵	۰/۴	۰/۲۵	۰/۱	(دقیقه)
۳۵	۳۵	۳۸	۴۱	۴۹	۱۰	۴۱	۳۷	۴۰	۴۲	۵۴	۱۰
۴۰	۴۴	۴۶	۵۳	۶۲	۲۰	۴۲	۴۵	۴۷	۵۱	۵۵	۲۰
۴۳	۴۸	۵۰	۵۹	۵۶	۴۰	۴۳	۵۱	۵۲	۵۴	۵۴	۴۰
۶۰	۵۹	۵۷	۵۴	۵۱	۸۰	۴۹	۵۰	۴۹	۴۹	۴۹	۸۰
۶۱	۵۵	۵۳	۵۱	۴۸	۱۲۰	۵۰	۴۸	۴۸	۴۷	۴۸	۱۲۰

(ج)

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

آبخستگی وجود دارد، عمق آبخستگی افزایش می‌یابد اما پس از این زمان تغییری در عمق گودال آبخستگی رخ نمی‌دهد. اولویتو و همکاران (۱۰) و کریمایی طبرستانی و زراتی (۱۲) در خصوص آبخستگی پایه و کوله‌های پل و باباخانی و قدسیان (۲۲) در خصوص آبخستگی آبشکن‌های رودخانه‌ای در شرایط جریان غیرماندگار به نتایج مشابهی دست یافتند. همچنین چنگ و همکاران (۳) با مطالعه آبخستگی پایه پل در شرایط جریان غیرماندگار نتیجه گرفتند افزایش سرعت جریان تا دبی پیک هیدروگراف باعث تغییرات شدید عمق آبخستگی می‌شود اما بعد از آن و در شاخه نزولی تغییرات عمق آبخستگی بسیار ناچیز است. با بررسی شکل (۷) مشاهده می‌شود در آزمایش‌های مربوط به لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر منحنی‌های آبخستگی همپوشانی بیشتری با هم نسبت به آزمایش‌های

است که علت این مسئله وارد شدن بیشترین تنش برشی جریان بر بستر از ابتدای آزمایش و در نتیجه آبخستگی سریع بستر است. درحالی که در شرایط غیرماندگار بسته به هیدروگراف اعمالی، تنش برشی به تدریج به بستر وارد می‌شود که این مسئله منجر به کاهش شیب منحنی توسعه آبخستگی نسبت به زمان می‌شود. با توجه به شکل (۷) هر چقدر که طول شاخه بالارونده هیدروگراف کوتاه‌تر باشد و یا به عبارتی نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف کمتر باشد، شیب منحنی آبخستگی بیشتر است که علت آن رسیدن سریع‌تر هیدروگراف به دبی پیک و بیشترین تنش برشی 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



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 ه) ۰/۷۵

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

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

است که بیشترین شدت تنش برشی 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 هر کدام معادل دبی ۲۷ و ۲۲ لیتر هستند نیز آزمایش‌هایی انجام گرفته و نتایج حاصل مقایسه شد. شکل (۹) نشان‌دهنده توسعه گودال آبستگي 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 هیدروگراف هم بر توسعه آبستگي و هم بر آبستگي در پایان آزمایش‌ها مؤثر است. علت این مسئله افزایش تنش برشی 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 آبستگي می‌شود. جدول (۴) نشان‌دهنده اختلاف آبستگي ناشی از عبور هیدروگراف با دبی پیک ۳۳ لیتر بر ثانیه نسبت به هیدروگراف با دبی پیک ۲۷ و ۲۲ لیتر بر ثانیه است.

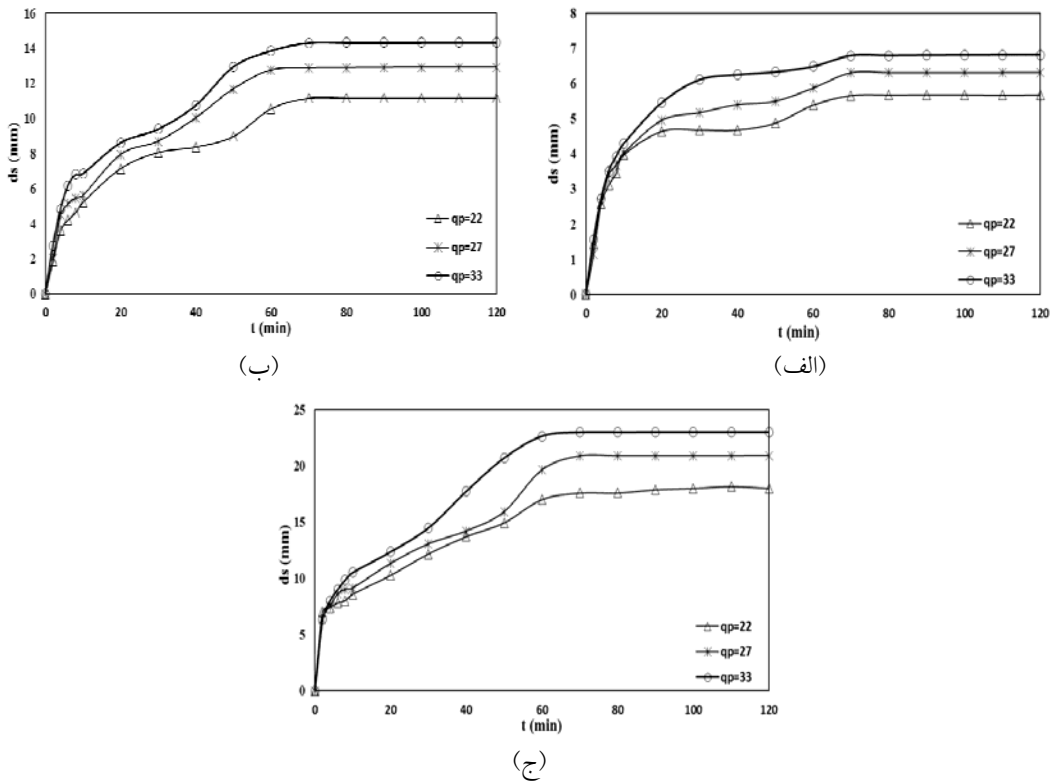
با توجه به جدول (۴) عمق آبستگي برای هیدروگراف‌های با دبی پیک ۲۲ و ۲۷ لیتر بر ثانیه بین ۲۵ تا ۶ درصد کمتر از آبستگي تحت اثر عبور هیدروگراف با دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه برای هر سه عمق است. در این قسمت هم همانند قسمت قبل کاهش قطر لوله موجب کاهش تأثیر تغییرات مشخصات هیدروگراف بر آبستگي شده است و افزایش قطر لوله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

شاخه بالارونده هیدروگراف تندتر باشد، عمق آبستگي سریع‌تر به میزان نهایی خود نزدیک می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۸) در تمامی حالات تأثیرگذارترین عامل هیدروگراف بر آبستگي زمان پیک و یا همان شیب شاخه بالارونده هیدروگراف است و شاخه پایین‌رونده هیدروگراف تأثیر چندانی بر عمق آبستگي نمی‌گذارد. پژوهشگران پیشین مانند چنگ و همکاران (۳) و اولیوتو 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 آبستگي 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 آبستگي پایه پل را بررسی کرده است.

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

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

۲- بررسی تأثیر دبی پیک هیدروگراف بر آبستگي یکی از عوامل مؤثر در آبستگي 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



شکل ۹. توسعه گودال آبشستگی زیر لوله ناشی از عبور جریان ماندگار و جریان غیرماندگار با هیدروگراف‌های با دبی بیک 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 بیک ۳۳ لیتر بر ثانیه با هیدروگراف با دبی بیک ۲۲ و ۲۷ لیتر بر ثانیه برای سه قطر لوله: الف) ۲۰ میلی‌متر، ب) ۴۰ میلی‌متر و ج) ۶۰ میلی‌متر

دبی بیک هیدروگراف (لیتر بر ثانیه)			زمان (دقیقه)	دبی بیک هیدروگراف (لیتر بر ثانیه)			الف
۳۳	۲۷	۲۲		۳۳	۲۷	۲۲	
درصد ۰	درصد ۱۸	درصد ۲۴	۱۰	درصد ۰	درصد ۶	درصد ۷	۱۰
درصد ۰	درصد ۸	درصد ۱۷	۲۰	درصد ۰	درصد ۱۰	درصد ۱۵	۲۰
درصد ۰	درصد ۷	درصد ۲۲	۴۰	درصد ۰	درصد ۱۴	درصد ۲۵	۴۰
درصد ۰	درصد ۱۰	درصد ۲۲	۸۰	درصد ۰	درصد ۷	درصد ۱۶	۸۰
درصد ۰	درصد ۱۰	درصد ۲۲	۱۲۰	درصد ۰	درصد ۷	درصد ۱۶	۱۲۰

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

به شرایط جریان ماندگار در تمامی حالات مورد بررسی کمتر بوده است و نسبت آبستتگی 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 آبستتگی در شرایط جریان غیرماندگار است.

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

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

تغییر در دبی پیک هیدروگراف با تغییر در شدت جریان و تنش‌برشی وارد بر بستر موجب تغییر در عمق آبستتگی می‌شود. به طوری که با افزایش دبی پیک هیدروگراف از ۲۲ لیتر بر ثانیه به ۲۴ و ۳۳ لیتر بر ثانیه عمق آبستتگی در قطرهای مختلف بین ۷ تا ۲۲ درصد افزایش می‌یابد که این مسئله نشان‌دهنده تأثیر دبی پیک هیدروگراف بر آبستتگی 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 لوله‌های مرکب و همچنین راهکارهای حفاظتی از خط لوله در برابر آبستتگی در شرایط غیرماندگار بررسی شود.

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

نتیجه گیری

همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد هدف از مطالعه حاضر بررسی غیرماندگاری جریان بر آبستتگی زیر لوله عبوری از بستر رودخانه است. بدین منظور داده‌های حاصل از آزمایش‌های آبستتگی 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 آبستتگی 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 آبستتگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار، افزایش قطر لوله منجر به افزایش عمق گودال آبستتگی می‌شود، به گونه‌ای که افزایش سه برابری قطر لوله در آزمایش‌ها منجر به افزایش ۱۸۵ درصدی عمق گودال آبستتگی شده است.

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

عمق آبستتگی نهایی در شرایط جریان غیرماندگار نسبت

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 Normal 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* 131(2): 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.

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 Bajestan¹

(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