

بررسی آزمایشگاهی تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی به منظور کنترل آبشستگی

موضعی پایه با مقطع مستطیلی شکاف دار مثلثی شکل

مهناز حیدری بنی^۱، مرتضی بختیاری*^۲، مجتبی صانعی^۳ و سید محمود کاشفی پور^۴

(۱) کارشناس ارشد، گروه عمران- آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

(۲) استادیار، گروه مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

(۳) دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، تهران، ایران.

(۴) استاد، گروه مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: mortezabakhtiari@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۲۳

چکیده

پلها از جمله مهم ترین و پرکاربردترین سازه های رودخانه های هستند و به عنوان کلید راه های ارتباطی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. وقوع آبشستگی موضعی یکی از دلایل عمده عدم پایداری پلها و در نهایت شکست آنهاست که سالیانه هزینه های بسیار زیاد جانی و مالی را به دولت ها تحمیل می کند. تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی روش های کنترل و کاهش آبشستگی اطراف پایه ی پل ها انجام گرفته است که از جمله آنها، استفاده از شکاف در پایه ی پلها می باشد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی آزمایشگاهی تغییرات آبشستگی حداکثر نسبت به زمان، می باشد. بدین منظور دو شکاف مثلث و مثلث برعکس با مساحت سطح برابر، در دو تراز قرارگیری هم تراز بستر، $1/5$ و 3 سانتی متر بالای بستر در دو دبی $25/6$ و 32 لیتر در ثانیه و بر روی رسوب با قطر متوسط $0/5$ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد در تمام حالت ها حضور شکاف در پایه پل موجب کاهش عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله ی آبشستگی شده است و عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله ی آبشستگی با تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر و عدد فرود جریان و زمان رابطه ی مستقیم دارد.

واژه های کلیدی: پایه پل، آبشستگی موضعی، شکاف و زمان.

مقدمه

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند و به‌عنوان کلید راه‌های ارتباطی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. هرساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از این پل‌ها، درست زمانی که بیش‌ترین نیاز به آن‌ها وجود دارد تخریب می‌گردند. یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها آبشستگی^۱ اطراف پایه‌های پل هست. با اینکه مصالح ساختمانی و فنون سازه‌ای پیشرفت چشم‌گیری داشته است، تعداد پل‌های تخریب شده بر اثر آبشستگی اطراف پایه‌ها روزبه‌روز بیش‌تر می‌شود. آبشستگی پایه پل‌ها بزرگ‌ترین دلیل شکست پل‌ها در ایالات متحده آمریکا می‌باشد. در طول ۳۰ سال گذشته بیشتر از ۱۰۰۰ پل از ۶۰۰۰۰۰ پل ساخته شده در ایالات متحده آمریکا تخریب شده‌اند که ۶۰ درصد آن‌ها به دلیل آبشستگی بوده است (Sumer and Fredsoe, 2002). بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۱۹۸۷، ۹۰ پل در نیویورک، پنسیلوانیا، ویرجینیا و ویرجینیای شرقی به دلیل تخریب پایه‌ها یا تکیه‌گاه ویران شدند. مکانیزم آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل بسیار پیچیده می‌باشد (Melville and Coleman, 2010; Raudkivi, 1990). عواملی نظیر تنگ شدن مسیر جریان و ایجاد جریان‌های ثانویه و گردابی در اطراف پایه‌ها موجب آبشستگی موضعی ذرات در اطراف پایه می‌شود که اجزا اصلی این سیستم جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب‌های جاری می‌باشند. جریان رو به پایین همانند یک جت عمودی عمل کرده و پس از برخورد به بستر رودخانه ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. بخشی از جریان پایین‌رونده که به سمت بالا بازگشت می‌کند، در برخورد به جریان عمومی رودخانه، مجبور به حرکت در جهت جریان شده و دوباره به پایه برخورد می‌کند. این چرخش جریان و بازگشت آن در داخل حفره، گردابی تشکیل می‌دهد که به تدریج در دو طرف پایه، امتدادیافته و شکلی شبیه نعل اسبی پدید می‌آورد که به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند (EL-Ghorab, 2013). در اثر جدایی جریان در کناره‌های پایه نیز گرداب‌هایی تشکیل می‌شوند که محور آن‌ها عمود بر بستر رودخانه است و به آن‌ها گرداب برخاستگی می‌گویند. این گرداب‌ها همانند گرداب ذرات بستر را جدا کرده و در معرض جریان قرار می‌دهند و به انتقال ذرات از جلو اطراف پایه به سمت پایین دست کمک می‌کنند (Chiew, 1992). گرداب‌های دیگری نیز در جلوی پایه شکل می‌گیرند که به آن‌ها گرداب موج کمانی یا سطحی گفته می‌شود که در جریانات کم‌عمق دارای اهمیت می‌باشند (Raudkivi, 1998). روش‌های مختلفی برای جلوگیری و یا کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل پیشنهاد شده است، که می‌توان آن‌ها را به دودسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. در روش مستقیم نیروی مقاوم را تغییر می‌دهند و مقاومت بستر در مقابل تنش‌های وارده افزایش می‌یابد؛ این کار با تعویض مصالح موجود به مصالح مقاوم‌تر انجام می‌شود. معمول‌ترین شیوه در این روش استفاده از سنگچین است. در روش غیرمستقیم با اصلاح

^۱ Scouring

الگوی جریان در اطراف پایه نیروهای مخرب کاهش داده می‌شوند که از جمله می‌توان به استفاده از طوق و شکاف اشاره کرد. در سال‌های اخیر استفاده از شکاف در پایه پل به عنوان روشی جدید در این زمینه مطرح گردیده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقات صورت پذیرفته و تأثیر قابل قبول شکاف پایه در کاهش عمق تعادلی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل استنباط می‌شود این روش می‌تواند به عنوان روشی مؤثر در حفاظت پل‌ها در برابر آب‌شستگی موضعی مورد توجه مهندسين طراح قرار گیرد، اما از طرفی در حال حاضر آگاهی‌ها در مورد چگونگی طراحی شکاف‌های پایه جامع نبوده و تاکنون این روش در پل‌ها به صورت عملی به کار گرفته نشده است و نتایج اندک آزمایشگاهی موجود در مقالات نیز محدود بوده و اکثراً با شکاف‌هایی مستطیلی شکل و پایه‌های پل دایروی یا لبه‌گرد صورت پذیرفته‌اند. بنابراین انجام تحقیقات بیشتر برای شناخت هرچه بهتر مزایا و محدودیت‌های این روش برای کاربردی شدن آن در طرح‌های پل‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. شکاف در پایه دو عملکرد مختلف دارد. اگر شکاف نزدیک بستر قرار داشته باشد، با ایجاد جریان افقی، جریان رو به پایین را که یکی از عوامل فرسایش اطراف پایه است به فاصله‌ای دورتر از پایه، منحرف می‌کند و باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. اگر شکاف نزدیک سطح آب قرار داشته باشد، باعث کاهش مؤثر عمق جریان و در نتیجه کاهش گرادیان فشار بین سطح آب و کف می‌شود. این امر شدت جریان رو به پایین را کاهش می‌دهد و باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌گردد. Chiew (۱۹۹۲) تأثیر شکاف را در دو موقعیت نزدیک بستر و سطح آب، بر میزان آب‌شستگی بررسی نمود. نتایج وی نشان داد که عملکرد شکاف در کاهش عمق آب‌شستگی با افزایش طول و عرض شکاف افزایش می‌یابد. همچنین شکاف نزدیک سطح آب به شکل مؤثری عمق جریان را می‌کاهد که باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. Vittal و همکاران (۱۹۹۴) با جایگزین کردن تکه پایه با سه پایه به قطر کوچک‌تر و با زاویه ۱۲۱ درجه در دو حالت گروه پایه جزئی و گروه پایه کامل به مطالعه آب‌شستگی پرداختند و میزان کاهش آب‌شستگی را در بهترین شرایط در گروه پایه کامل برابر ۹۳ درصد گزارش نمودند. نتایج مطالعه Kumar و همکاران (۱۹۹۹) نشان می‌دهد که شکاف در کاهش عمق آب‌شستگی مؤثر است به‌ویژه اگر شکاف تا سطح بستر امتداد داشته باشد. ولی شکاف عملاً در جریان‌هایی که نسبت به شکاف زاویه انحراف بالایی دارند بی‌تأثیر است. نظری‌ها (۱۳۸۰)، به بررسی توسعه‌ی آب‌شستگی موضعی اطراف مدل فیزیکی پایه‌ی پل استوانه‌ای با ابعاد مختلف تحت شرایط آب زلال و در طول زمان پرداخت. نتایج نشان داد که اغلب ذرات بستر اطراف پایه در نیم ساعت اول آزمایش شسته می‌شوند و سپس نرخ آب‌شستگی کند می‌شود به طوری که ۸۳ درصد آن در دو ساعت اول اتفاق می‌افتد. حیدرپور و همکاران (۱۳۸۲) استفاده از شکاف قائم مستطیلی را برای کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی در پایه‌های پل را بررسی نمود. در این پژوهش پایه پل با مقطع مستطیلی گرد گوشه و دایره‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد حداکثر کاهش آب‌شستگی به وسیله شکاف‌هایی با اندازه دو برابر عرض پایه و موقعیت

نزدیک بستر اتفاق می‌افتد. پیر محمدی و همکاران (۱۳۸۴) به بررسی اثر ابعاد طوق در گروه پایه‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که حضور طوق، عمق آبشستگی را در هر دو پایه کاهش می‌دهد و این کاهش در گروه پایه‌های دارای طوق بزرگ‌تر بیشتر است. Zarrati و همکاران (۲۰۰۶)، عملکرد طوقه‌های مستقل و پیوسته همراه با سنگچین را در گروه پایه‌های پل بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیبی از یک طوقه پیوسته و سنگچین منجر به کاهش عمق آبشستگی به میزان ۵۰ و ۶۰ درصد به ترتیب در جلو پشت پایه می‌شود. ثانی خانی و همکاران (۱۳۸۷)، عملکرد طوقه‌های مربعی شکل را در کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش ابعاد طوقه آبشستگی کاهش می‌یابد. مسجدی و غلامزاده (۱۳۸۹) با قرار دادن یک پایه استوانه‌ای به همراه چهار طوقه دایره‌ای با اندازه‌های مختلف، پدیده آبشستگی را حول پایه‌ها در حالت آب زلال بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش قطر طوقه میزان آبشستگی موضعی در اطراف پایه به‌طور فراوانی کاهش می‌یابد. آقاخانی افشار و همکاران (۱۳۸۹) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر شکاف پایه و ارتفاع آن بر روی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای در شرایط آب زلال پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که در تک‌پایه استوانه‌ای زمانی که در پایه شکافی به عرض ۰/۳ قطر پایه که در داخل بستر فرسایش ناپذیر امتداد یافته است، ایجاد گردد؛ عمق حفره آب شستگی به میزان ۷۴/۴ درصد کاهش می‌یابد. در گروه پایه‌ها نیز در حالت $\frac{W}{D} = 1$ (که W فاصله‌ی بین دو پایه و D قطر پایه است) و زمانی که قطر پایه برابر ۱۸/۵ میلی‌متر باشد، عمق آبشستگی به میزان ۲۴/۹ درصد و زمانی که قطر پایه برابر ۲۰/۴ میلی‌متر باشد، عمق آب شستگی به میزان ۳۲/۸ درصد نسبت به عمق آب شستگی در تک‌پایه کاهش می‌یابد. مولایی (۱۳۹۳) به بررسی اثر ابعاد شکاف در کاهش آبشستگی با استفاده از مدل آزمایشگاهی پرداخت. ایجاد شکاف روی پایه موجب کاهش حجم و عمق آبشستگی می‌شود و هرچه شکاف عریض‌تر باشد، عملکرد بهتری در کاهش آبشستگی دارد. Grimaldi و همکاران (۲۰۰۹) روی محل قرارگیری شکاف کار کردند. نتایج حاصل نشان داد هرچه شکاف در بستر خاک فرو رود کاهش عمق آبشستگی بیش‌تر می‌باشد. البته شکاف ممکن است به وسیله رسوبات رودخانه پر شود و از عملکرد آن کم شود. آزمایش‌ها، عملکرد مفید شکاف پایه پل را در کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه نشان دادند. EL-Ghorab (۲۰۱۳) روی شکافی کار کرد که ورودی جریان آن از جلوی پایه و خروجی‌ها از دو طرف پایه صورت می‌گرفت. وی ۳۳۶ آزمایش را با الگوی تغییر در شکل پایه (۳ شکل مربع، دایره و مستطیل)، ابعاد پایه، ابعاد شکاف، فاصله‌ی قرارگیری شکاف‌ها از هم، دبی و عمق جریان انجام داد. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد با افزایش ابعاد پایه، دبی جریان و فاصله شکاف‌ها عمق آبشستگی افزایش می‌یابد همچنین با افزایش ابعاد شکاف و عمق جریان، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. Khodabakhshi و همکاران (۲۰۱۴) اثر عرض و ارتفاع شکاف یک‌پایه دایروی را در کنترل آب شستگی بررسی کردند. نتایج نشان داد که زمانی که

ارتفاع شکاف به اندازه D (قطر پایه) در زیر بستر قرار گیرد، عمق آبشستگی حدود $۲۰/۳۴$ الی $۳۹/۷۳$ درصد کاهش می-یابد. همچنین با افزایش عدد فرود، عمق و حجم چاله‌ی آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. Akib و همکاران (۲۰۱۴) اثر آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه‌های مرکب و شمع‌های ترکیبی و پل‌های نیمه‌کامل را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق رابطه‌ی بین عمق آبشستگی، سرعت، فاصله‌ی پایه‌ها از یکدیگر و زمان مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها از ۴ دبی و ۴ عمق جریان استفاده کردند. نتایج نشان داد که با بیش‌تر شدن عمق و دبی جریان در این نوع پل‌ها، زمان آب-شستگی افزایش می‌یابد. در عمق تعادلی، گسترش عمق در بالادست پایه‌ها بیشتر از پایین دست آن‌هاست. اردلانی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی آزمایشگاهی اثر شکل شکاف و لنگر دوم سطح شکاف روی کنترل آبشستگی موضعی پایه پل پرداختند. بدین منظور چهار شکل شکاف مستطیلی در دو اندازه، لوزی و مربعی با مساحت سطح برابر، در سه تراز نزدیک سطح آب، هم‌تراز بستر و زیر بستر در چهار عدد فرود $۰/۱۹$ ، $۰/۲۴$ ، $۰/۲۷$ و $۰/۳$ و در دو دانه بندی در شرایط آب زلال مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی با تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر و عدد فرود جریان و لنگر دوم سطح رابطه مستقیم و با اندازه متوسط دانه‌ها رابطه عکس دارد. به گونه‌ای که بهترین عملکرد متعلق به شکاف مستطیلی با کمترین لنگر دوم سطح در تراز زیر بستر و کمترین عدد فرود جریان بود که به میزان $۶۸/۹$ درصد عمق آبشستگی را کاهش داد. در تحقیق حاضر اثر شکل شکاف برای شکاف-های مثلث و مثلث بر عکس، بر آبشستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی، در شرایط آب زلال در دو دبی متفاوت و سه سطح قرارگیری شکاف مورد بررسی قرار گرفته است.

آنالیز ابعادی

عوامل متعددی بر میزان آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل‌ها مؤثرند.

در حالت کلی می‌توان (رابطه ۱) را برای پارامترهای حاکم بر عمق آبشستگی نوشت:

$$d_s = \Phi(u, u_c, H, A, D, \rho, \rho_s, d_{50}, t, S, h, \mu, \alpha, g) \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در این رابطه، u سرعت، u_c سرعت بحرانی، H عمق جریان، A مساحت شکاف، D عرض پایه، ρ چگالی سیال، ρ_s چگالی ذرات رسوبی، d_{50} قطر متوسط ذرات، t زمان آبشستگی، S شیب کانال، h تراز قرارگیری شکاف از سطح بستر، μ ویسکوزیته دینامیکی، α زاویه قرارگیری پایه نسبت به جریان و g شتاب ثقل می‌باشد. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی رابطه‌ی بالا را می‌توان به صورت رابطه ۲ نوشت:

$$\frac{d_s}{D} = \Phi \left(S, \alpha, \frac{h}{D}, \frac{H}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{u}{u_c}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{A}{D^2}, \frac{gD}{u^2}, \frac{ut}{D}, \frac{\mu}{\rho u D} \right) \quad \text{رابطه ۲:}$$

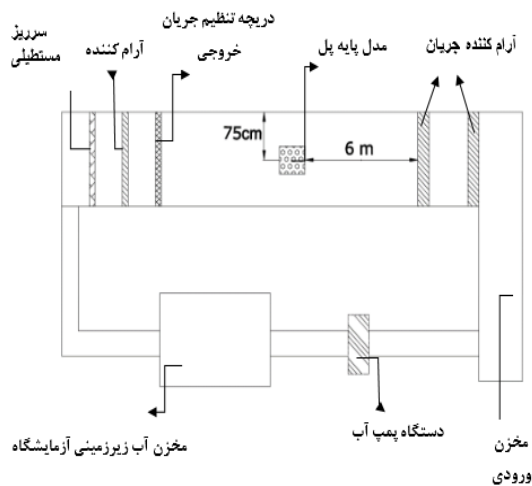
با توجه به اینکه در آزمایش‌ها سایز رسوبات، ویژگی‌ها و عمق جریان، شیب بستر، زاویه قرارگیری پایه نسبت به جریان و مساحت شکاف‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. بر این اساس می‌توان نوشت:

$$\frac{d_s}{D} = \Phi \left(\frac{h}{D} \cdot \frac{d_{50}}{D} \cdot \frac{u}{u_c} \cdot \frac{gD}{u^2} \cdot \frac{ut}{D} \cdot \frac{\mu}{\rho u D} \right) \quad \text{رابطه ۳:}$$

در رابطه‌ی بالا $\frac{h}{D}$ عدد بی‌بعد تراز قرارگیری شکاف از بستر، $\frac{d_s}{D}$ عدد بی‌بعد آب‌شستگی، $\frac{d_{50}}{D}$ عدد بی‌بعد اندازه‌ی رسوبات بستر، $\frac{u}{u_c}$ بیانگر شدت جریان، $\frac{gD}{u^2}$ بیانگر عکس مجذور عدد فرود، $\frac{ut}{D}$ زمان بی‌بعد و $\frac{\mu}{\rho u D}$ عدد رینولدز و اثر نیروی لزجت است.

مواد و روش‌ها

کلیه مراحل آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری تهران انجام پذیرفت. آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی به طول ۱۴ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر تحت شرایط آب زلال انجام شد. جنس کف فلوم از آجر و سیمان که به منظور جلوگیری از نشت آب به وسیله لایه‌های عایق محافظت می‌گردید. دیواره کانال به وسیله قاب‌های فلزی قاببندی شده و دیواره‌های آن از جنس فایبرگلاس می‌باشد. به منظور حرکت ریل‌ها برای استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری، نبشی‌هایی روی دیواره در طول کانال نصب گردید. نمایی از کانال مورد استفاده در آزمایش و پلان آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

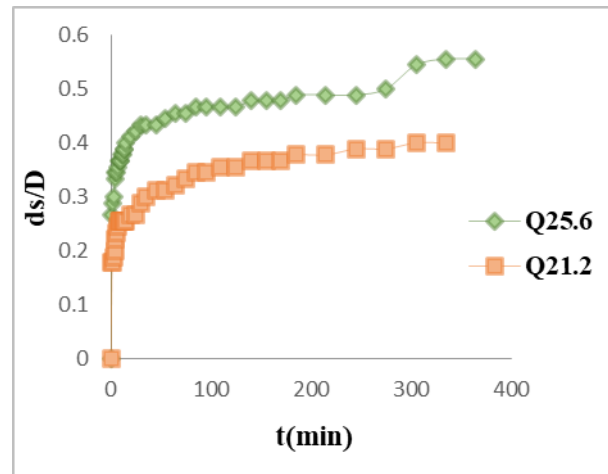
شکل ۱: الف) نمایی از کانال مورد استفاده در آزمایش (ب) پلان کانال مورد استفاده در آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌ها، آب به کمک پمپ از مخزن زیرزمینی به داخل کانال وارد می‌شد. در ابتدای فلوم حوضچه‌ای برای آرامش جریان تعبیه شد. در ورودی کانال بلوک‌های مشبک جهت از بین رفتن تلاطم جریان قرار داده شد. دبی

عبوری به وسیله ی یک سرریز مستطیلی لبه تیز در انتهای فلوم، اندازه گیری و عمق جریان نیز به وسیله ی یک دریچه ی فولادی در انتهای فلوم تنظیم گردید. پایه ها از جنس پلکسی گلاس و با شکاف به طول ضلع ۴ سانتی متر ساخته شد و محل قرارگیری آن ها در وسط عرض فلوم و طول ۶ متر از ابتدای فلوم در نظر گرفته شد. Rudkivi and Ettema (۱۹۸۳) حداکثر نسبت عرض پایه به عرض فلوم را ۰/۱۶ بیان کرده اند. این نسبت در پژوهش حاضر به جهت اطمینان بیش تر ۰/۱ در نظر گرفته شده و عرض پایه ۶ سانتی متر به دست آمد. قطر متوسط ذرات رسوبی باید به گونه ای باشد که حداکثر مقدار عمق آبشستگی ایجاد شود. Lee و Sturm (۲۰۰۹) حداقل نسبت $\frac{D}{d_{50}}$ را ۲۵ بیان کردند. در این پژوهش نیز این نسبت با توجه به نمودار دانه بندی ذرات به صورت زیر است:

$$D = 60mm \cdot d_{50} = 0.5 \rightarrow \frac{D}{d_{50}} = 120 \quad \text{رابطه ۴:}$$

همچنین برای حذف اثر غیریکنواختی ذرات بر آبشستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک تر از ۱/۳ باشد (Rudkivi and Ettema, 1983). در پژوهش حاضر از ماسه طبیعی رودخانه با دانه بندی یکنواخت و چگالی نسبی $G_s = 2.67$ و $d_{50} = 0.5$ و $\sigma_g = 1.23$ استفاده شده است که خصوصیات آن در معیارهای بیان شده صدق می کند. Chiew و Mehville (۱۹۹۹) حداکثر مقدار آبشستگی را ۲/۴ برابر عرض پایه بیان کرده اند که در این تحقیق با توجه به عرض ۶ سانتی متری پایه و با احتساب ۳۰ درصد افزایش احتمالی عمق آبشستگی، ضخامت مصالح بستر ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه این پژوهش در شرایط آب زلال صورت گرفت، به منظور تعیین عمق و سرعت جریان، سری آزمایش های ابتدایی انجام گرفت تا بتوان عمق و سرعت هایی را مشخص نمودند که از یک سو شرایط آب زلال در آن ها برقرار باشد و از سوی دیگر هم آبشستگی موضعی در آن ها رخ دهد و هم اعداد فرود جریان به گونه ای قابل بحث تغییر کنند. در نهایت عمق ۸ سانتی متر و دو دبی ۳۲ و ۲۵/۶ لیتر بر ثانیه (به ترتیب $Fr = 0/30$ و $Fr = 0/24$) انتخاب شد. از آنجایی که هدف از این آزمایش ها مقایسه ی تغییرات زمانی عمق آبشستگی حداکثر سطح شکاف بر آبشستگی موضعی در شرایط متفاوت هیدرولیکی است، لزومی برای رسیدن به عمق آبشستگی نهایی نیست و از این رو جهت تعیین زمان آزمایش ها در این تحقیق ابتدا به ازای دو دبی ۲۱/۲ و ۲۵/۶ لیتر بر ثانیه، پایه ی شاهد به مدت شش ساعت مورد آزمایش قرار گرفت. پس از گذشت این زمان مشاهده شد که حرکت ذرات بستر تقریباً متوقف شده و شکل بستر به حالت ثابت و مشخص رسیده است. حداکثر عمق آبشستگی پس از گذشت یک ساعت تقریباً هشتاد درصد حداکثر عمق آبشستگی با زمان در مدت زمان شش ساعت بود با توجه به این موضوع زمان هر آزمایش یک ساعت در نظر گرفته شد.



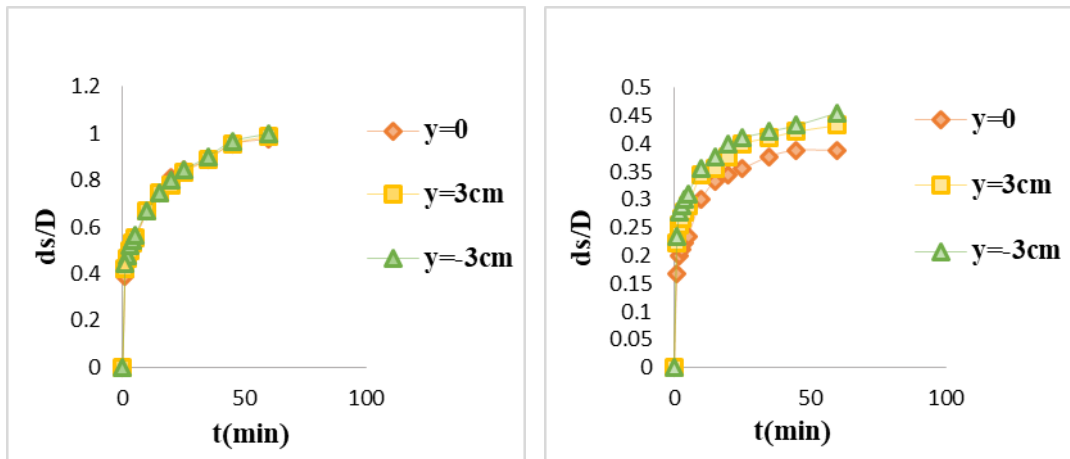
شکل ۲: منحنی تغییرات زمانی آبشستگی برای دو دبی ۲۱/۲ و ۲۵/۶ لیتر بر ثانیه در مدت شش ساعت

نتایج و بحث

پایه شاهد

تغییرات آبشستگی با زمان

تک پایه شاهد در مدت زمان ۶۰ دقیقه برای دو دبی ۲۵/۶ و ۳۲ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. فرایند آب-شستگی به دلیل گوشه‌دار بودن شکل مقطع پایه، از کناره‌های پایه آغاز می‌شود و با گذشت مدت زمان یک دقیقه به جلوی پایه انتقال می‌یابد پس از تشکیل حفره آبشستگی، فعالیت سیستم گرداب نعل اسبی آغاز می‌گردد. این سیستم در ابتدا کوچک و قدرت آن ضعیف است ولی با گذشت مدت زمان ۵ دقیقه از لحاظ اندازه و قدرت رشد کرده و سبب کنده شدن رسوبات از این قسمت و جابجایی آن‌ها به سمت پایین دست می‌شود. ذرات شسته شده به صورت تپه‌های رسوبی در کناره‌ها و پشت پایه در پایین دست جمع می‌شدند. ماکزیمم عمق آبشستگی تک پایه شاهد بعد از مدت زمان آزمایش در همه دبی‌ها در بالادست و کناره‌های پایه رخ می‌داد. از طرف دیگر با افزایش شدت جریان، اختلاف بین عمق آبشستگی در کناره و وسط پایه کاهش می‌یابد تا آنجا که در دبی ۳۲ لیتر بر ثانیه این مقدار در کناره‌ها و وسط پایه به یکدیگر نزدیک می‌شود. در واقع می‌توان گفت در پایه‌های مستطیلی، با افزایش شدت جریان اثر جریان‌های رو پایین بر جریان‌های شیبی در تشکیل گرداب‌ها بیشتر است و در شدت جریان‌های کمتر، گرداب‌های حاصل از جدایش جریان در کناره‌ی پایه مؤثرترند. تغییرات عمق آبشستگی وسط ($y=0$) و طرفین پایه شاهد ($y=3\text{cm}$ و $y=-3\text{cm}$) نسبت به زمان برای دو عدد فرود ۰/۲۴ و ۰/۳۰ در نمودارهای (شکل ۳) نشان داده شده است. در این نمودارها D عرض پایه، ds عمق آبشستگی و t زمان می‌باشد.



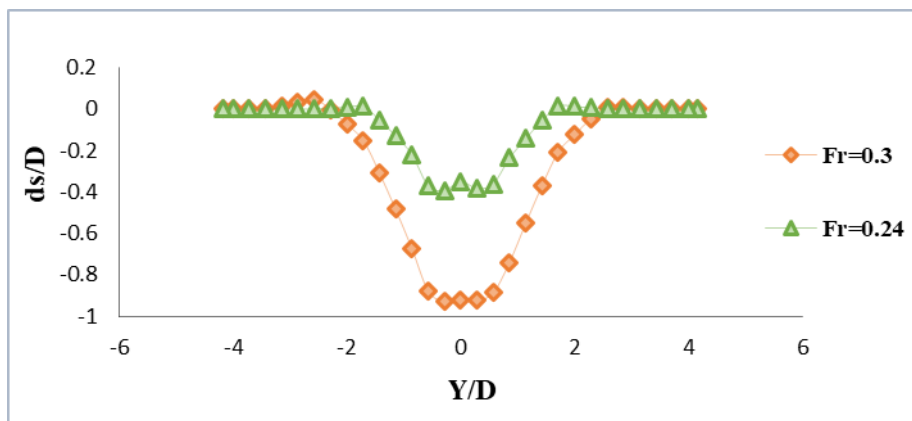
(ب)

(الف)

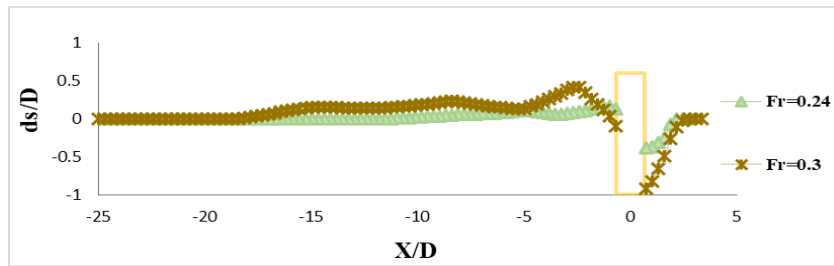
شکل ۳: تغییرات عمق آب شستگی پایه شاهد نسبت به زمان برای شدت جریان ثابت الف) $Fr=0.24$ ، و ب) $Fr=0.3$

تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی حفره آب شستگی

تغییرات ناشی از آب شستگی موضعی بر توپوگرافی بستر، پیرامون پایه پل در شرایط مختلف جریان در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. در این شکل X و Y به ترتیب عرض و طول کانال هستند. با توجه به شکل ۴ و ۵ در پروفیل‌های عرضی و طولی ترسیم شده در اطراف پایه برای دو حالت متفاوت جریان، مشاهده می‌شود که شکل کیفی پروفیل‌ها تقریباً مشابه یکدیگر بوده و تنها با افزایش شدت جریان ابعاد حفره آب شستگی، پشته و دنباله‌های رسوبی تشکیل شده در پایین دست پایه در این ناحیه گسترش می‌یابد. به این نکته نیز باید توجه کرد که حداکثر عمق آب شستگی در طرفین پایه و در فاصله‌ای در حدود $X=0.75D$ و $Y=0.29D$ از مرکز پایه ایجاد می‌شود که این مقدار برابر با $0.92D$ است.



شکل ۴: تغییرات پروفیل عرضی بستر اطراف پایه‌ی پل در شرایط متفاوت جریان

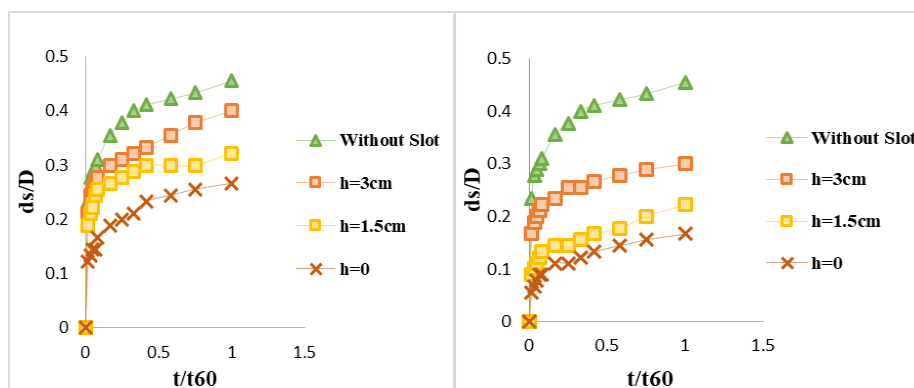


شکل ۵: تغییرات پروفیل طولی بستر اطراف پایه‌ی پل در شرایط متفاوت جریان

پایه‌های شکافدار

تغییرات آبشستگی با زمان

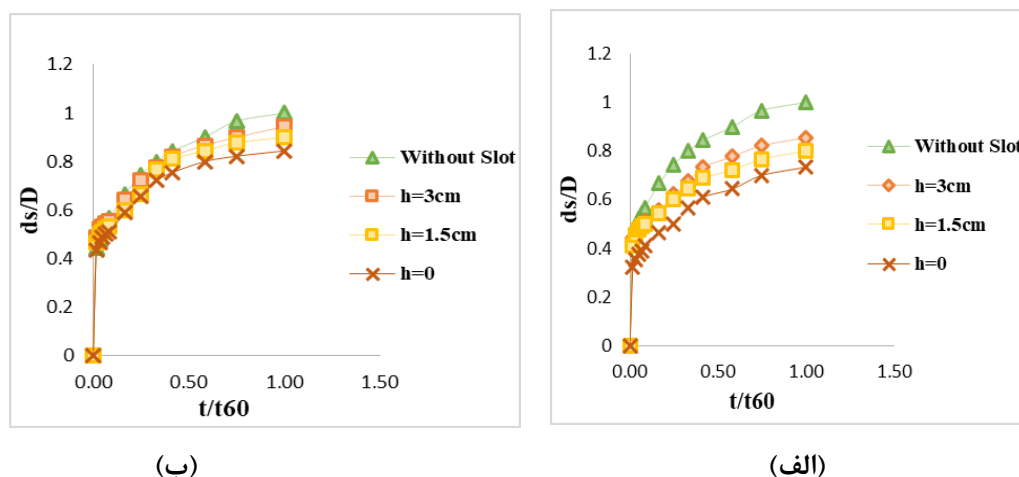
شکل‌های ۶ و ۷ به مقایسه تغییرات حداکثر عمق آبشستگی پایه‌های شکافدار با زمان برای شرایط متفاوت جریان و موقعیت شکاف نسبت به بستر، با حالت پایه بدون شکاف پرداخته است. نمودارهای ترسیم شده در این شکل‌ها نشان می‌دهد که در شرایط مختلف جریان، در تمامی شکل‌ها و موقعیت‌های شکاف نرخ افزایش عمق آبشستگی در مراحل اولیه آزمایش بسیار زیاد بوده اما با گذشت زمان کاهش چشمگیری در روند افزایش عمق حفره آبشستگی دیده می‌شود. همچنین با افزایش شدت جریان و ارتفاع قرارگیری شکاف نسبت به بستر، نرخ آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد کم‌ترین عمق آبشستگی بعد از گذشت مدت زمان $\frac{t}{t_{60}} = 1$ مربوط به پایه با شکاف مثلث همتراز و برابر با نسبت $\frac{d_s}{D} = 0.17$ و $\frac{d_s}{D} = 0.73$ به ترتیب برای فرود 0.24 و 0.30 بوده و بیش‌ترین عمق آبشستگی نیز در شکاف مثلث برعکس در تراز ۳ سانتی‌متر بالای بستر رخ داده که این مقدار برابر نسبت $\frac{d_s}{D} = 0.40$ و $\frac{d_s}{D} = 0.94$ به ترتیب برای فرود، 0.24 و 0.30 است.



(ب)

(الف)

شکل ۶: تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای $Fr = 0.24$ (الف) شکاف مثلث، (ب) شکاف مثلث برعکس



شکل ۷: تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای $Fr = 0.30$ (الف) شکاف مثلث، (ب) شکاف مثلث برعکس

درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به پایه بدون شکاف در شرایط متفاوت جریان و تراز مختلف قرارگیری در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به پایه بدون شکاف در ترازهای مختلف قرارگیری شکاف

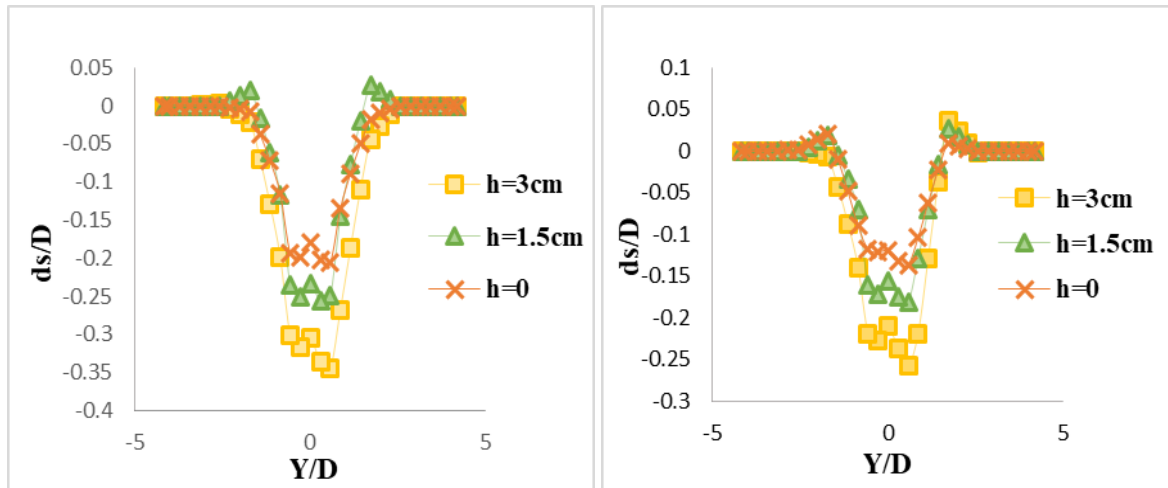
شکل شکاف	موقعیت شکاف نسبت به بستر (h)	درصد کاهش $(Fr=0.24)$	درصد کاهش $(Fr=0.30)$
مثلث برعکس	۰	۴۱/۳۹	۱۵/۵
	۱/۵cm	۳۰/۲۹	۱۰
مثلث	۲cm	۱۲/۰۸	۵/۵
	۰	۶۳/۳۷	۲۶/۶۷
	۱/۵cm	۵۱/۲۸	۲۰
	۳cm	۳۴/۰۷	۱۴/۵

بنابر نتایج ارائه شده در (جدول ۱) در تمامی اعداد فرود شکاف‌های قرار گرفته در تراز روی بستر $(h=0)$ با به وجود آوردن کاهشی در حدود ۱۵/۵ تا ۴۱/۳۹ درصد در شکاف مثلث برعکس و ۲۶/۶۷ تا ۶۳/۳۷ درصد در شکاف مثلثی در عمق آبشستگی، بهترین عملکرد را نسبت به دو تراز دیگر در شرایط مشابه، دارا هستند.

تغییرات پروفیل عرضی چاله‌ی آبشستگی

شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات پروفیل عرضی حفره آبشستگی را نسبت به تراز قرارگیری شکاف در شرایط متفاوت جریان نشان می‌دهند. بدین صورت که با افزایش تراز قرارگیری شکاف از بستر، حجم چاله آبشستگی بالادست پایه در شرایط متفاوت جریان افزایش می‌یابد. با توجه به نمودارها بیشترین حجم چاله آبشستگی مربوط به شکاف مثلث برعکس در تراز ۳ سانتیمتر بالای بستر می‌باشد که با به وجود آوردن کاهشی در حدود ۱۷/۰۸ و ۲۵/۷۸ درصد در حجم چاله آبشستگی

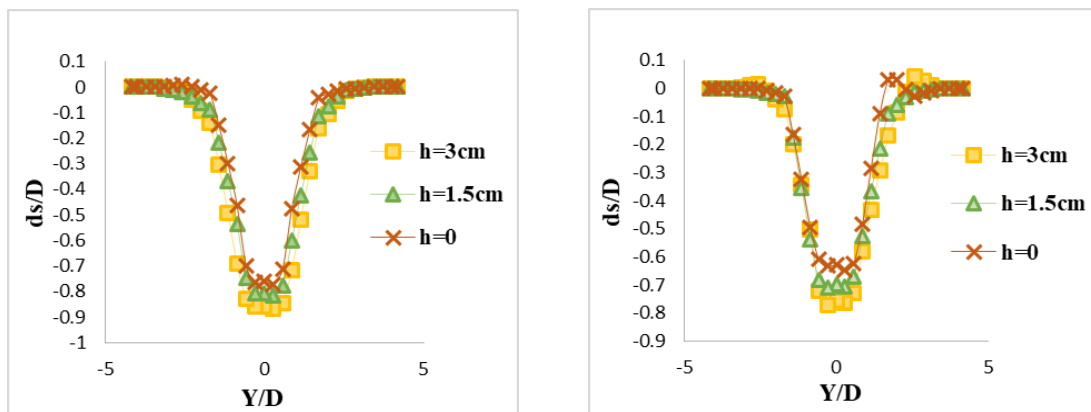
به ترتیب برای اعداد فرود $0/30$ و $0/24$ کم‌ترین عملکرد دارد و کمترین حجم چاله آب‌شستگی مربوط به شکاف مثلث همتراز بسترکه برای اعداد فرود $0/30$ و $0/24$ به ترتیب با به وجود آوردن کاهش در حدود $50/30$ و $72/31$ درصد در حجم بهترین عملکرد را دارا می‌باشد.



ب

الف

شکل ۹: تغییرات پروفیل عرضی بستر در اطراف پایه با تغییر تراز قرارگیری شکاف‌ها برای $Fr = 0/30$. (الف) شکاف مثلث (ب) شکاف مثلث برعکس



ب

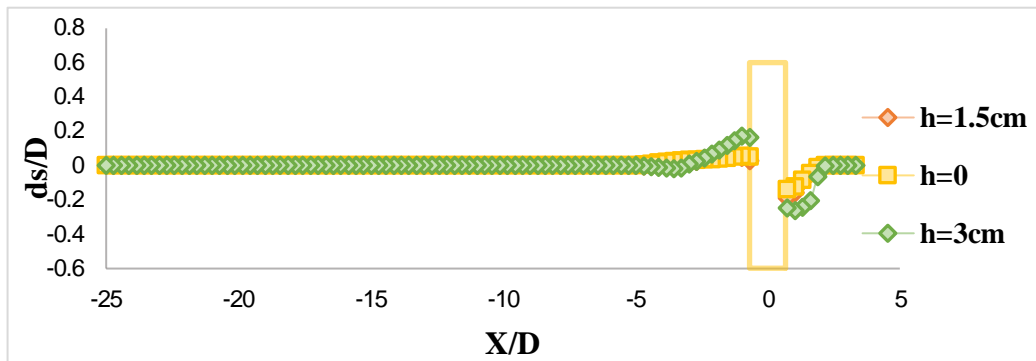
الف

شکل ۹: تغییرات پروفیل عرضی بستر در اطراف پایه با تغییر تراز قرارگیری شکاف‌ها برای $Fr = 0/30$. (الف) شکاف مثلث (ب) شکاف مثلث برعکس

تغییرات پروفیل طولی چاله‌ی آب‌شستگی

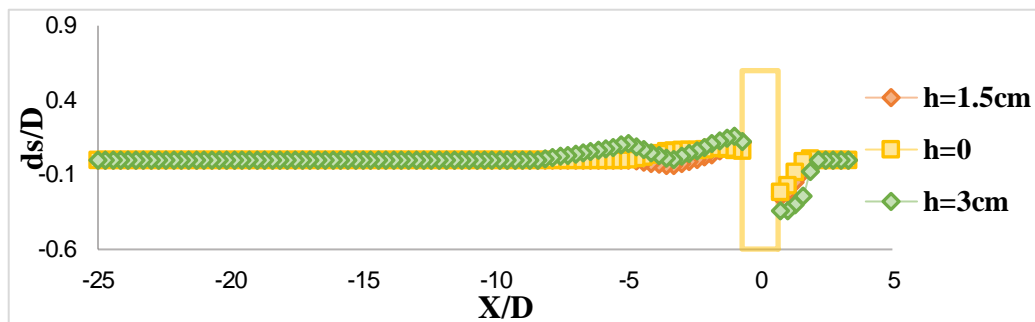
شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ به بررسی تغییرات ناشی از آب‌شستگی موضعی بر توپوگرافی بستر در ترازهای مختلف قرارگیری شکاف مثلث و مثلث برعکس در شرایط جریان متفاوت پرداخته است. با توجه به شکل‌های ترسیم شده با افزایش

تراز قرارگیری شکاف، فرسایش بستر افزایش می‌یابد و ابعاد حفره آبستگتی، پشته رسوبی تشکیل شده در پایین دست پایه و دنباله رسوبی با افزایش سرعت جریان در طول کانال گسترش می‌یابد.



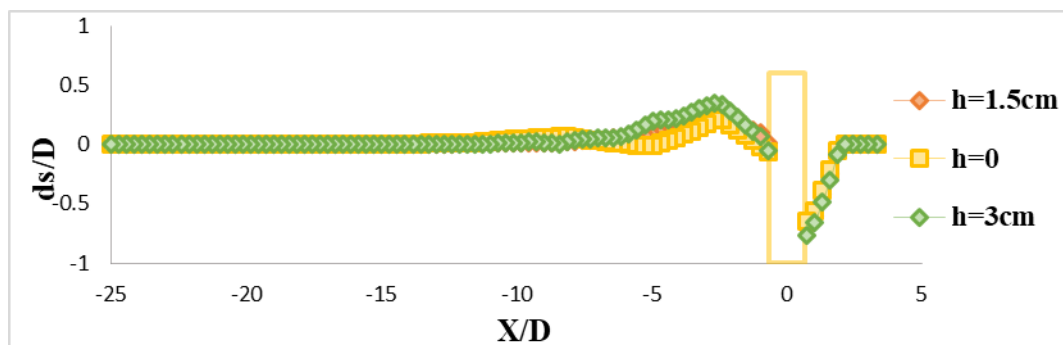
شکل ۱۰: تغییرات پروفیل طولی بستر در اطراف پایه‌ی پل با شکاف مثلث در ترازهای مختلف قرارگیری شکاف

$$(Fr = 0/24)$$



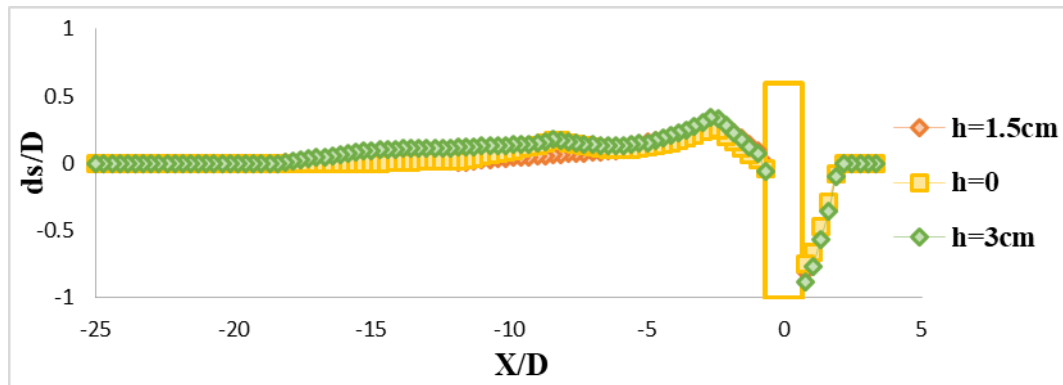
شکل ۱۱: تغییرات پروفیل طولی بستر در اطراف پایه‌ی پل با شکاف مثلث برعکس در ترازهای مختلف قرارگیری

$$\text{شکاف } (Fr = 0/24)$$



شکل ۱۲: تغییرات پروفیل طولی بستر در اطراف پایه‌ی پل با شکاف مثلث در ترازهای مختلف قرارگیری شکاف

$$(Fr = 0/30)$$



شکل ۱۳: تغییرات پروفیل طولی بستر در اطراف پایه‌ی پل با شکاف مثلث برعکس در ترازهای مختلف قرارگیری

شکاف ($Fr = 0/30$)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییرات زمانی عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی، برای دو شکاف با شکل های مثلث و مثلث برعکس مورد بررسی قرار گرفت و این نتایج حاصل شد: در پایه‌ها با مقطع مستطیلی، با افزایش شدت جریان اثر جریان‌های رو به پایین بر جریان‌های شیری در تشکیل گرداب‌های نعل اسبی بیش‌تر است. در شدت جریان‌های کمتر، گرداب‌های حاصل از جدایش جریان در کناره‌ی پایه‌ها مؤثرترند. عمق آبشستگی در لحظات اولیه آزمایش به سرعت افزایش می‌یابد ولی با گذشت زمان این روند به تدریج کندتر می‌شود تا آنکه در نهایت عمق آبشستگی به سمت عددی ثابت میل می‌کند. نرخ آبشستگی با عدد فرود جریان، تراز قرارگیری شکاف از بستر و زمان رابطه مستقیم دارد. با افزایش عدد فرود جریان، عملکرد شکاف در کاهش عمق آبشستگی در پایه‌های شکافدار نیز کاهش می‌یابد. برابر نتایج، شکاف مثلث در عدد فرود $0/24$ با به وجود آوردن کاهشی در حدود $63/37$ و $72/31$ درصد در عمق و حجم چاله آبشستگی، بهترین عملکرد را نسبت به شکاف مثلث برعکس داشته است. و شکاف مثلث برعکس در عدد فرود $0/30$ با کاهشی در حدود $15/5$ و $17/08$ درصد کم‌ترین عملکرد را داشته است. با افزایش عدد فرود جریان، تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال و ابعاد حفره‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد. با افزایش تراز قرارگیری شکاف از بستر، عمق آبشستگی بالادست پایه‌های شکافدار به افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال و ابعاد حفره آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. به طوری که در دو اعداد فرود شکاف‌های قرار گرفته در تراز روی بستر با به وجود آوردن کاهشی در حدود $15/5$ تا $41/39$ درصد برای شکاف مثلث برعکس و $26/67$ تا $63/37$ درصد برای شکاف مثلثی در عمق آبشستگی، بهترین عملکرد را نسبت به دو تراز دیگر در شرایط مشابه، دارا هستند. همچنین تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال و ابعاد حفره آب-

شستگی نیز افزایش می‌یابد. در مقایسه شکل شکاف‌ها، شکاف مثلث با کاهشی در حدود در ۱۴/۵ تا ۶۳/۳۷، عملکرد بهتری نسبت به شکاف مثلث برعکس با کاهشی در حدود ۵/۵ تا ۵۱/۸۱ درصد را دارا می‌باشد.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از کلیه استادان و همکاران آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران جهت انجام این پژوهش تشکر نمایند.

منابع

- آقاخانی افشار، ا.، غفوری مغربی، م. و اسماعیلی، ک. (۱۳۸۹). بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکاف پایه و پایه‌های مجاور هم بر کاهش آب‌شستگی موضعی. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- اردلانی، ا. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی اثر شکل شکاف و لنگر دوم سطح شکاف روی کنترل آب‌شستگی موضعی پایه پل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.
- پیرمحمدی، ر.، حیدرپور، م.، افضل‌ی مهر، ح. (۱۳۸۴). مشاهدات نحوه‌ی توسعه‌ی آب‌شستگی موضعی در گروه پایه‌های پل در هنگام استفاده از طوق. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷ تا ۱۹ آبان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ثانی خانی، ه.، حسینزاده دلیر، ع. و فرسادی زاده، د. (۱۳۸۷). عملکرد طوق‌های مربعی شکل کاهش آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- حیدرپور، م.، افضل‌ی مهر، ح.، نادری بنی، م. (۱۳۸۲). کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی در پایه‌ی پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف. مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال هفتم شماره سوم، ص ۱۳ تا ۲۷.
- مسجدی، ع و غلامزاده محمودی، م. (۱۳۸۹). بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آب‌شستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و‌خاک، شماره ۵۹، بهار ۱۳۹۰.
- مولایی، ح. (۱۳۹۳). تعیین اثر هندسه‌ی شکاف روی کاهش عمق آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

نظریها، م. (۱۳۸۰). تغییرات زمانی آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۵ تا ۱۷ آبان، دانشکده‌ی فنی تهران.

Akib, S.h., Jahangirzadeh, A and Basser, H. (2014). Local scour around complex pier groups and combined piles at semi-integral bridge. *Journal Hydrol. Hydromech*, 62(2), pp: 108–116 .

Breusers, H. N. C., Rudkivi, A. J. (1991). Scouring-Hydraulic Structures Design Manual. IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland.

Chiew, Y. M., (1992). Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp: 1260-1269.

EL-Ghorab, E. (2013) .Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction .*Alexandria Engineering Journal*, pp: 467–478.

Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A. H. (2009). Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot bed sill. *Journal of hydraulic Engineering, ASCE*, 135(5), pp: 431-425.

Kumar, V., Ranga Raju, K.G. and Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Research*, 125(12), pp: 1302-1305.

Khodabakhshi, A., Saneie, M. and Abdoh Kolahchi A. (2014). Experimental study on effect of slote level on scour around bridge pier. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3, pp: 103-108.

Lee, S.O. and Sturm, T.W. (2009). Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(10), pp: 793-802.

Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), pp: 59-65.

Melville, B. W. and Coleman, S. E. (2000). Bridge scour. *Water Resources Publications.LLC.Clorado. U.S.A.* 550p.

Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), pp: 338-350.

Raudkivi, A. j. (1990). loose boundary hydraulic. 3rd Edition. Pergamon press.

Raudkivi, A.J. (1998). Loose Boundary Hydraulics .A. A. Balkema. Rotterdam, The Netherlan .

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2002). The mechanics of scour in the marine environment .

Advanced series on ocean engineering, vol 17. World Scientific.

Vittal, N., Kathyari, U. and Haghighat, M. (1994). Clear water scour around bridge pier group.

Journal of Hydraulic Research, 120(1), pp: 1309-1318.

Zarrati, A. R., Nazariah, M. and Mashahir, M. B. (2006). Reduction of local scour in the

vicinity of bridge piergroups using collars and riprap. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(2), pp: 154-162.