

بررسی آزمایشگاهی اثر مساحت سطح شکاف در بدنه‌ی پایه روی کاهش آبشستگی موضعی پایه پل

اعظم اردلانی^۱، مرتضی بختیاری^{۲*}، مجتبی صانعی^۳، سید محمود کاشفی پور^۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۰۵

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران- سازه های هیدرولیکی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

۲- استادیار گروه مهندسی سازه‌های دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

۳- دانشیار پژوهشکده ی حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسؤل، مکاتبات، پست الکترونیک: mortezabakhtiari@yahoo.com

چکیده

ساخت پایه‌های پل در داخل بستر رودخانه‌ها غالباً تغییراتی در شکل و مسیر رودخانه‌ها ایجاد می‌کنند. این تغییرات عکس‌العمل‌های طبیعی رودخانه را در پی دارد که یکی از آن‌ها آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ی پل‌هاست و می‌تواند سالانه خساراتی را به وجود می‌آورد. از این رو تحقیقات زیادی روی روش‌های کنترل و کاهش آبشستگی انجام گرفته است. یکی از روش‌های ارائه شده توسط محققان استفاده از شکاف در پایه پل‌هاست. در تحقیق حاضر اثر مساحت سطح شکاف در بدنه‌ی پایه روی آبشستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از پایه‌های دارای شکاف با مقطع مربعی و به ابعاد متفاوت استفاده گردید. شکاف‌ها در سه تراز قرارگیری (نزدیک سطح آب، هم‌تراز بستر و زیر بستر) و در چهار عدد فرود مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی با تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر و عدد فرود جریان، رابطه‌ی مستقیم و با مساحت سطح شکاف، رابطه عکس دارد. بهترین عملکرد شکاف مربوط به شکاف با ابعاد بیشتر و در تراز زیر بستر و در شرایط کمترین عدد فرود بوده که به میزان ۵۵/۴ درصد عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد.

واژه های کلیدی: آبشستگی، پایه‌ی پل، شکاف، مساحت شکاف، مطالعه آزمایشگاهی

Experimental Investigation of the Effect of Slot Pier Opening Area on Local Scouring of Bridge Pier

A Ardalani¹, M Bakhtiari^{*2}, M Saneie³, SM Kashefipour⁴

Received: November 24, 2016

Accepted: May 26, 2019

¹Graduate Master of Science of Civil Engineering- Hydraulic Structure, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Iran

²Assist. Prof., Dept. of Marine Structure Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Iran

³Assoc. prof., Dept. of Soil Watershed Protection- Tehran, Iran

⁴Prof. of Water Science Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

*Corresponding Authors, Email:mortezabakhtiari@yahoo.com

Abstract

The construction of bridges within the river beds often makes changes to the shape and direction of the rivers. These changes take the natural actions of the river, that one of them is the local scouring around the bridges' piers and can cause annually damage. Therefore, many researches have been carried out to control and reduce the scouring. One of the methods presented by researchers is using slot at piers. In present study, the effect of Pier Opening Area on local scouring around the pier with rectangular section is experimentally investigated. For this purpose, piers with square shape slots and different dimensions were used. The piers were tested at three levels (near the water level, on the bed and under the bed) and four Froude numbers. The result showed that the maximum scouring depth and the volume of hole scour had a direct relationship with slot level relative to bed and Froude number and an inverse relationship with Pier Opening Area. The best performance belonged to the slot with greater dimensions which was located under the bed level in the minimum Froude number condition that reduced the depth of scouring about 55.4 percent.

Key Words: scouring, Pier Bridge, slot, Pier Opening Area, Experimental study

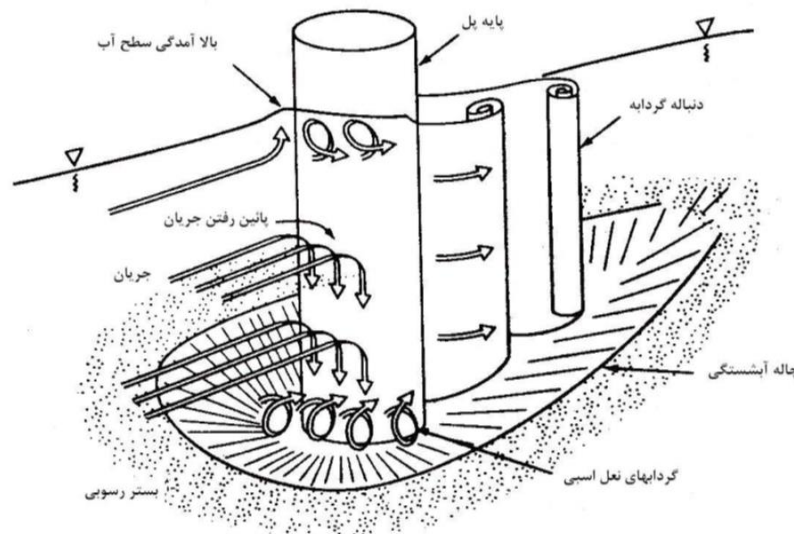
مقدمه

همانند یک جت عمودی عمل کرده و پس از برخورد به بستر رودخانه ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود (بروسرز و رادکیوی ۱۹۹۱). 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، امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب پدید می‌آورد که به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند. تشکیل گرداب نعل اسبی در داخل حفره آبشستگی، باعث تسریع در حفر آن شده و ذرات جدا شده از بستر، توسط جریان اصلی رودخانه به پایین‌دست

فرسایش یکی از پدیده‌های طبیعی است که عمدتاً به علت حرکت سیال روی سطوح فرسایش پذیر رخ می‌دهد و موجب جابه‌جایی ذرات روی این سطوح می‌شود. در صورتی که سیال محرک در فرسایش، آب باشد به آن آبشستگی می‌گویند. مکانیزم آبشستگی اطراف پایه پل‌ها به این صورت است که پس از برخورد جریان به دماغه‌ی پل، روی پایه با توجه به اینکه سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب بیشتر می‌شود، فشار بیشتر نیز در ترازهای بالاتر روی پایه ایجاد می‌شود و به این ترتیب گرادیان فشاری روی پایه از بالا به پایین به وجود می‌آید که خود باعث یک جریان رو به پایین در جلوی پایه می‌شود. جریان رو به پایین

همکاران (۲۰۰۶). جریان به علت سرعت رو به بالایی که دارد بعد از رسیدن به سطح کمی فوران می‌کند ولی از آنجایی که حرکت جریان خلاف جهت جاذبه است، سیال دوباره تحت تأثیر جریان اصلی در آبراهه قرار می‌گیرد این روند گرداب‌های موج کمانی یا سطحی را در جلوی پایه شکل می‌دهد. شکل ۱ گرداب‌های موثر در اطراف پایه را نشان می‌دهد.

حمل می‌شوند (بروسرز و همکاران ۱۹۹۱). 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 (چیو ۱۹۹۲). ایجاد این گرداب‌ها موجب ایجاد مکش در پشت پایه نیز می‌شود که در پی آن نیروهای قابل توجهی در جهت جریان به پایه وارد می‌شود که باید در طراحی لحاظ شوند (اتما و



شکل ۱- الگوی جریان و حفره‌ی آبستنگی موضعی اطراف یک پایه پل استوانه‌ای شکل (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷).

داد سنگچین قرار گرفته در پایین‌تر از بستر بیشترین و سنگچین بالاتر از بستر کمترین میزان پایداری را دارد. آقاخان افشار و همکاران (۲۰۱۰) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر شکاف پایه و ارتفاع آن بر روی آبستنگی موضعی اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای در شرایط آب زلال پرداختند. نتایج نشان داد که در تک پایه استوانه‌ای زمانی که در پایه شکافی به عرض $0/3$ قطر پایه که در داخل بستر فرسایش ناپذیر امتداد یافته است، ایجاد گردد؛ عمق حفره آبستنگی به میزان $74/4$ در صد کاهش می‌یابد. مشاهیر و همکاران (۲۰۰۹) اثر تک طوق و دو طوق در کاهش عمق آبستنگی اطراف پایه‌های استوانه‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. همچنین به منظور کاهش قدرت گرداب‌های برخاستگی، میله‌های نازک با زوایای 30 ، 45 و 90 درجه

روش‌های مختلفی برای جلوگیری و یا کاهش آبستنگی 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 الگوی جریان در اطراف پایه نیروهای مخرب کاهش داده می‌شوند که از جمله می‌توان به استفاده از طوق و شکاف اشاره کرد. مشاهیر و زراتی (۲۰۰۲). پیرمحمدی و حیدر پور (۲۰۰۴) به بررسی تأثیر سطح قرارگیری لایه‌ی سنگچین نسبت به سطح تراز بستر روی پایداری لایه‌ی سنگچین برای حفاظت از پایه‌ی پل پرداختند. نتایج نشان

می‌تواند آبشستگی را ۵۵ تا ۹۶ درصد کاهش دهد. یاسر و همکاران (۲۰۱۵) مطالعات آزمایشگاهی روی کاهش آبشستگی موضعی پایه‌ی پل با به‌کارگیری طوق، انحراف دهنده‌ی جریان و شمع فدایی انجام دادند. نتایج نشان داد که طوق به‌تنهایی تا ۶۵ درصد، و طوق و انحراف دهنده‌های جریان تا ۷۵ درصد عمق آبشستگی موضعی را کاهش می‌دهند. با اضافه شدن شمع فدایی میزان کاهش عمق آبشستگی موضعی به حدود ۹۱ درصد رسید. با توجه به تحقیقات انجام شده به نظر می‌رسید که استفاده از شکاف در پایه‌ی پل‌ها می‌تواند به عنوان روش موثری در کنترل آبشستگی اطراف پایه مطرح شود. از همین رو به بررسی چندین پارامتر موثر روی عملکرد شکاف پرداخته شد. در تحقیق حاضر اثر مساحت سطح شکاف برای شکاف مربعی، بر آبشستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی، در شرایط آب زلال در چهار دبی متفاوت و سه سطح قرارگیری شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. حسینی و همکاران (۲۰۱۶)، در تحقیق آزمایشگاهی به بررسی تغییرات عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر گروه شمع در شرایط مختلف تراز کارگذاری و ضخامت سر شمع، آرایش و قطر شمع‌ها پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد با تغییر آرایش از 2×2 به 3×2 ، به طور متوسط مقدار بیشینه عمق آبشستگی در قطرهای نسبی ۰.۶ و ۰.۹ به ترتیب ۵۰ و ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط بارگذاری سر شمع‌ها هم تراز بستر و مدفون، تغییر آرایش و قطر شمع‌ها تأثیر محسوسی بر بیشینه عمق آبشستگی نداشته است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

عوامل متعددی بر میزان آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل‌ها مؤثرند. این عوامل عبارت‌اند از: سرعت جریان (v)، سرعت آستانه‌ی حرکت (v_c)، عمق جریان (B)، مساحت شکاف (A)، عرض پایه (D)، شتاب ثقل (g)، چگالی سیال

نسبت به خط جریان در پشت پایه تعیین کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در بهترین حالت که دو طوق، عمق آبشستگی به‌اندازه ۵۶ درصد کاهش یافت. نتایج آزمایش‌ها با میله‌های نازک در پشت پایه حاکی از آن بود که با استفاده از آن‌ها شروع آبشستگی در زیر طوق و جلوی پایه به تأخیر می‌افتاد. کریمایی و زراتی (۲۰۱۱) توسعه زمانی و گستردگی حفره آبشستگی را در پایه استوانه‌ای در حضور طوق را مورد مطالعه قرار دادند. بهترین نتیجه برای شرایطی حاصل شد که دو طوق، یکی در تراز بستر و دیگری در تراز به میزان قطر پایه در داخل بستر نصب می‌شوند و عمق آبشستگی نهایی به میزان بیش از ۵۰ درصد کاهش یافت. ارونقی و همکاران (۲۰۱۱) با به‌کارگیری طوق مستطیلی در پایه‌ی استوانه‌ای، به بررسی آبشستگی در پایه‌ی پل طوق‌دار پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند طوق سرعت آبشستگی را کاهش می‌دهد و علاوه بر آن عمق حفره‌ی آبشستگی اطراف پایه به‌خصوص در پشت پایه کاهش می‌یابد. هرمزی و همکاران (۲۰۱۴) اثر زبری‌های نصب‌شده دور پایه را در کاهش آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل بررسی کردند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی زبری‌ها باعث کاهش عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون زبری می‌شوند و قدرت جریان‌های رو به پایین و فعالیت گرداب‌های نعل اسبی کاهش می‌دهند. ال‌رازک و همکاران (۲۰۰۳) روی اثر شکل شکاف پایه و اندازه‌ی آن بر کاهش عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل‌ها با استفاده از شکاف‌هایی که در مقطع عرضی به‌صورت سه بازو با زوایای متفاوت نسبت به هم در پایه‌ها ایجاد شده بودند، انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وجود شکاف پایه اثر قابل‌توجهی در کاهش عمق آبشستگی دارد و بهترین حالت زمانی حاصل می‌شود که زاویه‌ی قرارگیری بازوهای شکاف نسبت به هم ۹۰ درجه باشد. مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از طوق با عرض دو برابر قطر پایه

مساحت و $\frac{\mu}{\rho v D}$ بیانگر عدد رینولدز و اثر نیروی لزجت است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری تهران و در کانالی به طول ۱۴ متر، عرض ۱/۵ متر، ارتفاع ۰/۷ متر و شیب طولی ۰/۰۰۲ انجام گرفت (شکل ۲). جنس پی و چهار متر ابتدایی کانال آجر و سیمان و جنس ده متر اصلی دیواره از پلکسی گلاس است. آب به کمک پمپ از مخزن زیر زمینی 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 می‌شد. عمق جریان نیز به وسیله‌ی یک دریچه‌ی فولادی در انتهای فلوم تنظیم می‌شد. پایه‌ها از جنس پلکسی‌گلاس و با شکاف‌هایی به ضلع ۲ (PSS1) و ۱/۹ (PSS2) سانتی‌متر ساخته شد و محل قرارگیری آن‌ها در وسط عرض فلوم و طول ۶ متر از ابتدای فلوم در نظر گرفته شد.

در شکل (۳) نحوه قرارگیری شکاف نشان داده شده است.



ب) نمایی از عوارض حاصل از اجرای مدل.

(ρ) ، چگالی ذرات رسوبی (ρ_s) ، اندازه‌ی رسوبات (d_{50}) ، مدت‌زمان هر آزمایش (t) ، شیب کانال (S) ، تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر (H) ، ویسکوزیته‌ی دینامیکی (μ) و زاویه‌ی قرارگیری پایه نسبت به جریان (α) . در حالت کلی می‌توان نوشت:

$$f(d_s, v, v_c, B, A, D, \rho, \rho_s, d_{50}, t, S, H, \mu, \alpha) = 0$$

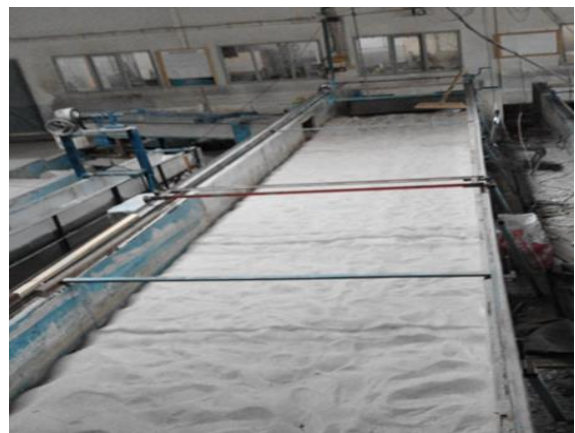
با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی رابطه‌ی بالا را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$f\left(S, \alpha, \frac{H}{B}, \frac{B}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{v}{v_c}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{A}{D^2}, \frac{gD}{v^2}, \frac{vt}{D}, \frac{\mu}{\rho v D}\right) = 0$$

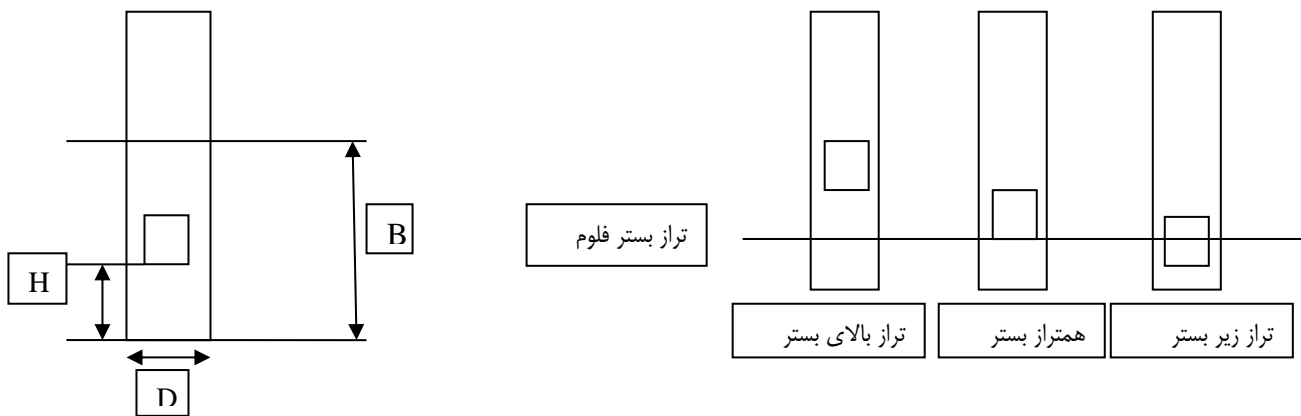
در آزمایش‌های تحقیق حاضر پارامترهای B, α, S, t ، d_{50} ، ρ و ρ_s ثابت هستند. با توجه به این موارد رابطه‌ی بالا به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$f\left(\frac{H}{B}, \frac{d_s}{D}, \frac{v}{v_c}, \frac{gD}{v^2}, \frac{A}{D^2}, \frac{\mu}{\rho v D}\right) = 0$$

در رابطه‌ی بالا $\frac{H}{B}$ عدد بی‌بعد تراز قرارگیری شکاف از بستر، $\frac{d_s}{D}$ عدد بی‌بعد آبشستگی، $\frac{v}{v_c}$ بیانگر شدت جریان، $\frac{gD}{v^2}$ بیانگر عکس مجذور عدد فرود، $\frac{A}{D^2}$ عدد بی‌بعد



شکل ۲ - الف) نمایی از کانال آزمایشگاهی.



شکل ۳- طرح شماتیک از وضعیت قرارگیری شکافها

در آنها رخ دهد و هم اعداد فرود جریان به گونه ای قابل بحث تغییر کنند. در نهایت عمق ۸ سانتی متر و چهار دبی ۳۲، ۲۹، ۲۵/۶ و ۲۱/۲ لیتر بر ثانیه انتخاب شد. ملویل (۱۹۹۷) برای تعیین سرعت برشی بحرانی برای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز و دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس روابط زیر را ارائه نمود که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز است.

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad 0.1mm < d_{50} < 1mm$$

$$U_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \quad 1mm < d_{50} < 100mm$$

و برای سرعت بحرانی از رابطه زیر (توزیع لگاریتمی سرعت) استفاده نمود:

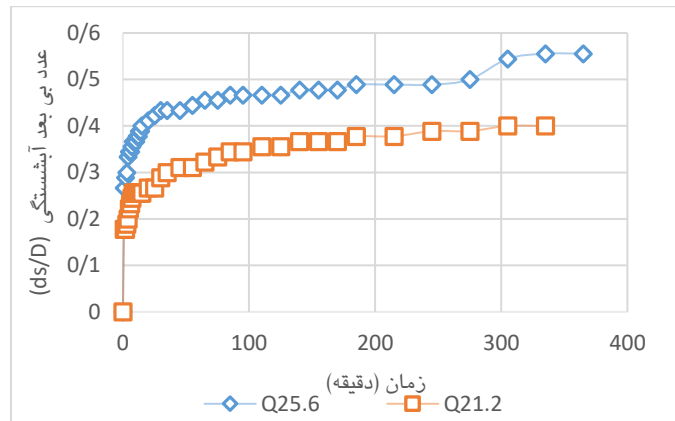
$$\frac{V_c}{U_{*c}} = 5.75 \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right)$$

از آنجایی که هدف از این آزمایش‌ها مقایسه‌ی اثر مساحت 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 آزمایش‌ها در این تحقیق ابتدا به ازای دو دبی ۲۱/۲ و ۲۵/۶ لیتر بر ثانیه، پایهی 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. شکل

بنابر توصیه رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) نسبت فاصله محور پایه تا دیواره‌ی کانال به عرض پایه باید بیشتر از ۶/۲۵ باشد تا تاثیری در نتایج به دست آمده نداشته باشد. این نسبت در این پژوهش ۱۲/۵ در نظر گرفته شده و عرض پایه ۶ سانتی‌متر به دست آمد. قطر متوسط ذرات رسوبی باید به گونه‌ای باشد که حداکثر مقدار عمق آبشستگی ایجاد شود. ملویل (۱۹۹۷) برای این موضوع شرط $\frac{D}{d_{50}} > 25$ را مطرح کرده است که در آن D قطر پایه و d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی بستر است. همچنین برای حذف اثر غیریکنواختی ذرات بر آبشستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات کوچکتر از ۱/۵ باشد (شفاعی بجزستان ۱۳۸۷). در پژوهش حاضر این نسبت ۳۰ در نظر گرفته شده است و از ماسه طبیعی رودخانه با دانه‌بندی یکنواخت و چگالی نسبی $G_s = 2.67$ و $d_{50} = 0.5$ و $\sigma_g = 1.23$ استفاده شده است. ملویل و چپو (۱۹۹۹) حداکثر مقدار آبشستگی را ۲/۴ برابر عرض پایه بیان کرده‌اند که در این تحقیق عرض پایه ۶ سانتی‌متر بوده و از همین رو ضخامت مصالح بستر ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه این پژوهش در شرایط آب زلال صورت گرفت، به منظور تعیین عمق و سرعت جریان، سری آزمایش‌های ابتدایی انجام گرفت تا بتوان عمق و سرعت‌هایی را مشخص کرد که از یک سو شرایط آب زلال در آنها برقرار باشد و از سوی دیگر هم آبشستگی موضعی

با زمان در مدت زمان شش ساعت بوده با توجه به این موضوع زمان هر آزمایش یک ساعت در نظر گرفته شد.

۴ نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبشستگی پس از گذشت یک ساعت تقریباً هشتاد درصد حداکثر عمق آبشستگی



شکل ۴ - منحنی تغییرات زمانی آبشستگی پایه‌ی شاهد برای دو دبی ۲۱/۲ و ۲۵/۶ لیتر بر ثانیه در مدت شش ساعت.

نتایج و بحث

شاهد و شکافدار، در تمام ترازهای قرارگیری شکاف، افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد نتیجه به دست آمده با نتایج حاصل از تحقیق نوزاد و همکاران (۲۰۰۱)، مولایی (۲۰۱۴) و القراب (۲۰۱۳) مطابقت دارد. با افزایش عدد فرود جریان، قدرت جریان پایین‌رونده افزایش می‌یابد و در پی آن گرداب‌های نعل اسبی در زمان کوتاه‌تر و با قدرت بیشتری شکل‌گرفته و شروع به فعالیت می‌کنند. به همین خاطر با افزایش دبی جریان، عمق آبشستگی و حجم چاله‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد. با افزایش ۵۸ درصدی عدد فرود، عمق آبشستگی حداکثر، به طور متوسط ۳/۳۷ برابر می‌شود.

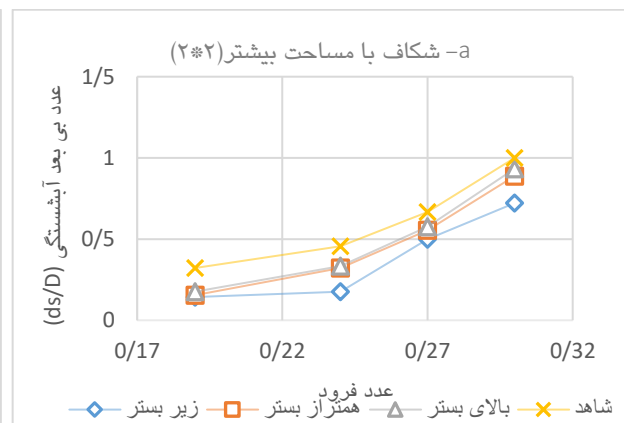
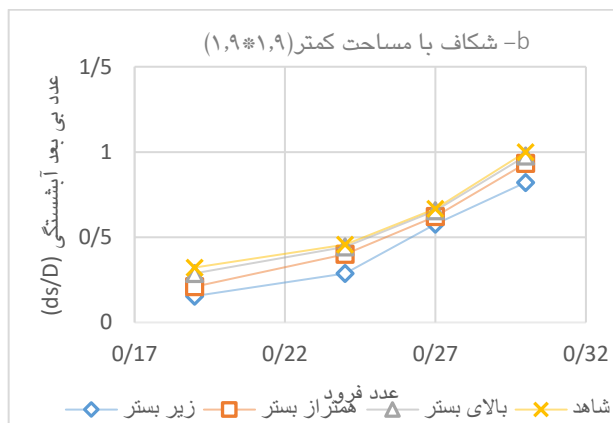
- تغییرات آبشستگی با تغییر تراز قرارگیری شکاف

شکل ۷ (a و b) و شکل ۸ (a و b) نشان می‌دهد که با افزایش تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر، عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد. نتایج حاصله در این بخش با نتایج تحقیقات کومار و همکاران (۱۹۹۹)، گرمالدی و همکاران (۲۰۰۹)، آقاخانی افشار (۲۰۱۰) و مولایی (۲۰۱۴) مطابقت دارد.

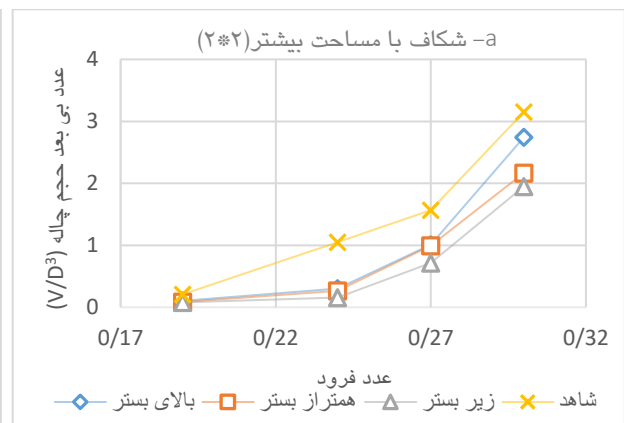
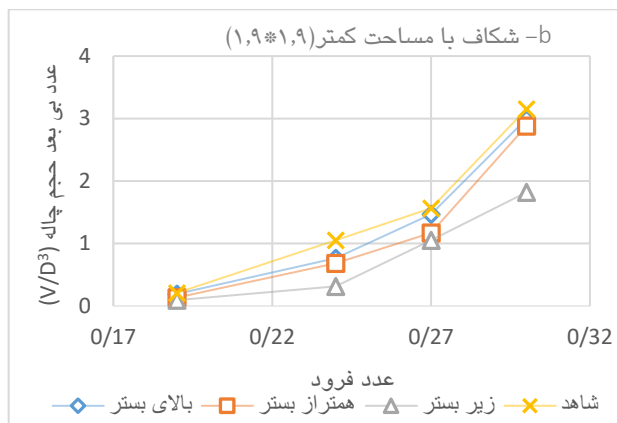
بعد از شروع آزمایش جابه‌جایی ذرات بستر، به دلیل شکل گوشه‌دار مقطع پایه، ابتدا از گوشه‌های پایه شروع شد که تحت تأثیر جدایش جریان بودند و با گذشت زمان به جلوی پایه رسید. جدایش جریان در کناره‌های پایه کمی بعد از آغاز آزمایش، موجب شکل‌گیری دو شیار در زوایای ۴۵ درجه نسبت به خط جریان، در دو طرف پایه شد و در ادامه به مرور زمان، حفره‌های کناری که در بالادست پایه شکل‌گرفته بود، به سمت کناره‌ها و وسط پایه گسترش پیدا کرد. با عمق گرفتن حفره‌ی آبشستگی فعالیت گرداب‌های نعل اسبی در جلو و کناره‌ها قوت گرفت و به مرور زمان ذرات رسوبی که از جلو و اطراف پایه شسته می‌شدند، از نیمه‌ی پایینی وجه کناری به بعد، به صورت پشت‌پشته‌ی رسوبی جمع می‌شدند و به‌مرور تپه‌ی رسوبی در کناره‌ها و پشت پایه در پایین دست شکل می‌گرفت.

- تغییرات آبشستگی با تغییر عدد فرود

شکل‌های ۵ (a و b) و ۶ (a و b) نشان می‌دهند که با افزایش عدد فرود جریان، عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی در بالادست پایه، در پایه‌های



شکل ۵- تغییرات عمق آبشستگی حداکثر (a- شکاف با مساحت بیشتر، b- شکاف با مساحت کمتر).

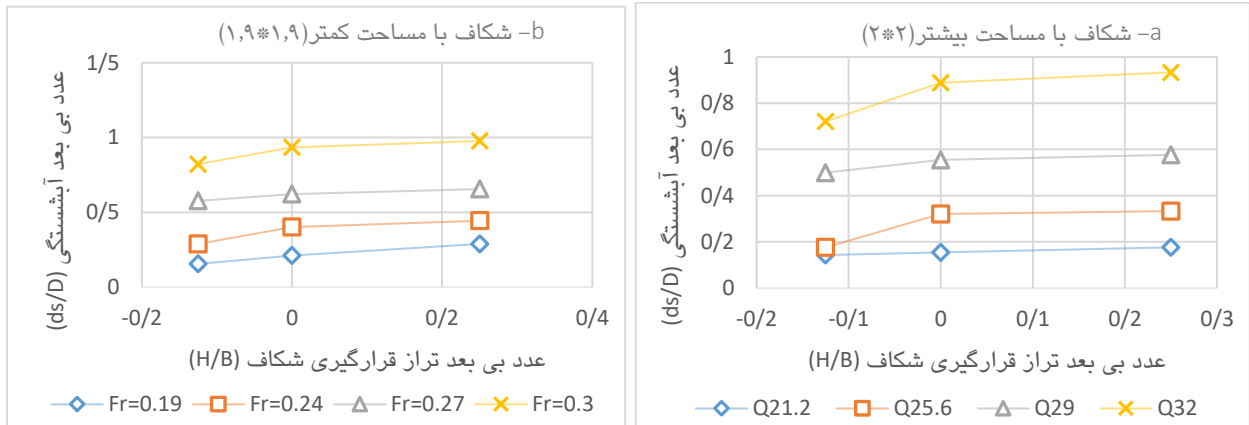


شکل ۶- تغییرات حجم چاله ی آبشستگی (a- شکاف با مساحت بیشتر، b- شکاف با مساحت کمتر).

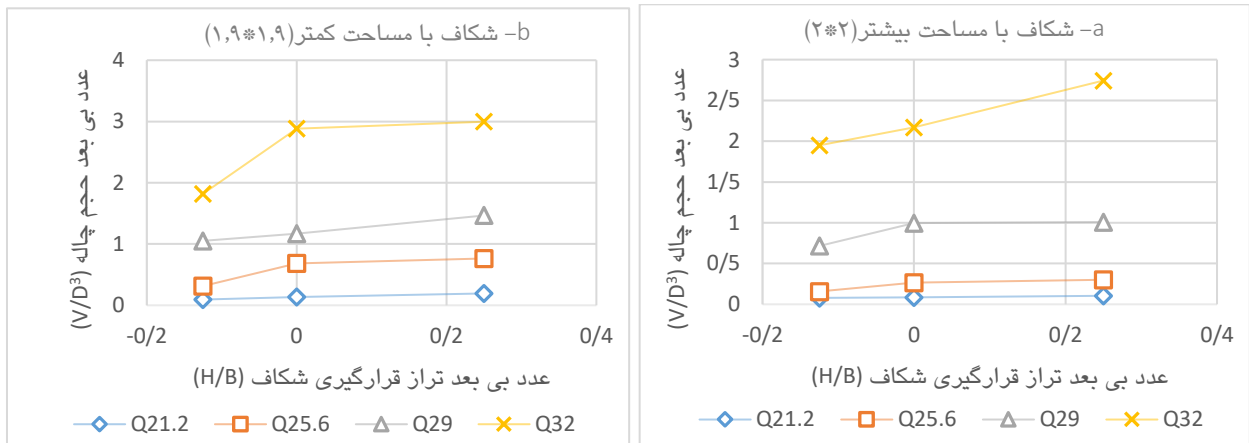
- تغییرات آبشستگی با تغییر مساحت سطح شکاف
- تغییرات عمق آبشستگی حداکثر

شکل ۹ (a-d)، نشان می‌دهد که با افزایش مساحت سطح شکاف، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. نتایج این بخش با تحقیقات چیو (۱۹۹۲)، الازک و همکاران (۲۰۰۳) و القراب (۲۰۱۳) همخوانی دارد. علت آن است که با افزایش مساحت سطح شکاف، جریان عبوری از شکاف بالا رفته و در پی آن از قدرت جریان پایین‌رونده و گرداب‌های فعال اطراف پایه، کاسته می‌شود. داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ۱۰ درصدی مساحت سطح شکاف، عمق آبشستگی حداکثر، به طور متوسط ۲۴/۳ درصد کاهش می‌یابد.

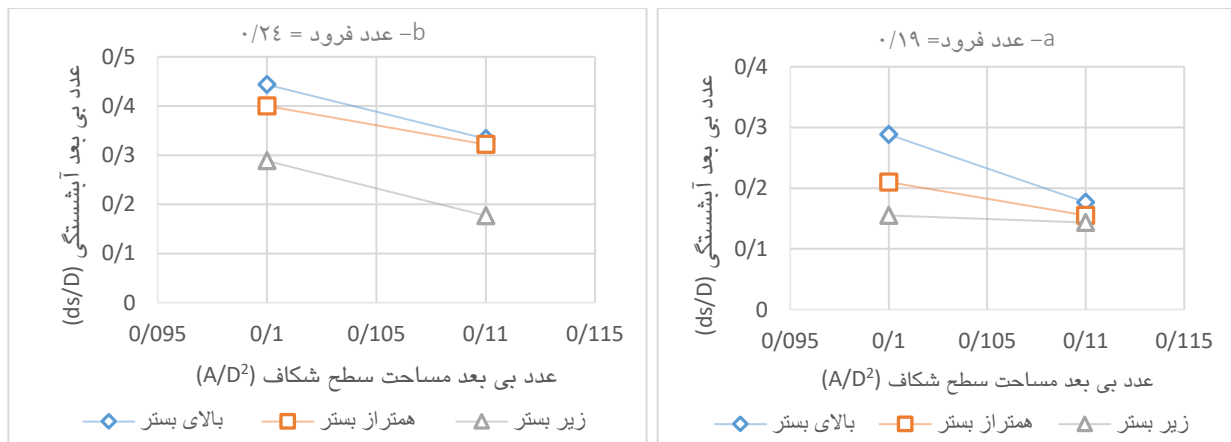
ایجاد شکاف در پایه‌ها باعث می‌شود بخشی از جریان برخوردی به پایه عبور کرده و از قدرت جریان پایین‌رونده کاسته شود. از طرفی جریان عبوری از شکاف، رفتاری شبیه یک جت افقی دارد که عمود بر جریان پایین‌رونده، مانند سپری در برابر بستر، باعث انحراف جریان پایین‌رونده شده و مانع برخورد مستقیم آن با بستر می‌شود و در ادامه گرداب‌های نعل اسبی که در زیر جت افقی شکل می‌گیرند نیز ضعیف خواهند شد. هر چه محل قرارگیری شکاف از بستر فاصله می‌گیرد، جت افقی ایجادشده از سطح بستر دور شده و عملاً شکاف اثر کمتری در فعالیت گرداب‌های نعل اسبی خواهد داشت. با افزایش تراز قرارگیری شکاف از زیر بستر تا بالای بستر، عمق آبشستگی حداکثر به طور متوسط ۴۱/۱ درصد افزایش می‌یابد.

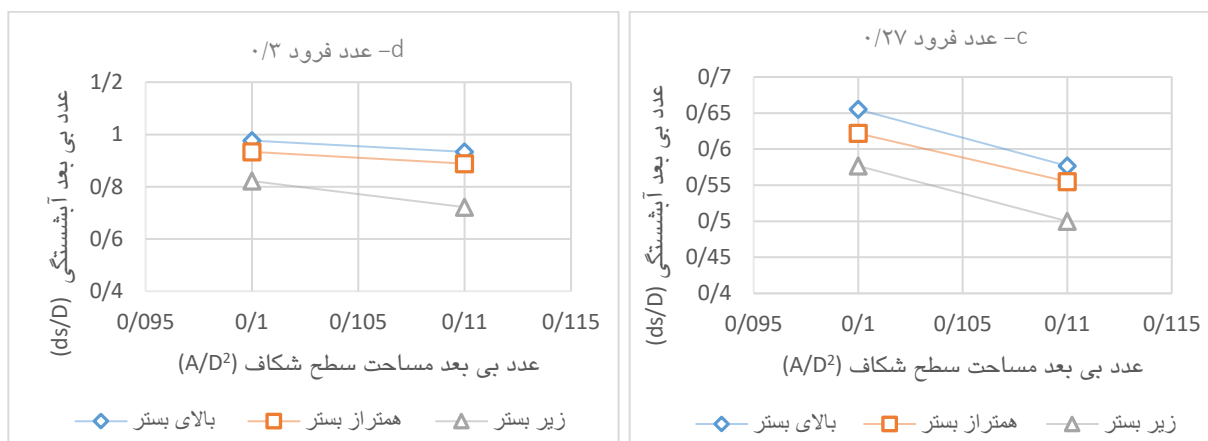


شکل ۷- تأثیر تراز قرارگیری شکاف بر عمق آبشستگی حداکثر (a- شکاف با مساحت بیشتر، b- شکاف با مساحت کمتر).



شکل ۸- تأثیر تراز قرارگیری شکاف بر حجم چاله ی آبشستگی بالادست پایه (a- شکاف با مساحت بیشتر، b- شکاف با مساحت کمتر).



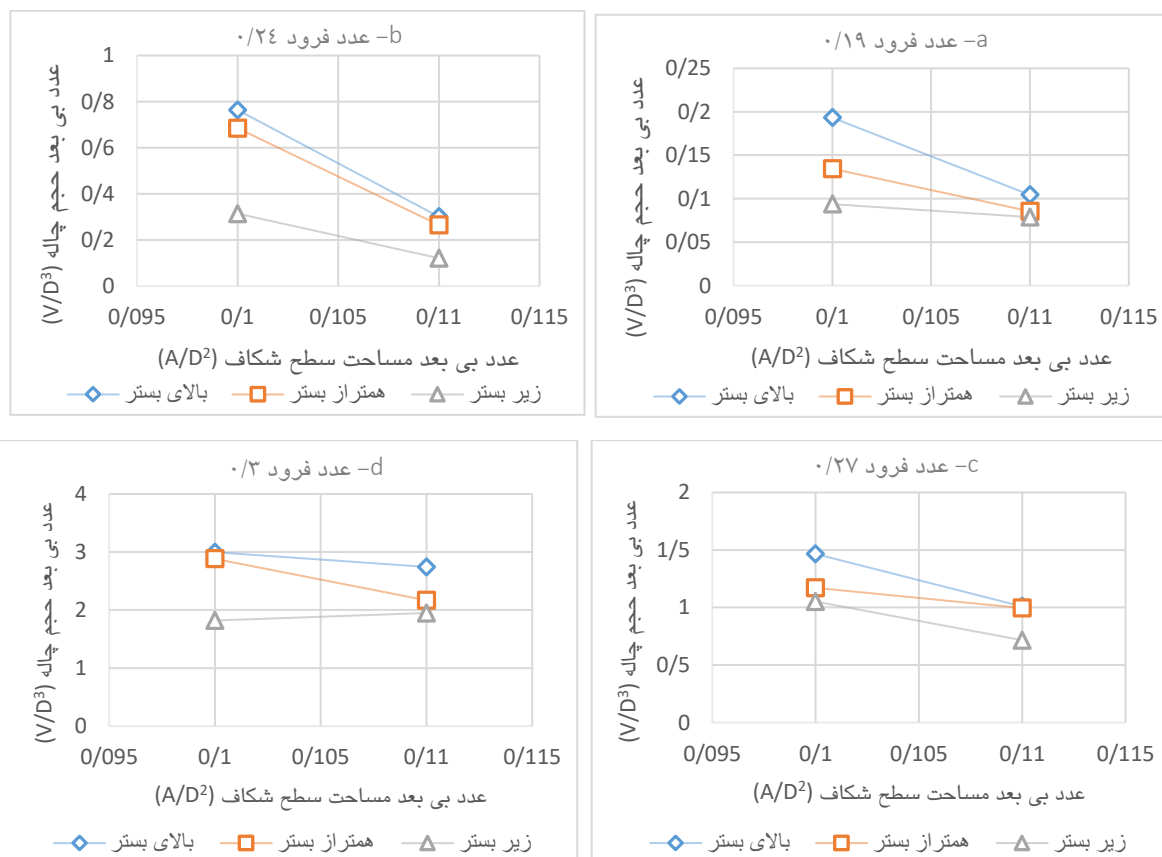


شکل ۹ - تأثیر تغییر مساحت سطح شکاف بر عمق آبشستگی حداکثر (a - عدد فرود ۰/۱۹، b - عدد فرود ۰/۲۴، c - عدد فرود ۰/۲۷، d - عدد فرود ۰/۳).

تغییرات حجم چاله‌ی آبشستگی

می‌یابد. داده‌های به دست آمده نشان داد که با افزایش ۱۰ درصدی مساحت سطح شکاف، حجم چاله‌ی آبشستگی در بالادست پایه به طور متوسط، ۶۴/۹ درصد کاهش می‌یابد.

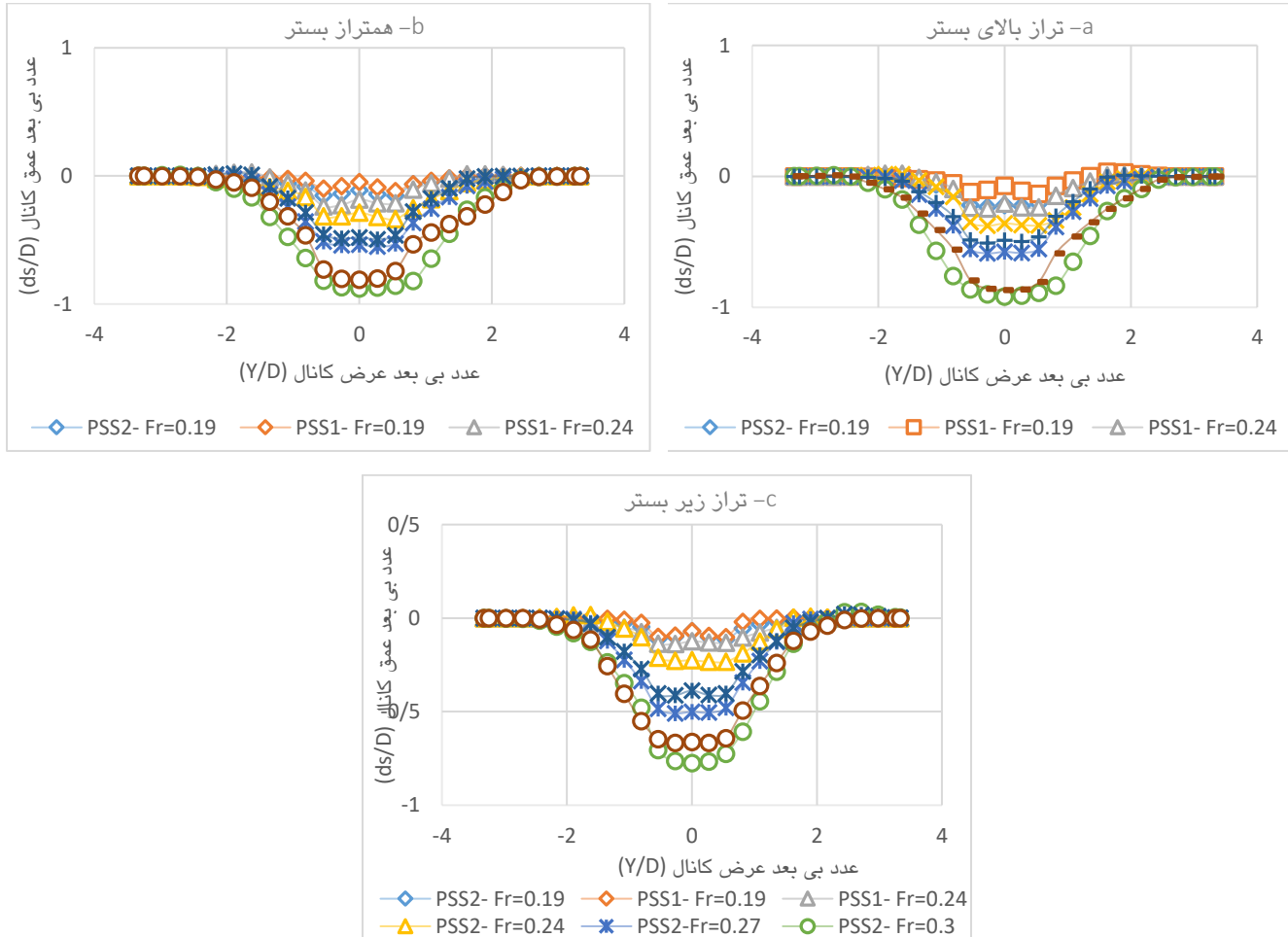
با توجه به شکل ۱۰ (a - d) با افزایش مساحت سطح شکاف، حجم چاله‌ی آبشستگی کاهش



شکل ۱۰ - تأثیر تغییر مساحت سطح شکاف بر حجم چاله‌ی آبشستگی (a - عدد فرود ۰/۱۹، b - عدد فرود ۰/۲۴، c - عدد فرود ۰/۲۷، d - عدد فرود ۰/۳).

- تغییرات پروفیل عرضی چاله ی آبشستگی

با توجه به شکل ۱۱ (a-c) با افزایش مساحت سطح شکاف، در تمام حالت‌ها ابعاد چاله ی آبشستگی کاهش می یابد.



شکل ۱۱- تغییرات مقطع عرضی پروفیل آبشستگی

(a) - تراز بالای بستر، (b) - همتراز بستر، (c) - تراز زیر بستر).

نتیجه‌گیری کلی

- با افزایش عدد فرود، عمق و حجم چاله آبشستگی افزایش می یابد.
- با افزایش تراز قرارگیری شکاف از بستر، عمق و حجم آبشستگی افزایش می یابد.
- با افزایش مساحت سطح شکاف، عمق، حجم و ابعاد آبشستگی کاهش می یابد.

در این پژوهش اثر مساحت سطح شکاف بر آبشستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی، برای دو شکاف مربعی با ابعاد متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- در تمام حالت ها استفاده از شکاف در کاهش عمق آبشستگی و حجم چاله ی آبشستگی موثر است.

منابع مورد استفاده

- Aghakhani Afshar A, Ghafourmaghrebi M, Esmeeli K, 2010. Experimental investigation the effect of pier slot geometry and side piers in reduce local scouring. Pp.1-8. 5th National Civil Engineering Conference. Ferdousi University of Mashhad, Iran. (In Persian)
- Aronaghi H, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadizade D, Fakherifard A and Eghbali P, 2011. The operation of collar thickness in scouring of slot bridge pier. Pp.1-9. 10th Conference of Hydraulic. Guilan University, Iran. (In Persian)
- Breusers H N C, Rudkivi AJ, 1991. Scouring-Hydraulic Structures Design Manual. IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland.
- Chiew YM, 1992. Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 118(11): 1260-1269.
- EL-Ghorab E, 2013. Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. Alexandria Engineering Journal (2013) 52: 467-478.
- El-Razck MA, El-Motaleb MA and Bayoumy M, 2003. Scour reduction around bridge piers using internal openings through the pier. Journal of Alexandria Engineering 42(2):241-248.
- Ettema R, Kirkil G and Muste M, 2006. Similitude of large scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 132(1): 33-40.
- Grimaldi C, Gaudio R, Calomino F and Cardoso AH, 2009. Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot bed sill. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 135(5): 425-431.
- Hormozi MH, Talebbidokhti N and Shafai bajestan M, 2014. Experimental investigations of the effect of Roughts rectangular form on reduce of local scouring around square form piers. Journal of Hydraulic Engineering. 9(2): 11-21.
- Karimaee M and Zarrati AR, 2011. Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers. International Journal of Hydraulic Engineering 25(1): 11-16.
- Mashahir MB and Zarrati AR, 2002. Effect of Collar on Time Development of Scouring around Rectangular Bridge Piers. Pp.1-8. The 5th International Conference on Hydraulic. Shahid Bahonar Kerman University, Iran. (In Persian)
- Mashahir MB, Zarrati AR, Rezaei MJ, Zokaei M, 2009. Effect of collars and bars in reduction the local scour around cylindrical bridge piers. International Journal of Engineering .22(4): 333-342.
- Mehville BW and Chiew YM, 1999. Time scale for local scour depth at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 125(1): 59-65.
- Mellvil BW, 1997. Pier and abutment scour. Integrated approach. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 132(2): 125-136.
- Molae H, 2014. Determination the effect of slot Geometry on reduction of reduction of scouring depth at Cylinder piers. Master's thesis. Central Islamic Azad university of Tehran, Iran. (In Persian)
- Moncada AT and Aguirre PEJ, Bolivar JC and Flores EJ, 2009. Scour protection of circular bridge piers with collar and slots. Journal of Hydraulic Research 47(1): 119-126.
- Nozad H, Hiedarpour M and Afzalimehr H, 2001. Control and Reduction of local scouring of bridge pier with using slot in piers groups. Pp.1-9. 3th Conference of Hydraulic, Tehran University, Iran. (In Persian)
- Pirmohammadi R and Heidarpour M, 2004. The effect of level of stability of riprap around of bridge piers. Pp.1-9 5th Conference of Hydraulic. Shahid Bahonar University, Iran. (In Persian)
- Raudkivi AJ and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3): 339-350.
- Shafaibajestan M, 2008. Hydraulic of Sediment. Shahid Chmaran University Press, Iran. (In Persian)
- Hosseini SS, Esmaeili Varaki M and Fazleola R, 2016. Experimental investigation of Scour around Inclined Bridge Piers Group Based on Piles Group. Journal of Water and Soil Science, Tabriz University. 26(4-2):135-147. (In Persian)
- Yasser AM, Yasser KS and Abdel-Azim MA, 2015. Experimental investigation of local scour around multi-vents bridge piers. Journal of Alexandria Engineering 54: 197-203.