

## بررسی آزمایشگاهی اثر شکل شکاف بر کنترل آبشستگی موضعی پایه با مقطع مستطیلی (مقایسه ی شکافهای لوزی و مربع)

اعظم اردلانی<sup>۱</sup>، مرتضی بختیاری<sup>۲\*</sup>، مجتبی صانعی<sup>۳</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۴</sup>

### چکیده

یکی از روش‌های مهارکردن آبشستگی اطراف پایه ی پل استفاده از شکاف در آنهاست. در تحقیق حاضر اثر شکل شکاف بر آبشستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی، بررسی شده است. برای این منظور دو شکاف لوزی و مربع شکل با مساحت سطح برابر، در سه تراز قرارگیری نزدیک سطح آب، هم‌تراز بستر و زیر بستر و در چهار عدد فرود ۰/۳ و ۰/۲۷ و ۰/۲۴ و ۰/۱۹ آزمایش شدند. در ادامه دانه‌بندی بستر تغییر داده شد و پایه‌های شکافدار در دو تراز نزدیک سطح آب و هم‌تراز بستر در جریان با عدد فرود ۰/۲۴ آزمایش گردید. نتایج نشان دادند که در تمام حالت‌ها حضور شکاف موجب کاهش عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی گشته و عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی با تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر و عدد فرود جریان، رابطه‌ی مستقیم، و با اندازه‌ی متوسط دانه‌های بستر، رابطه‌ای عکس دارد. با مقایسه‌ی داده‌های به دست آمده مشخص شد که با افزایش لنگر دوم سطح شکاف، عمق آبشستگی و حجم و ابعاد چاله‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** آبشستگی موضعی، شکاف، لنگر دوم سطح، پایه‌ی پل

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه هیدرولیکی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

<sup>۲</sup> استادیار گروه سازه‌های دریایی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

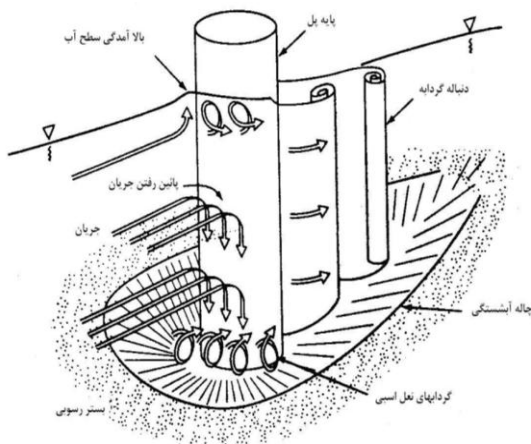
تلفن: ۰۶۱۵۳۵۳۳۳۲۱ Email: mortezabakhtiari@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران

<sup>۴</sup> استادیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

## مقدمه

می‌گیرند که به آن‌ها گرداب موج کمانی یا سطحی گفته می‌شود که در جریان‌های کم‌عمق دارای اهمیت هستند (رادکیوی، ۱۹۹۸).



شکل ۱- الگوی جریان و حفره آبشستگی موضعی

اطراف یک پایه پل استوانه‌ای شکل (شفاعی

بجستان، ۱۳۸۷)

روش‌های مختلفی برای جلوگیری و یا کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل پیشنهاد شده‌اند، که می‌توان آن‌ها را به دودسته‌ی 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 و نظریه‌ها، 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 شده، و سپس نرخ آبشستگی کند گردد، به طوری که ۸۳ درصد آن در دو ساعت اول اتفاق می‌افتد (نظریه‌ها، ۱۳۸۰). 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 دوپایه کاهش می‌دهد و این

در طول تاریخ نیاز به آب موجب شده است که جوامع در کنار رودخانه‌ها شکل گرفته و در پی آن برخورد انسان با آبشستگی به مراتب بیشتر از سایر فرسایش‌ها باشد. به همین علت از سال‌ها پیش به مطالعه و شناخت این پدیده پرداخته شده است. آبشستگی در شکل‌ها و شرایط متفاوتی بروز می‌کند؛ یکی از این شرایط پایه‌ی پل‌هاست. پل‌ها اهمیت قابل توجهی را در برقراری راه‌های ارتباطی دارند. همه ساله هزاران پل در سراسر دنیا در اثر آبشستگی اطراف پایه‌های آن‌ها تخریب می‌شوند (جانسون و داک، ۱۹۹۸). در مطالعات گسترده‌ی ایالات متحده توسط اداره‌ی کل بزرگراه‌های ایالات متحده بر روی تخریب پل‌ها، گزارش شده است که آسیب‌های وارده به پل‌ها و بزرگراه‌ها ناشی از سیلاب‌های محلی بزرگ در طول سال‌های ۱۹۶۴ تا ۱۹۷۲، بالغ بر صد میلیون دلار خسارت در برداشته است. بر اساس این تحقیق سالانه بین ۵۰ تا ۶۰ پل در ایالات متحده بر اثر آبشستگی تخریب می‌شوند (ریچاردسون و داویس، ۱۹۹۵). سازوکار آبشستگی 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 گردیده و به این ترتیب شیب فشاری روی پایه از بالا به پایین به وجود می‌آید که خود باعث یک جریان رو به پایین در جلو پایه می‌شود. جریان رو به پایین همانند یک افشانه عمودی عمل کرده و پس از برخورد به بستر 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 را تشکیل می‌دهد که به تدریج در دو طرف پایه، امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسبی را پدید می‌آورد که به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱). بر اثر جدایی جریان در کناره‌های پایه نیز گرداب‌هایی تشکیل می‌شوند که محور آن‌ها عمود بر بستر نهر است و به آن‌ها گرداب برخاستگی گویند. این گرداب‌ها همانند گردباد ذرات را جدا کرده، در معرض جریان قرار داده، و به انتقال ذرات از جلو اطراف پایه به سمت پایین دست کمک می‌کنند (چیو، ۱۹۹۲). گرداب‌های دیگری نیز در جلوی پایه شکل

به مسیر جریان را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که کارایی شکاف با زاویه گرفتن شکاف نسبت به جریان کم و با امتداد شکاف در بستر افزایش می‌یابد. ال‌رازک و همکاران (۲۰۰۳) در باره‌ی اثر شکل شکاف پایه و اندازه‌ی آن بر کاهش عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل‌ها با استفاده از شکاف‌هایی که در مقطع عرضی به صورت سه بازو با زوایای متفاوت نسبت به هم در پایه‌ها ایجاد شده بودند، انجام دادند. این شکاف‌ها مثل دیگر محققان در راستای عمود بر بستر به صورت بهم‌پیوسته در پایه‌ها ایجاد نشده بود بلکه با استفاده از قرار دادن لوله‌های پلاستیکی نازک در عرض پایه‌ها ایجاد شده بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که وجود شکاف پایه اثر قابل توجهی بر کاهش عمق آبشستگی داشته و بهترین حالت زمانی حاصل می‌شود که زاویه‌ی قرارگیری بازوهای شکاف نسبت به هم ۹۰ درجه باشد. همچنین نتیجه گرفتند که با افزایش قطر شکاف‌ها بر میزان اثر آن‌ها در کاهش آبشستگی افزوده می‌شود.

مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان دادند که استفاده از طوق با عرض دو برابر قطر پایه می‌تواند آبشستگی را ۵۵ تا ۹۶ درصد کاهش دهد. القراب (۲۰۱۳) در باره‌ی شکافی سه‌شاخه تحقیق نمود که ورودی جریان آن از جلوی پایه و خروجی‌ها از دو طرف پایه صورت می‌گرفت. وی نتیجه گرفت عمق آبشستگی با ابعاد پایه، بده جریان و فاصله‌ی شکاف‌ها از هم رابطه‌ی مستقیم، و با ابعاد شکاف و عمق جریان رابطه‌ی عکس دارد. غنی و محمدپور (۲۰۱۵) تغییرات موقت آبشستگی موضعی را در تکیه‌گاه‌های مرکب به صورت آزمایشگاهی در شرایط آب زلال بررسی کردند. این مطالعه مشخص کرد که طراحی مناسب سطح قرارگیری شالوده عمق آبشستگی را کاهش، و طول مدت آبشستگی را افزایش می‌دهد. در تحقیق حاضر اثر لنگر دوم سطح شکاف برای شکاف مربعی و لوزی، بر آبشستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی، در شرایط آب زلال در چهار دبی متفاوت و سه سطح قرارگیری شکاف بررسی شده است.

### تحلیل ابعادی

عوامل متعددی بر میزان آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل‌ها مؤثرند. این عوامل عبارت‌اند از:

کاهش در گروه پایه‌های دارای طوق بزرگ‌تر بیشتر است (پیرمحمدی و همکاران ۱۳۸۴). زراتی و همکاران (۲۰۰۶)، عملکرد طوقه‌های مستقل و پیوسته همراه با سنگچین را در گروه پایه‌های پل بررسی کردند. نتایج نشان دادند 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 (زراتی و همکاران (۲۰۰۶)). ثانی خانی و همکاران (۱۳۸۷)، عملکرد طوقه‌های مربعی شکل را در کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش ابعاد طوقه آبشستگی کاهش می‌یابد. ثانی خانی و همکاران (۱۳۸۷) و مسجدی و غلامزاده (۱۳۸۹) با قرار دادن یک پایه استوانه‌ای به همراه چهار طوقه دایره‌ای با اندازه‌های مختلف، پدیده‌ی آبشستگی را پیرامون پایه‌ها در حالت آب زلال بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان دادند که با افزایش قطر طوقه میزان آبشستگی موضعی در اطراف پایه به‌طور فراوانی کاهش می‌یابد (مسجدی و غلامزاده محمودی (۱۳۸۹)). پوراحمدی و حکیم‌زاده (۱۳۹۰) با جایگزینی پایه‌های مخروطی شکل با پایه استوانه‌ای و پایه‌های هرمی در مقایسه با پایه مکعبی، انجام آزمایش با شدت جریان‌های مختلف کاهش محسوسی در حداکثر عمق آبشستگی مشاهده کردند. عقلی و زمردیان (۱۳۹۱) تأثیر توأم طوق و کابل را در اطراف پایه پل بر عمق آبشستگی در قوس رودخانه‌ها مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان دادند که با افزایش قطر کابل و کمتر شدن فاصله میان گام‌ها، آبشستگی بیشتر کاهش یافته و طوق و کابل ۶۹/۷ درصد عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. کردان و همکاران (۱۳۹۳) نتایج آزمایش ۱۲ شبیه پایه‌ی پل مرکب، شامل پایه‌های مخروطی و سکویی را برای کاهش عمق آبشستگی، در شرایط آب زلال ارائه دادند. آن‌ها در مجموع نتیجه گرفتند که اثر شبیه پایه سکویی در کاهش عمق آبشستگی به مراتب بیشتر از سایر پایه‌ها بوده است. مولایی (۱۳۹۳) به بررسی اثر ابعاد شکاف در کاهش آبشستگی با استفاده از شبیه آزمایشگاهی پرداخت. ایجاد شکاف روی پایه موجب کاهش حجم و عمق آبشستگی می‌شود، و هرچه شکاف عریض‌تر باشد، عملکرد بهتری را در کاهش آبشستگی دارد. کومار و همکاران (۱۹۹۹) پایه‌های پلی را با دو اندازه‌ی بازشدگی شکاف، و نیز طول‌های مختلف شکاف و زوایای مختلف قرار گرفته نسبت

پایه‌ها از جنس پلکسی گلاس و با شکاف به طول ضلع ۲ سانتی‌متر ساخته شد و محل قرارگیری آن‌ها در وسط عرض نهر پایه‌دار و طول ۶ متر از ابتدای نهر پایه‌دار در نظر گرفته شد. رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) حداکثر نسبت عرض پایه به عرض نهر پایه‌دار را ۰/۱۶ بیان کرده‌اند. این نسبت در پژوهش حاضر به جهت اطمینان بیشتر ۰/۰۴ 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. لی و استورم (۲۰۰۹) حداقل نسبت  $\frac{D}{d_{50}}$  را ۲۵ بیان کردند. در این پژوهش نیز این نسبت با توجه به نمودارهای دانه‌بندی ذرات برای هر دو دانه‌بندی به صورت زیر است:

$$D = 60mm \cdot d_{50} = 0.5 \rightarrow \frac{D}{d_{50}} = 30 \quad \text{دانه‌بندی اول}$$

$$D = 60mm \cdot d_{50} = 1 \rightarrow \frac{D}{d_{50}} = 60 \quad \text{دانه‌بندی دوم}$$

همچنین، برای حذف اثر غیریکنواختی ذرات بر آبشستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک‌تر از ۱/۵ باشد. (شفاعی بجستان ۱۳۸۴) در پژوهش حاضر برای دانه‌بندی اول از ماسه‌ی طبیعی رودخانه با دانه‌بندی یکنواخت و چگالی نسبی  $G_s = 2.67$  و  $d_{50} = 0.5$  و  $\sigma_g = 1.23$  و برای دانه‌بندی دوم بستر از همان ماسه و با  $G_s = 2.6$  و  $d_{50} = 1$  و  $\sigma_g = 1.29$  استفاده شده است که خصوصیات آن در معیارهای بیان شده صدق می‌کند. ملویل و چیو (۱۹۹۹) حداکثر مقدار آبشستگی را ۲/۴ برابر عرض پایه بیان کرده‌اند که در این تحقیق عرض مزبور 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، گروه آزمایش‌های ابتدایی انجام شد تا بتوان عمق و سرعت‌هایی را مشخص نمود، که از یک‌سو شرایط آب زلال در آن‌ها برقرار باشد، از سوی دیگر هم آبشستگی موضعی در آن‌ها رخ دهد، هم اعداد فرود جریان به گونه‌ای قابل بحث تغییر کنند. در نهایت، عمق ۸ سانتی‌متر و چهار بده ۳۲، ۲۹، ۲۵/۶ و ۲۱/۲ لیتر بر ثانیه انتخاب شدند. محاسبات به صورت زیر است. ملویل (۱۹۹۷) برای تعیین سرعت برشی بحرانی برای اندازه‌ی متوسط دانه‌های بستر از جنس

سرعت جریان ( $V$ )، سرعت آستانه‌ی حرکت ( $v_c$ )، عمق جریان ( $B$ )، مساحت شکاف ( $A$ )، عرض پایه ( $D$ )، شتاب ثقل ( $g$ )، چگالی سیال ( $\rho$ )، چگالی ذرات رسوبی ( $\rho_s$ )، اندازه‌ی رسوب ( $d_{50}$ )، مدت‌زمان هر آزمایش ( $t$ )، شیب نهر ( $S$ )، تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر ( $H$ )، ویسکوزیته‌ی دینامیکی ( $\mu$ ) و زاویه‌ی قرارگیری پایه نسبت به جریان ( $\alpha$ ). در حالت کلی می‌توان رابطه‌ی (۱) را نوشت:

$$f(d_s, v, v_c, B, A, D, \rho, \rho_s, d_{50}, t, S, H, \mu, \alpha) = 0 \quad (1)$$

با به کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی می‌توان رابطه‌ی بالا را به صورت رابطه‌ی (۲) نوشت:

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

در آزمایش‌های تحقیق حاضر پارامترهای  $B, \alpha, S, t, A$ ،  $\rho$  و  $\rho_s$  ثابت هستند. با توجه به این موارد رابطه‌ی بالا به صورت رابطه (۳) درمی‌آید:

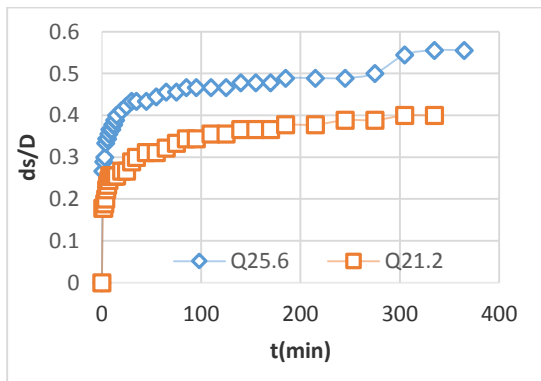
$$F(\frac{H}{B}, \frac{d_s}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{v}{v_c}, \frac{gD}{v^2}, \frac{\mu}{\rho v D}) = 0 \quad (3)$$

در رابطه‌ی بالا  $\frac{H}{B}$  عدد بی‌بعد تراز قرارگیری شکاف از بستر،  $\frac{d_s}{D}$  عدد بی‌بعد آبشستگی،  $\frac{d_{50}}{D}$  عدد بی‌بعد اندازه‌ی رسوب بستر،  $\frac{v}{v_c}$  بیانگر شدت جریان،  $\frac{gD}{v^2}$  بیانگر عکس مجذور عدد فرود و  $\frac{\mu}{\rho v D}$  بیانگر عدد رینولدز و اثر نیروی لزجت است.

## مواد و روش‌ها

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. جنس بستر و چهار متر ابتدایی نهر آجر و سیمان و جنس ده متر اصلی دیواره از پلکسی گلاس است، آب به کمک تلمبه از مخزن زیرزمینی به داخل کانال وارد می‌شد. در ابتدای نهر پایه‌دار حوضچه‌ای برای آرامش جریان تعبیه شد. در ورودی کانال قطعه‌های مشبک جهت از بین رفتن تلاطم جریان قرار داده شد. بده عبوری به وسیله‌ی یک سرریز مستطیلی لبه تیز در انتهای نهر پایه‌دار، اندازه‌گیری می‌شد. عمق جریان نیز به وسیله‌ی یک دریچه‌ی فولادی در انتهای نهر پایه‌دار تنظیم می‌شد.

پس از گذشتن این زمان مشاهده شد که حرکت ذرات بستر تقریباً متوقف گشته و شکل بستر به حالت ثابت و مشخص رسید. 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 ۳ - منحنی تغییرات زمانی آبشستگی برای دو بده ۲۱/۲ و ۲۵/۶ لیتر بر ثانیه در مدت شش ساعت

### نتایج و بحث

بعد از شروع آزمایش جابه‌جایی ذرات بستر، به دلیل شکل گوشه‌دار مقطع پایه، ابتدا از گوشه‌های پایه شروع شد که تحت تأثیر جدا شدن جریان بوده و باگذشت 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 به‌مرور زمان، حفره‌های کناری که در بالادست پایه شکل گرفته بود، به سمت کناره‌های وسط پایه گسترش پیدا کرد. با عمیق شدن حفره‌ی آبشستگی فعالیت گرداب‌های نعل اسبی در جلو و کناره‌ها قوت گرفت و به‌مرور زمان ذرات رسوبی که از جلو و اطراف پایه شسته می‌شدند، از نیمه‌ی پائینی وجه کناری به بعد، به‌صورت پشته‌ی رسوبی جمع گشته و به‌مرور تپه‌ی رسوبی در کناره‌ها و پشت پایه در پایین‌دست شکل می‌گرفت.

### اثر تغییر عدد فرود

تغییرات عدد فرود جریان، عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی در بالادست پایه، در پایه‌های شاهد و شکافدار، در تمام ترازهای قرارگیری شکاف، در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. با افزایش عدد فرود جریان، قدرت

کوارتز و دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس روابط زیر را ارائه نمود که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز است.

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (4)$$

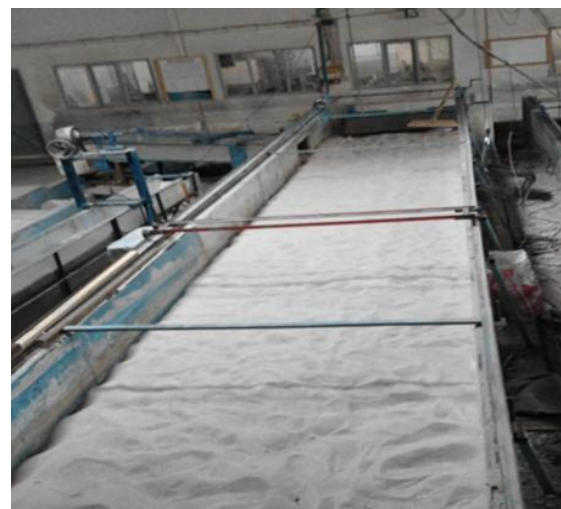
$$0.1mm < d_{50} < 1mm$$

$$U_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \quad (5)$$

$$1mm < d_{50} < 100mm$$

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

$$\frac{V_c}{U_{*c}} = 5.75 \log \left( 5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (6)$$



شکل ۲ - الف) نمایی از نهر آزمایشگاهی

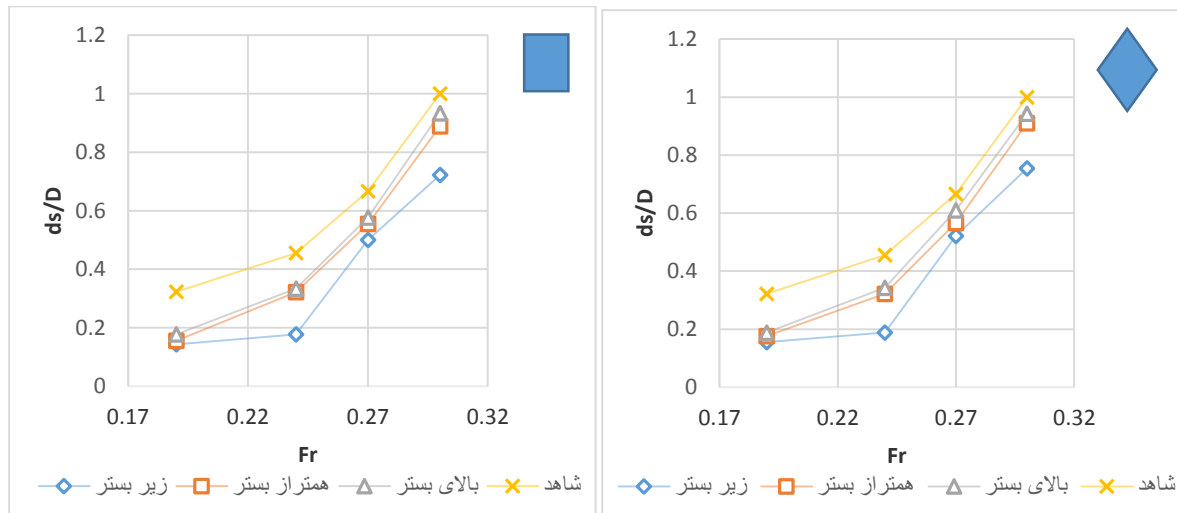


شکل ۲ - ب) نمایی از عوارض حاصل از اجرای مدل

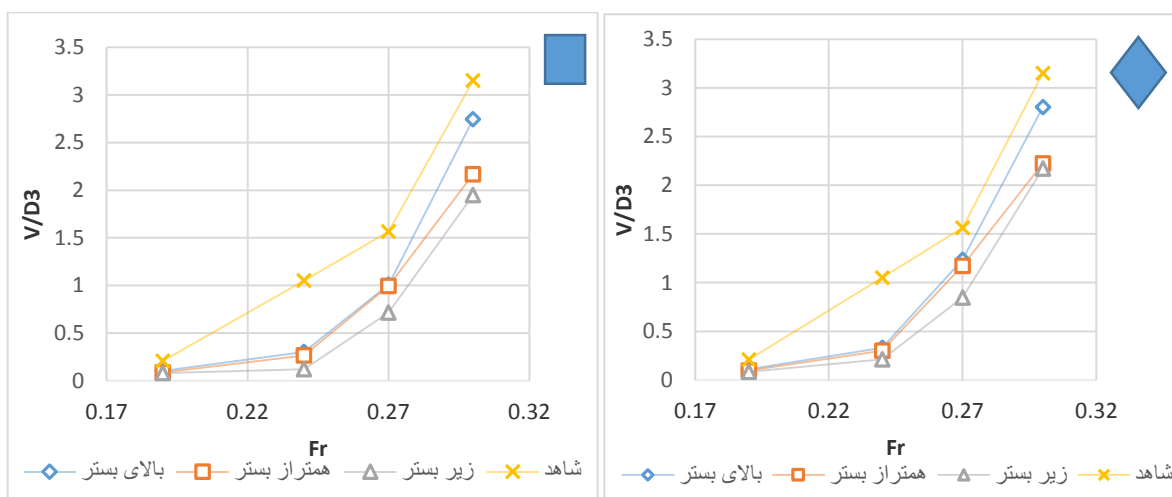
از آنجا که هدف از این آزمایش‌ها مقایسه‌ی اثر لنگر دوم سطح شکاف بر آبشستگی موضعی در شرایط متفاوت هیدرولیکی است، لزومی برای رسیدن به عمق آبشستگی نهایی نیست، از این‌رو جهت تعیین زمان آزمایش‌ها در این تحقیق حاضر، ابتدا به‌ازا دو بده ۲۱/۲ و ۲۵/۶ لیتر بر ثانیه، پایه‌ی شاهد به مدت شش ساعت مورد آزمایش شد.

جریان، عمق آبخستگی و حجم چاله‌ی آبخستگی افزایش می‌یابد. با افزایش ۵۸ درصدی عدد فرود، عملکرد شکاف‌ها به‌طور متوسط ۳۴/۲ درصد کاهش می‌یابد.

جریان پایین‌رونده افزایش می‌یابد، و در پی آن گرداب‌های نعل اسبی در زمان کوتاه‌تر و با قدرت بیشتری شکل گرفته و شروع به فعالیت می‌کنند. به همین خاطر با افزایش بده



شکل ۴ - تغییرات عمق آبخستگی حداکثر (الف) پایه با شکاف لوزی، (ب) پایه با شکاف مربع



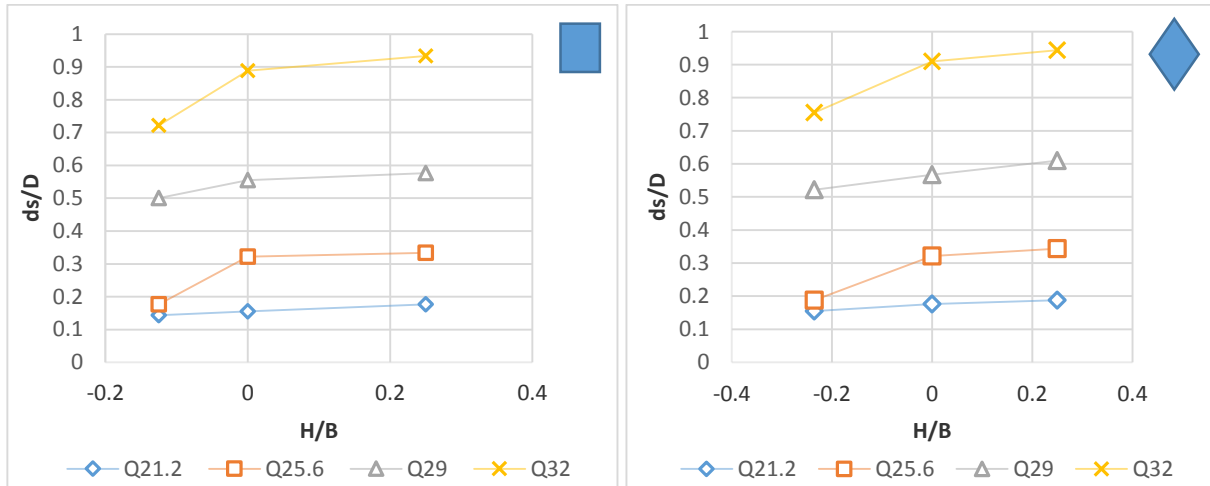
شکل ۵ - تغییرات حجم چاله‌ی آبخستگی (الف) پایه با شکاف لوزی، (ب) پایه با شکاف مربع

جریان پایین‌رونده گشته و مانع برخورد مستقیم آن با بستر می‌شود و در ادامه، گرداب‌های نعل اسبی، که در زیر افشانه افقی شکل می‌گیرند نیز ضعیف خواهند شد. هر چه محل قرارگیری شکاف از بستر فاصله می‌گیرد، افشانه افقی ایجادشده از سطح بستر دور شده و عملاً شکاف اثر کمتری را در فعالیت گرداب‌های نعل اسبی خواهد داشت. با افزایش تراز قرارگیری شکاف از زیر بستر تا بالای بستر، عمق آبخستگی حداکثر به‌طور متوسط ۳۷/۷ درصد افزایش می‌یابد.

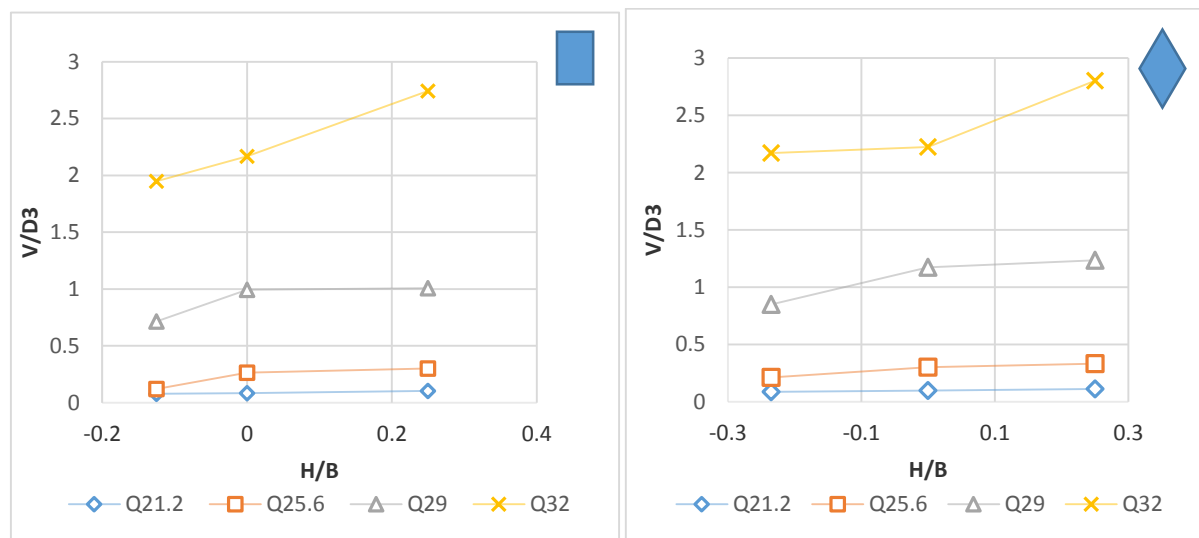
### اثر تغییر تراز قرارگیری شکاف

با افزایش تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر، عمق آبخستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبخستگی افزایش می‌یابد. این موضوع در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است، شکاف در پایه‌ها ایجاد می‌شود بخشی از جریان برخوردی به پایه عبور کرده و از قدرت جریان پایین‌رونده کاسته شود. از طرفی، جریان عبوری از شکاف، رفتاری را شبیه به یک افشانه افقی دارد که عمود بر جریان پایین‌رونده، مانند سپری در برابر بستر، باعث انحراف





شکل ۶- تأثیر تراز قرارگیری شکاف بر عمق آبشستگی حداکثر الف) پایه با شکاف لوزی، ب) پایه با شکاف مربع



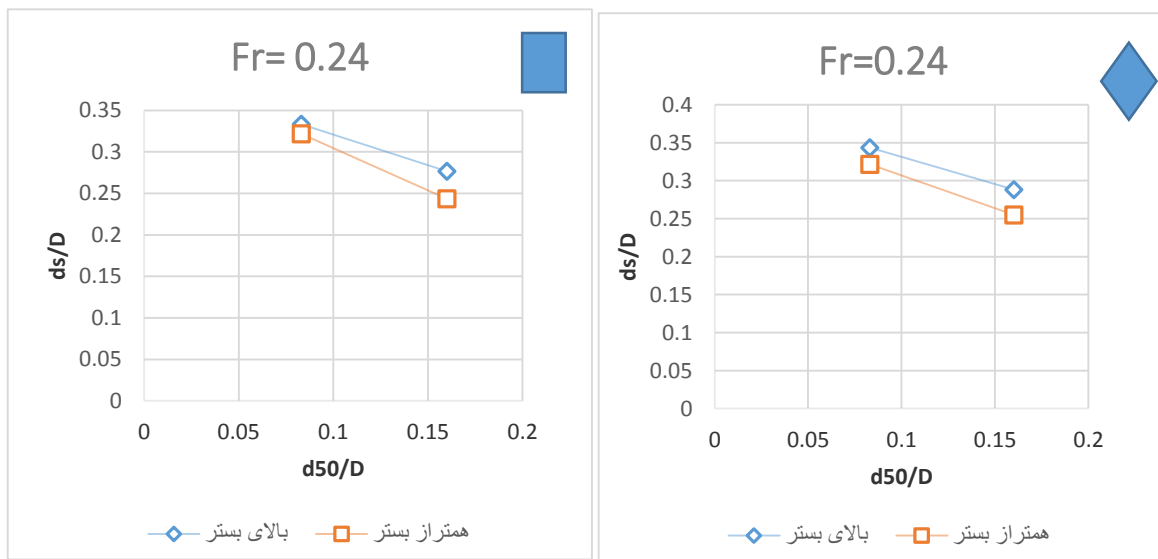
شکل ۷- تأثیر تراز قرارگیری شکاف بر حجم چاله‌ی آبشستگی بالادست پایه الف) پایه با شکاف لوزی، ب) پایه با شکاف مربع

مربع

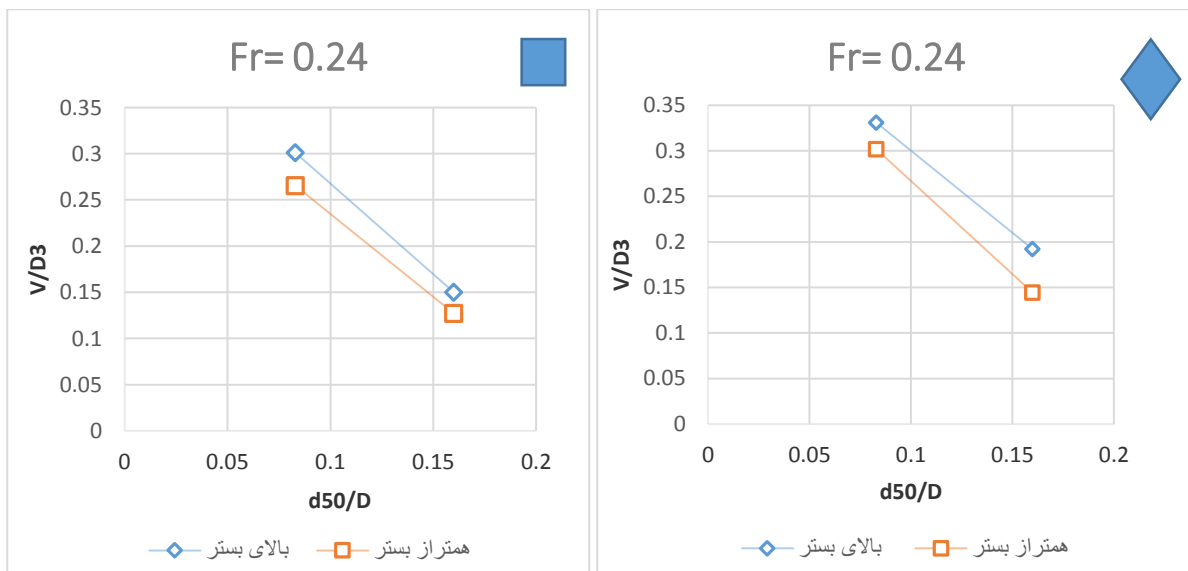
دانه‌های بستر نیروی مقاوم در برابر فرسایش است. با افزایش اندازه‌ی متوسط دانه‌ها، در واقع نیروی مقاوم بالا رفته و در پی آن عمق آبشستگی و نیز حجم رسوب‌های جابه‌جا شده و چاله‌ی آبشستگی کاهش می‌یابد. با دو برابر شدن اندازه‌ی متوسط دانه‌ها، عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی به ترتیب و به‌طور متوسط ۱۹/۵ و ۴۹ درصد کاهش می‌یابد.

### اثر تغییر دانه‌بندی بستر

با افزایش اندازه‌ی متوسط دانه‌های بستر، از عمق آبشستگی حداکثر و حجم چاله‌ی آبشستگی بالادست پایه، کاسته می‌شود. این موضوع در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. در پدیده‌ی آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل، نیروی حاصل از جریان سیال نیروی محرک و وزن



شکل ۸ - تأثیر اندازه‌ی متوسط دانه‌ها بر عمق آبشستگی حداکثر الف) پایه با شکاف لوزی، ب) پایه با شکاف مربع



شکل ۹ - تأثیر اندازه‌ی متوسط دانه‌ها بر حجم چاله‌ی آبشستگی الف) پایه با شکاف لوزی، ب) پایه با شکاف مربع

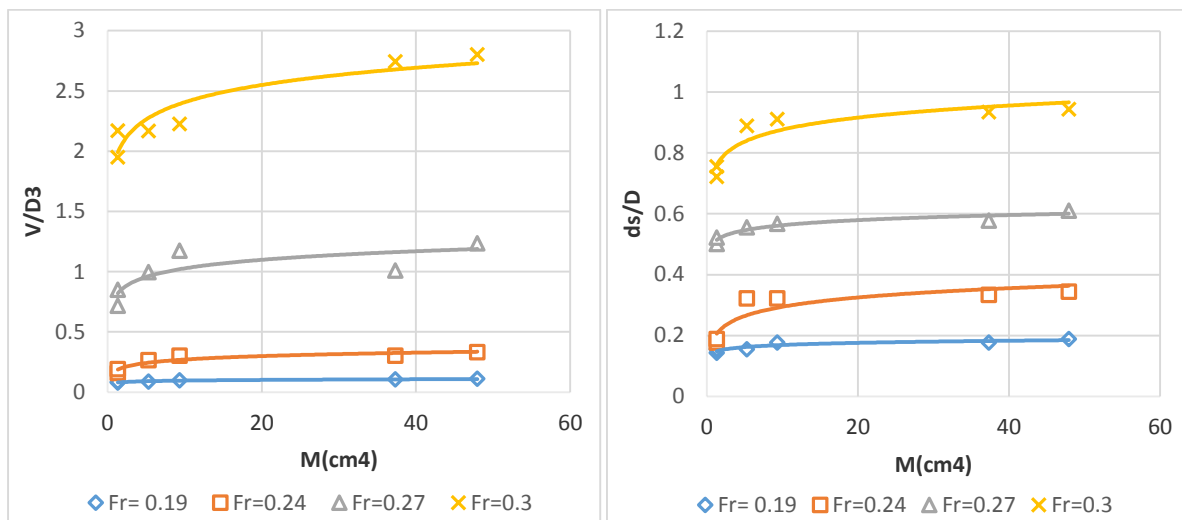
عملکرد شکاف‌ها با تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر، عدد فرود و لنگر دوم سطح شکاف رابطه‌ی عکس دارد. این موضوع در شکل ۱۱ و جدول ۱ قابل رویت است. نتایج این بخش با تحقیقات چیو (۱۹۹۲)، الرازک و همکاران (۲۰۰۳) و القراب و همکاران (۲۰۱۳) که در مروری بر منابع اشاره گردید، همخوانی دارد.

### اثر لنگر دوم سطح شکاف

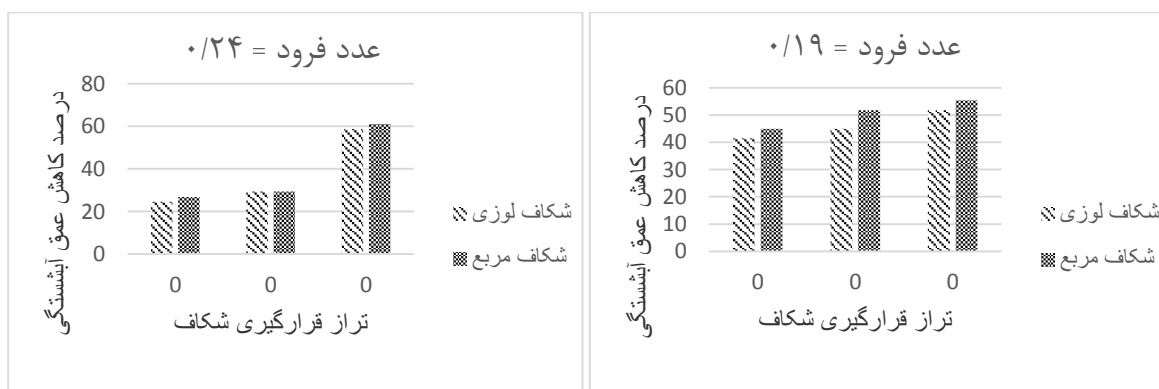
با افزایش لنگر دوم سطح شکاف در هر چهار عدد فرود، عمق آبشستگی و حجم چاله‌ی آبشستگی افزایش یابد. این موضوع در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

### اثر لنگر دوم سطح شکاف بر عملکرد شکاف‌ها



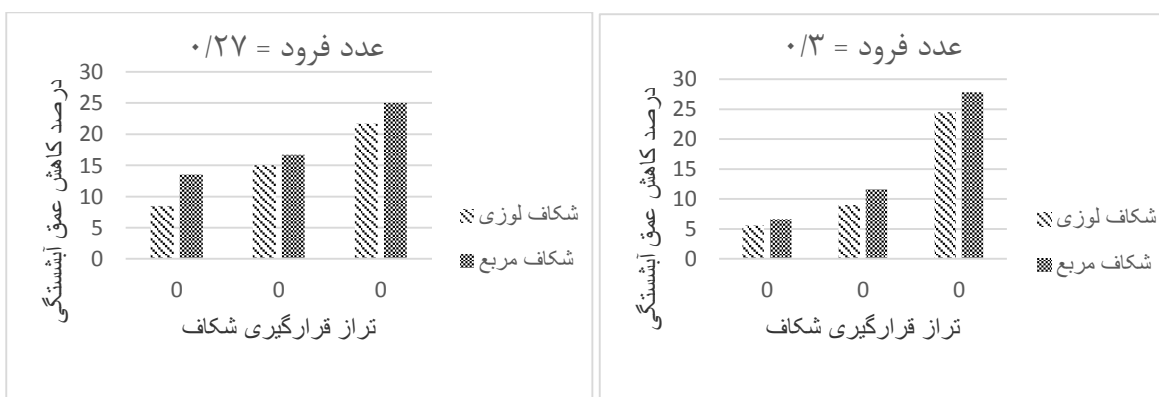


شکل ۱۰- تغییرات الف) عمق آبشستگی حداکثر و ب) حجم چاله ی آبشستگی با لنگر دوم سطح شکاف



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۱۱- مقایسه ی عملکرد شکافها (کاهش عمق آبشستگی) در دبی ها و تراز قرارگیری های متفاوت

## نتیجه گیری

۴) شفای بجستان، م. ۱۳۸۷. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران.

۵) عقلی، م. و زمردیان، م. ع. ۱۳۹۱. تأثیر توأم طوق و کابل بر روی عمق آبخستگی اطراف پایه پل در قوس رودخانه‌ها. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۶، شماره ۳، پاییز ۹۲. ۳۱-۴۰.

۶) کاردان، ن. حکیم زاده، ح.، و حسن زاده، ی. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی مدل‌های ترکیبی سکو، شیب جانبی و شکاف در کاهش فرسایش بستر پیرامون پایه‌های پل رودخانه‌ای. مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، دوره پنزدهم، شماره ۲، تابستان ۹۴. ۱۰۳-۱۱۶.

۷) مسجدی، ع.، و غلامزاده محمودی، م. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آبخستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و خاک، شماره ۵۹، بهار ۱۳۹۰. ۲۷-۳۸.

۸) مولایی، ح. ۱۳۹۳. تعیین اثر هندسه شکاف روی کاهش عمق آبخستگی در پایه‌های استوانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

۹) نظریها، م. ۱۳۸۰. تغییرات زمانی آبخستگی موضعی اطراف پایه‌های پل. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۵ تا ۱۷ آبان، دانشکده فنی تهران. ۱۲-۲۰.

10) Breusers, H. N. C., and Rudkivi, A. J. 1991. Scouring-hydraulic structures design manual. IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland.

11) Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 118(11): 1260-1269.

12) El-Ghorab, E. 2013. Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. Alexandria Engineering Journal (2013) 52: 467-478.

13) El-Razck, M. A., El-Motaleb, M. A., and Bayoumy, M. 2003. Scour reduction around bridge piers using internal openings through the pier. J. Alexandria Engineering. 42(2):241-248.

14) Ghani, A., and Mohammadpour, R. 2015. Temporal variation of clear-water scour at compound Abutments. Ain Shams Engineering Journal 7(4):1045-1052.

در این پژوهش اثر لنگر دوم سطح شکاف بر آبخستگی موضعی اطراف پایه با مقطع مستطیلی، برای دو شکاف لوزی و مربع شکل بررسی گردید و نتایج زیر حاصل شد:

- ✓ با افزایش ۵۸ درصدی عدد فرود عملکرد شکافها به طور متوسط ۳۲/۴ درصد کاهش می‌یابد.
- ✓ با افزایش تراز قرارگیری شکاف از بستر، عمق آبخستگی ۳۷/۷ درصد افزایش می‌یابد.
- ✓ با دو برابر شده اندازه ی متوسط دانه‌های بستر، عمق آبخستگی و حجم چاله‌ی آبخستگی به ترتیب ۱۹/۵ و ۴۹ درصد کاهش می‌یابد.
- ✓ با افزایش لنگر دوم سطح شکاف، عمق آبخستگی و حجم چاله‌ی آبخستگی افزایش می‌یابد.
- ✓ عملکرد شکاف با عدد فرود، تراز قرارگیری شکاف از بستر و لنگر دوم سطح شکاف رابطه‌ی عکس و با اندازه‌ی متوسط دانه‌های بستر رابطه‌ی مستقیم دارد.

## تشکر و قدردانی

از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به دلیل قرار دادن امکانات، در این تحقیق تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

## منابع

- ۱) پورا احمدی، م.، و حکیم‌زاده، ح. ۱۳۹۰. بررسی تجربی آبخستگی موضعی در اطراف پایه‌های مخروطی شکل تحت اثر جریان ماندگار. ششمین کنگره ملی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان. ۱-۷.
- ۲) پیرمحمدی، ر.، حیدرپور، م.، و افضل‌ی مهر، ح. ۱۳۸۴. مشاهدات نحوه‌ی توسعه‌ی آبخستگی موضعی در گروه پایه‌های پل در هنگام استفاده از طوق. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷ تا ۱۹ آبان، دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۱۵-۲۳.
- ۳) ثانی‌خانی، ه.، حسین‌زاده دلیر، ع.، و فرسادی زاده، د. ۱۳۸۷. عملکرد طوق‌های مربعی شکل کاهش آبخستگی در اطراف پایه‌های پل. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران. ۱-۸.

- 15) Johnson, P. A and dock, D .A .1998. Probabilistic bridge scour estimates. J.Hydr. Eng. ASCE. 124(7):750-754.
- 16) Kumar ,V., Ranga, Raju. K. G ,and Vittal N. 1999.Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. J. Hyd. Eng., ASCE 125(12): 1302-1305.
- 17) Lee ,S. O., and Sturm, T .W. 2009. Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. J. Hyd . Engrg. ASCE 135(10): 793-802.
- 18) Mashahir, M. B.,and Zarrati, A. R. 2002. Effect of Collar on Time Development of Scouring around Rectangular Bridge Piers. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications 25(1(C)):11-17.
- 19) Mehville, B .W .,and Chiew, Y. M. 1999.Time scale for local scour depth at bridge piers” Journal of Hydraulic Engineering ASCE 125(1):59-65.
- 20) Mellvil , B .W. 1997. Pier and abutment scour. Integrated approach. J Hyd Engrg ASCE 132(2): 125-136.
- 21) Moncada, A.T., Aguirre, P.E.J., Bolivar, J.C., and Flores, E.J., 2009, Scour protection of circular bridge piers with collar and slots. J Hyd Res 47(1): 119-126.
- 22) Raudkivi, A. J., and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3): 339-350.
- 23) Richardson, E. V., and Davis, S. R.1995. Evaluating scour at bridges. 3<sup>rd</sup> edition Hydraullic Engineering circular No.18, publication No FHWA IP-90-017 U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington.
- 24) 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): 154-162.

