

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر عوامل هندسی و هیدرولیکی بر مشخصات آب‌شستگی اطراف گروه پایه‌های کج با فونداسیون

مه‌دی اسمعیلی ورکی<sup>۱\*</sup>، سعید موسی پور<sup>۲</sup> و محمد حاتم جعفری<sup>۳</sup>

### چکیده

با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال مدرنی بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به پل‌های با گروه پایه‌های کج اشاره کرد. با توجه به اهمیت شناخت مکانیزم‌های مؤثر بر آب‌شستگی این نوع از پایه‌های پل، در پژوهش حاضر تأثیر شرایط مختلف هیدرولیکی و رقوم کارگذاری فونداسیون پل بر روی مشخصات آب‌شستگی اطراف گروه پایه کج به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. برای این منظور آزمایش‌هایی بر روی گروه پایه‌ای متشکل از دو پایه کج مستطیلی با ابعاد ۲/۵ در ۳/۵ سانتی‌متر که با زاویه ۲۸ درجه بر روی فونداسیونی با ابعاد ۱۰ در ۱۶ سانتی‌متر نصب شد، انجام شد. آزمایش‌ها تحت شرایط مختلف سرعت و عمق جریان و نیز رقوم‌های نسبی مختلف کارگذاری فونداسیون (فاصله روی فونداسیون تا سطح بستر نسبت به عرض پایه)، ۱-، ۰/۵-، صفر و ۱+، انجام شد. بررسی نتایج نشان داد که تغییرات سرعت جریان در مقایسه با عمق تأثیر چشمگیری در حداکثر آب‌شستگی دارند. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که تغییر رقوم کارگذاری تأثیر معنی‌داری بر عمق آب‌شستگی دارد به گونه‌ای که حداکثر و حداقل آب‌شستگی به ترتیب در رقوم نسبی کارگذاری فونداسیون ۱+ و ۰/۵- رخ می‌دهد. ارزیابی نتایج نشان داد که در کلیه شرایط هیدرولیکی، به غیر از رقوم نسبی کارگذاری فونداسیون ۰/۵-، آب‌شستگی در گروه پایه کج از تک پایه بیشتر است.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌شستگی، رقوم کارگذاری، شرایط هیدرولیکی، گروه پایه کج، فونداسیون.

**ارجاع:** اسمعیلی ورکی م. موسی پور س. و جعفری م. ح. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تأثیر عوامل هندسی و هیدرولیکی بر مشخصات آب‌شستگی اطراف گروه پایه‌های کج با فونداسیون. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳): ۱۳۹-۱۴۸.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد واحد دزفول.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

\* نویسنده مسئول: [esmaeli@guilan.ac.ir](mailto:esmaeli@guilan.ac.ir) و [esmaeli.varaki@yahoo.com](mailto:esmaeli.varaki@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۲

## مقدمه

آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل یکی از مباحث مهم در هیدرولیک رسوب و مهندسی روخانه به شمار می‌رود. در اثر آب‌شستگی حفره‌ای در اطراف پایه پل شکل گرفته که به تدریج با توسعه آن باعث ناپایداری سازه و در نهایت تخریب آن در یک سیلاب که نقش آن‌ها برای حمل و نقل و امدادسانی به مناطق آسیب دیده پر اهمیت تر می‌شود، خواهد شد.

در اثر برخورد آب به پایه پل، کاهش فشار از سطح آزاد جریان به سمت بستر رخ داده و جریان‌های رو به پایین ایجاد می‌شود. این جریان‌ها رو به پایین پس از برخورد به بستر با جریان اصلی ترکیب شده و گرداب نعل اسبی را به وجود می‌آورد. گرداب‌های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه پل فعالیت دارند. گرداب برخاستگی در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل ایجاد می‌شوند. این نوع سیستم گردابی مانند یک گردباد عمل می‌کند و رسوبات را از کف به سمت بالا حرکت می‌دهد. به عبارت دیگر جهت حرکت این سیستم گردابی رو به بالا است. بررسی‌ها نشان می‌دهد گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای را در ایجاد حفره آب‌شستگی اطراف پایه پل دارند (ملویل و ساترلند، ۱۹۸۸).

آب‌شستگی اطراف پایه پل را می‌توان در دو حالت آب‌شستگی آب زلال و آب‌شستگی بستر متحرک مطالعه قرار کرد. در آب‌شستگی آب زلال به علت عدم حرکت رسوبات بالادست پایه پل، حداکثر مقدار عمق حفره آب‌شستگی ایجاد می‌شود. در آب‌شستگی بستر متحرک، به دلیل حمل رسوبات از بالادست به پایین دست، بخشی از چاله آب‌شستگی با این رسوبات پر شده و عمق حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد (چیو و ملویل، ۱۹۸۷). تاکنون پژوهشگران زیادی مسأله آب‌شستگی پایه‌های پل را مطالعه کرده‌اند. در این پژوهش‌ها جنبه‌های مختلف از پارامترهای اثرگذار بر آب‌شستگی بررسی شده است. نتایج پژوهش‌های انجام شده در رابطه با تأثیر پارامترهای هندسی پایه نظیر قطر پایه، یکنواختی سطح مقطع و زاویه آن در صفحه قائم و موازی جریان نشان داد که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، حداکثر عمق آب‌شستگی تا ۲/۴ برابر قطر پایه خواهد رسید. در شرایطی که سطح مقطع متفاوت باشد، نظیر شرایطی که پایه بر روی فونداسیون قرار گرفته است، بسته به رقوم کارگذاری

فونداسیون مقدار آب‌شستگی متفاوت می‌باشد. نتایج پژوهش‌ها نشان داد برای شرایطی که فونداسیون در عمقی کمتر از حداکثر آب‌شستگی برای تک پایه قرار گیرد، حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. علت این موضوع به کاهش سطح آب‌شستگی در عمق و در نتیجه عدم توانایی جریان برای تعریض چاله آب‌شستگی و تعمیق بیشتر وقتی که به فونداسیون می‌رسد، نسبت داده شد. همچنین در شرایطی که تراز کارگذاری فونداسیون بالاتر از بستر است، عمق آب‌شستگی نسبت به تک پایه افزایش می‌یابد. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با کج‌شدگی پایه در صفحه موازی با جریان و به سمت بالادست، بر مقدار حداکثر آب‌شستگی افزوده خواهد شد (ملویل و رادکیوی، ۱۹۹۶؛ ملویل و ساترلند، ۱۹۸۸؛ بروسر و رادکیوی، ۱۹۹۱؛ جونز و همکاران، ۱۹۹۲؛ پارولا و همکاران، ۱۹۸۹ و ویتال و همکاران، ۱۹۹۴).

مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان مانند سرعت و عمق بر آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل نشان داد که تأثیر عمق جریان بر حداکثر آب‌شستگی وابسته به قطر ذرات مصالح بستر بوده و از عمق نسبی (نسبت عمق جریان به قطر پایه) ۱ برای ذرات ریزدانه تا ۶ برای ذرات درشت‌دانه در تغییر است (رادکیوی و اتما، ۱۹۸۳ و ملویل و چیو، ۱۹۹۹).

پژوهش‌های انجام شده در رابطه با اثر مشخصات رسوبات بستر نظیر قطر ذرات و یکنواختی بر حداکثر آب‌شستگی نشان داد که هر چه غیریکنواختی رسوبات بیشتر شود، مقدار آب‌شستگی به دلیل ایجاد لایه جوشن شده در چاله آب‌شستگی، کاهش می‌یابد. پژوهش‌های انجام شده نشان داد در شرایطی که نسبت قطر پایه به قطر متوسط ذرات بیش از ۲۰ تا ۵۰ باشد، کاهش قطر ذرات تأثیری بر تغییرات عمق آب‌شستگی نخواهد داشت (رادکیوی و اتما، ۱۹۸۳؛ کوتاری و همکاران، ۱۹۹۲؛ ابدو، ۱۹۹۳ و الیوتو و هگر، ۲۰۰۲).

گروه پایه کج یکی از انواع پل‌ها با هندسه مدرن بوده که با توجه به توسعه فناوری‌های ساخت سازه‌ها، نمونه‌هایی از آن‌ها در نقاط مختلف جهان از جمله پل هشتم اهواز، ساخته شده است. از آنجا که تاکنون پژوهشی در رابطه با الگوی آب‌شستگی و تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر آن برای طراحی ایمن این نوع از پل‌ها انجام نشده است، در پژوهش حاضر اثر پارامترهای مختلف هیدرولیکی

از جنس شیشه و کف پلاکسی گلاس بود، انجام شد. برای تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ که قادر بود دبی سیستم را تا ۷۰ لیتر بر ثانیه تأمین کند، استفاده شد (شکل ۱). جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن اندازه‌گیری بالادست شده که در انتهای آن سرریز مثلثی جهت اندازه‌گیری دبی جریان نصب شد. سپس جریان با عبور از سرریز وارد مخزن آرام‌کننده پایین دست شده و در ادامه وارد کانال می‌شد. برای کاهش تلاطم جریان ورودی به کانال و ممانعت از شکل‌گیری جریان‌های عرضی در ورودی، از مستقیم‌سازنده جریان در ابتدای کانال استفاده شد. برای تنظیم عمق جریان در کانال از دریچه پروانه‌ای که در انتهای آن نصب شده بود، استفاده شد. برای اطمینان از توسعه یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل، محل نصب آن ۵ متر بعد از ورودی انتخاب شد.

گروه پایه کج مورد بررسی در این پژوهش شامل دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر بود که با زاویه ۲۸ درجه روی فونداسیون مستطیلی به طول و عرض ۱۶ و ۱۰ سانتی‌متر نصب شد (شکل ۱). ابعاد پایه نمونه به مقیاس ۱/۱۹۰ از پل هشتم اهواز می‌باشد. در انتخاب مقیاس سعی شد که ابعاد نهایی پایه به گونه‌ای باشد که ضوابط ارایه شده توسط پژوهشگران در رابطه با عدم تأثیرپذیری مقدار آب‌شستگی از عرض فلوم رعایت شد. طبق نظر رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) اگر نسبت عرض فلوم به عرض پایه از ۶/۲۵ بیشتر باشد، دیواره‌های فلوم تأثیری بر مقدار آب‌شستگی نخواهند داشت. مقدار این نسبت برای پایه و فونداسیون پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۲۶ و ۱۰ بود.

همان‌طور که ذکر شد، قطر ذرات رسوبی یکی از پارامترهای اثرگذار بر مقدار آب‌شستگی می‌باشد. ملویل و ساترلند (۱۹۸۸)، نشان دادند که اگر نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی از ۲۵-۲۰ بیشتر باشد، کاهش قطر ذرات تأثیری بر مشخصات آب‌شستگی نخواهد داشت. همچنین رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) بیان کردند که جهت ممانعت از تشکیل شکنج<sup>۱</sup> در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر رسوبات باید از ۰/۶ میلی‌متر بیشتر باشد. رسوبات مورد استفاده در این پژوهش دارای قطر ۰/۶ میلی‌متر بود که از مصالح رودخانه‌ای تهیه و بعد از الک کردن (رد شده از الک ۳۰ و مانده روی الک ۴۰) در بازه‌ای به طول ۱/۵

و نیز رقوم کارگذاری فونداسیون بر حداکثر آب‌شستگی در اطراف گروه پایه کج به صورت آزمایشگاهی بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

### الف) تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل مجموعه‌ای از پارامترهای توصیف‌کننده هندسه پایه پل، شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات سیال و رسوب بستر و زمان را شامل می‌شود که آن‌ها را می‌توان به صورت معادله تابعی زیر نوشت:

$$f_2(y, d_s, D, D_*, D_{50}, Z, U, r, m, g, s_g, a, b, t, t_e) = 0 \quad (1)$$

در این معادله  $y$ ، عمق جریان،  $d_s$ ، عمق آب‌شستگی،  $D$ ، عرض پایه پل،  $D_*$ ، عرض فونداسیون،  $D_{50}$ ، قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر است،  $Z$ ، فاصله بستر جریان تا روی فونداسیون،  $U$ ، سرعت متوسط جریان،  $r$ ، چگالی آب،  $m$ ، لزوجت دینامیک،  $g$ ، شتاب ثقل،  $s_g$ ، انحراف معیار مصالح رسوبی بستر،  $a$ ، زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان،  $b$ ، زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان،  $t$  زمان از شروع آب‌شستگی و  $t_e$  زمان نهایی یا تعادل آب‌شستگی است. با به کارگیری تئوری بایکینگهام در تحلیل ابعادی، معادله ۱ را می‌توان به صورت معادله بی‌بعد زیر نوشت:

$$f_2\left(\frac{y}{D_*}, \frac{d_s}{D_*}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{D}{D_*}, \frac{Z}{D_*}, \frac{U}{U_c}, \text{Re}, s_g, a, b, \frac{t}{t_e}\right) = 0 \quad (2)$$

با توجه به شرایط آزمایشگاهی در پژوهش حاضر، از میان پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی پایه پل، پارامتر انحراف معیار هندسی به دلیل یکنواختی رسوبات انتخاب شده و زوایای پایه‌های پل در صفحه جریان و قائم، ثابت در نظر گرفته شد. همچنین به جهت اینکه عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از مقدار ۹۱۰۰ بیشتر بود، لذا از تأثیر این پارامتر صرف‌نظر شده و معادله ۲ به صورت معادله زیر ساده شد.

$$\frac{d_s}{D_*} = f_3\left(\frac{y}{D_*}, \frac{U}{U_c}, \frac{Z}{D_*}, \frac{t}{t_e}\right) \quad (3)$$

### ب) تجهیزات آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی و به طول ۸/۶ متر، عرض ۰/۹۲ و عمق ۱ متر که دارای دیواره‌های

۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۲). با مقایسه نتایج حاصل از آب‌شستگی‌های اندازه‌گیری شده، زمان تعادل ۱۵۰۰ دقیقه که معادل با ۲۵ ساعت بود، حاصل شد.

### نتایج و بحث

در مجموع برای بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی و رقم کارگذاری بر آب‌شستگی اطراف گروه پایه کج ۴۸ آزمایش انجام شد که دامنه پارامترهای مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. ملویل و چپو (۱۹۹۹) بیان کردند که اگر نسبت عمق جریان به قطر پایه بسته به قطر ذره رسوبی بیشتر از ۱ تا ۶ باشد، عمق جریان تأثیری بر حداکثر عمق آب‌شستگی نخواهد داشت. از این‌رو دامنه عمق انتخاب شده در این پژوهش به گونه‌ای بود که برای پایه‌های پل تأثیری بر عمق آب‌شستگی نداشته باشد ولی، برای فونداسیون هر دو محدوده تأثیرگذار و عدم تأثیر را شامل شود.

برای بررسی زمانی آب‌شستگی اطراف گروه پایه کج، مقادیر آب‌شستگی در مقابل و طرفین پی در طول زمان ۲۵ ساعت اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری مستمر عمق آب‌شستگی در طول زمان ۲۵ ساعت، در کلیه آزمایش‌ها تغییرات آب‌شستگی به مدت ۷ ساعت که تقریباً ۸۵ درصد آب‌شستگی رخ داد، به صورت پیوسته اندازه‌گیری شده و سپس حداکثر عمق آب‌شستگی بعد از قطع آزمایش در زمان ۲۵ ساعت اندازه‌گیری شد. در ادامه تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر آب‌شستگی تشریح می‌شود.

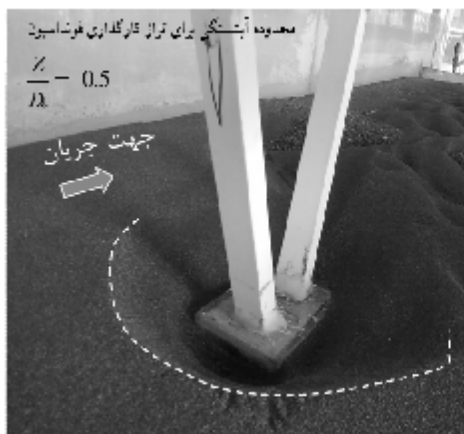
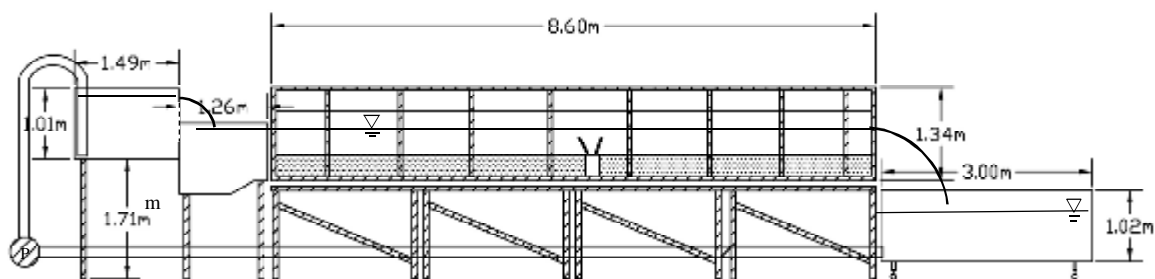
متر از فلوم آزمایشگاهی که محدوده مورد مطالعه برای آب‌شستگی بود، قرار داده شد. جهت شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، بالادست و پایین‌دست بازه مورد مطالعه از رسوبات درشت‌دانه که در مرحله الک کردن باقی‌مانده بود، پوشیده شد.

قبل از شروع آزمایش‌ها لازم بود که سرعت آستانه حرکت برای قطر رسوبات مورد استفاده مشخص شد. بنابراین برای شرایط مختلف عمق و دبی، وضعیت آستانه حرکت بررسی و در نهایت مقدار متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت ۰/۲۲ متر بر ثانیه تعیین شد. مقایسه نتایج حاصله با دیاگرام شیلدز و معادلات تجربی مطابقت مطلوبی را نشان داد. در هر آزمایش‌ها، ابتدا با تعیین دبی جریان برای سرعت و عمق مورد نظر، آب به تدریج و به آرامی وارد کانال شده و سپس بعد از تنظیم دبی، عمق مورد نظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار شد.

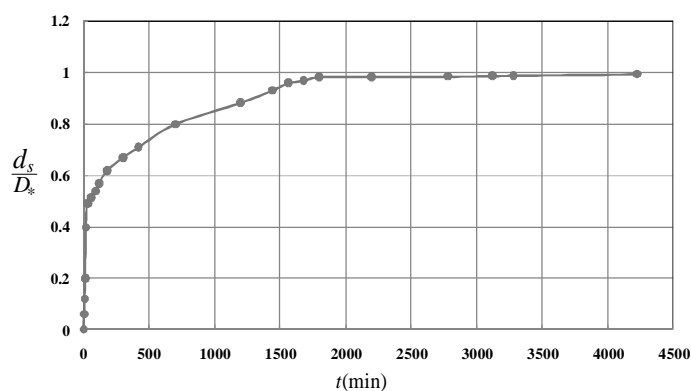
پدیده آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل فرآیندی زمان‌بر بوده و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای دارد. پژوهشگران معیارهای مختلفی را جهت تعیین زمان تعادل پیشنهاد کرده‌اند. ملویل و چپو (۱۹۹۹) اشاره کردند که زمان تعادل زمانی است که میزان آب‌شستگی در طی دوره زمانی ۲۴ ساعته کمتر از ۵ درصد باشد. اتما و رادکیوی (۱۹۸۳)، زمان تعادل را مدت زمانی معرفی کردند که در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر آب‌شستگی رخ ندهد. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش از معیار اتما و رادکیوی (۱۹۸۳) برای تعیین زمان تعادل استفاده شد. برای این منظور، ابتدا آزمایشی به مدت ۷۲ ساعت و با سرعت نسبی ۰/۹۵ انجام و تغییرات عمق آب‌شستگی با استفاده از عمق‌سنج با دقت

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی برای مطالعه آب‌شستگی

تعداد آزمایش	تراز نسبی قرارگیری فونداسیون ( $Z/D_s$ )	عمق نسبی جریان ( $y/D_s$ )	سرعت نسبی ( $U/U_c$ )	دبی جریان ( $l/s$ )
۱۲	۰	۳ و ۲، ۱	۰/۹۵ و ۰/۸، ۰/۶، ۰/۵	۱۱-۵۸
۱۲	۱	۳ و ۲، ۱	۰/۹۵ و ۰/۸، ۰/۶، ۰/۵	۱۱-۵۸
۱۲	-۰/۵	۳ و ۲، ۱	۰/۹۵ و ۰/۸، ۰/۶، ۰/۵	۱۱-۵۸
۱۲	-۱	۳ و ۲، ۱	۰/۹۵ و ۰/۸، ۰/۶، ۰/۵	۱۱-۵۸



شکل 1- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و گروه پایه پل کج نصب شده در ترازهای مختلف



شکل 2- توسعه زمانی آبشستگی برای  $U/U_c = 0.95$ ,  $y/D_* = 1$ , و  $Z/D_* = 0$

می‌باشد در حالی که برای  $y/D_* = 3$  زمان یاد شده به  $t/t_e = 0.63$  افزایش می‌یابد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش عمق جریان از قدرت جریان رو به پایین کاسته شده و در نتیجه فاز اول فرسایش که از برخورد جریان رو به پایین با بستر شکل می‌گیرد به کندی آغاز می‌شود. همچنین به جهت کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی که در فاز دوم باعث گسترش آبشستگی می‌شود، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (شکل 3- الف). مشاهده‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد که در شرایطی که رقوم کارگذاری فونداسیون در

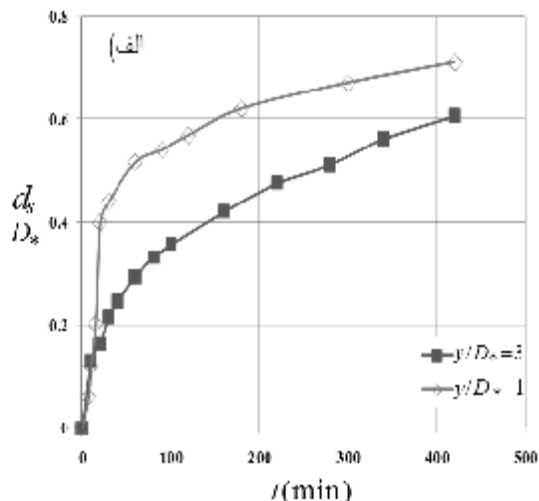
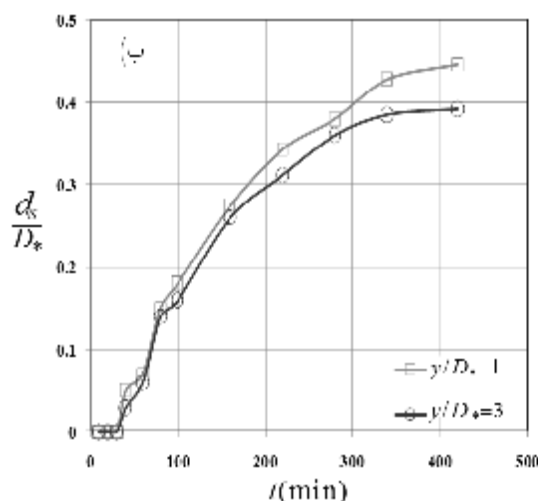
الف) بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی بر مقدار آبشستگی اطراف گروه پایه کج

تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به توسعه زمانی آبشستگی برای  $y/D_*$  های ۱ تا ۳ و نسبت‌های مختلف سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت ( $U/U_c$ ) نشان داد که در کلیه شرایط زمان رسیدن به ۸۵ درصد آبشستگی با افزایش عمق و نیز کاهش سرعت جریان افزایش می‌یابد. مثلاً، مقایسه نتایج مربوط به  $Z/D_* = 0$  نشان داد که در  $U/U_c = 0.95$ ، زمان رسیدن به ۸۵ درصد آبشستگی در  $y/D_* = 1$  در زمانی تقریباً برابر با  $t/t_e = 0.34$

مقدار عمق نسبی آبشستگی برای کلیه عمق‌های جریان، به طور متوسط برای شرایطی که تراز نسبی فونداسیون  $Z/D_* = -1$  باشد،  $3/7$  برابر افزایش می‌یابد. در تراز نسبی فونداسیون  $Z/D_* = -0.5$ ، این مقدار به  $2/1$  برابر افزایش یافت. با افزایش تراز نسبی فونداسیون به  $Z/D_* = 0$ ، عمق نهایی آبشستگی  $9/1$  برابر افزایش یافته و در نهایت برای تراز نسبی فونداسیون  $Z/D_* = 1$ ، مقدار آن به  $4/7$  برابر افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که علت افزایش قابل ملاحظه نرخ حداکثر عمق آبشستگی در شرایطی که رقوم کارگذاری فونداسیون برابر با بستر باشد ( $Z/D_* = 0$ )، آن است که در این رقوم آبشستگی در مقابل پایه در سرعت نسبی  $0/5$  آستانه حرکت تقریباً رخ نمی‌دهد.

تراز بستر باشد، با کاهش سرعت جریان عامل شکل دهنده گودال فرسایش تغییر می‌یابد. با کاهش سرعت جریان به  $0/8$  آستانه حرکت، جریان رو به پایین در مقابل پایه پل به گونه‌ای ضعیف شده که دیگر قادر به فرسایش مقابل فونداسیون نمی‌شوند. در این حالت فرسایش از کناره‌های فونداسیون و در اثر برخورد جریان به پایه‌ها و ایجاد دنباله‌ها در پایین دست آن آغاز می‌شود. سپس گودال فرسایش یافته به تدریج به بالادست نزدیک و از دو طرف فونداسیون به دماغه آن پیشروی می‌کند و در ادامه باعث ایجاد گودال در دماغه می‌شود. با ایجاد گودال در دماغه فونداسیون، گردابه‌های نعل اسبی شروع به فرسایش کرده و عمق فرسایش افزایش می‌یابد (شکل ۳-ب).

تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که به طور متوسط با افزایش سرعت جریان از  $0/5$  آستانه حرکت به  $0/95$ ،



شکل 3- تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای شرایط هیدرولیکی مختلف در تراز کارگذاری  $Z/D_* = 0$

(الف)  $U/U_c = 0.95$  و (ب)  $U/U_c = 0.8$

درصد کاهش می‌یابد. در  $Z/D_* = -0.5$ ، مقدار کاهش آبشستگی ۱۴ درصد، در  $Z/D_* = 0$ ، ۱۷ درصد و در  $Z/D_* = 1$ ، ۲۰ درصد می‌باشد. همان طور که در نیمرخ‌های طولی آبشستگی که در شکل ۵ ارائه شد، ملاحظه می‌شود، کاهش عمق آبشستگی با افزایش عمق نسبی جریان از ۱ به ۲، نسبت به افزایش عمق نسبی به ۳، محسوس‌تر است.

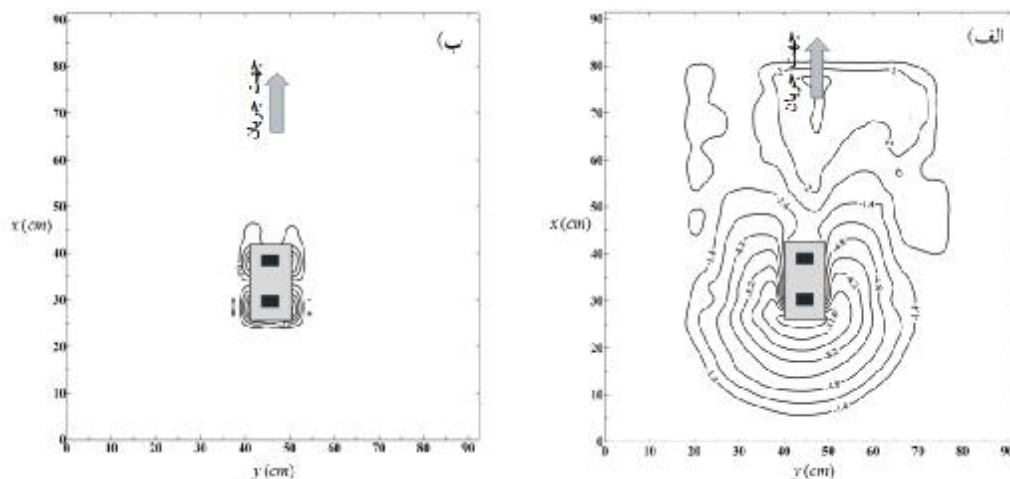
عامل اصلی این موضوع را می‌توان به کاهش قدرت جریانی که پس از برخورد به پایه‌ها به سمت بستر حرکت می‌کنند و نیز گردابه‌های برخاستگی نسبت داد. برای مطالعه بیشتر، با تزریق مواد رنگی و تصویر و فیلم‌برداری از

در شکل ۴ نمونه‌ای از وضعیت خطوط هم‌تراز بستر برای رقوم کارگذاری  $Z/D_* = 1$ ، نشان داده شد. همان طور که ملاحظه می‌شود، تغییر چشمگیر در ابعاد چاله آبشستگی در اثر کاهش سرعت جریان رخ داده است.

بررسی نتایج نشان داد که علاوه بر سرعت جریان، عمق جریان نیز بر حداکثر آبشستگی اثرگذار می‌باشد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در کلیه آزمایش‌ها با افزایش عمق نسبی جریان ( $y/D_*$ )، مقدار آبشستگی کاهش می‌یابد. برای شرایطی که رقوم کارگذاری برابر  $Z/D_* = -1$  بوده و در کلیه سرعت‌های مورد مطالعه، با افزایش عمق نسبی از  $y/D_* = 1$  به  $y/D_* = 3$ ، عمق آبشستگی ۱۸

پایه‌ها کاهش یافته و قدرت آن‌ها در مجاورت بستر جریان کم می‌شود. لذا نتیجه کاهش اثرات پدیده‌های یاد شده در مجاورت بستر، کاهش تا ۲۰ درصد عمق آب‌شستگی است.

آزمایش‌ها، دیده شد که هر چه عمق جریان بیشتر شود، عمق نفوذ جریان رو به پایین ناشی از برخورد به پایه و فونداسیون و نیز کریستال گردابه‌های برخاستگی در پشت



شکل 4- مقایسه تغییرات خطوط تراز تغییرات بستر در مجاورت پایه پل در رقوم کارگذاری  $Z/D_* = 1$

(الف)  $U/U_c = 0.95$ ، (ب)  $U/U_c = 0.5$

در رقوم کارگذاری فونداسیون هم‌تراز بستر ( $Z/D_* = 0$ )، حداکثر عمق آب‌شستگی تا  $0.77D_*$  ادامه می‌یابد. بررسی نتایج نشان داد که در تراز کارگذاری فونداسیون  $Z/D_* = -0.5$ ، آب‌شستگی تا  $0.77D_*$  می‌رسد.

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که در این تراز با توسعه آب‌شستگی به تراز کارگذاری فونداسیون، نرخ زمانی تغییرات آب‌شستگی کاهش چشم‌گیری می‌یابد. در شکل ۷، نمونه‌ای از منحنی‌های توسعه زمانی آب‌شستگی برای شرایط مذکور ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیش از ۹۰ درصد آب‌شستگی در بازه زمانی ۹۰ دقیقه اول آزمایش‌ها رخ داده است.

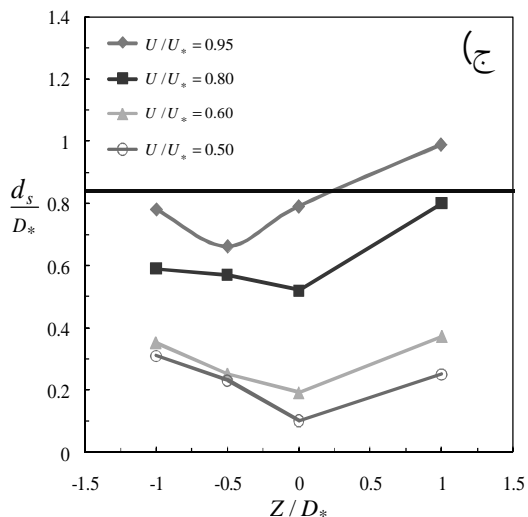
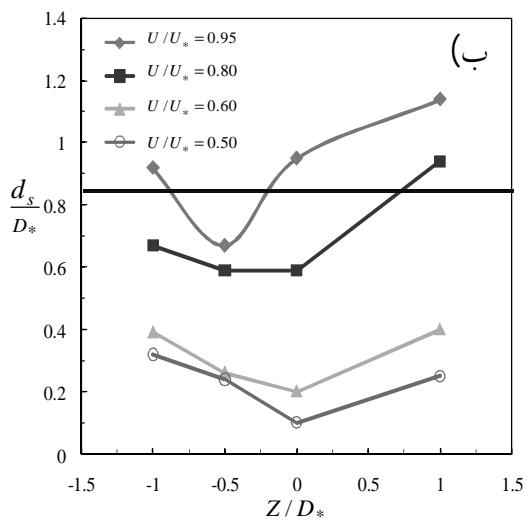
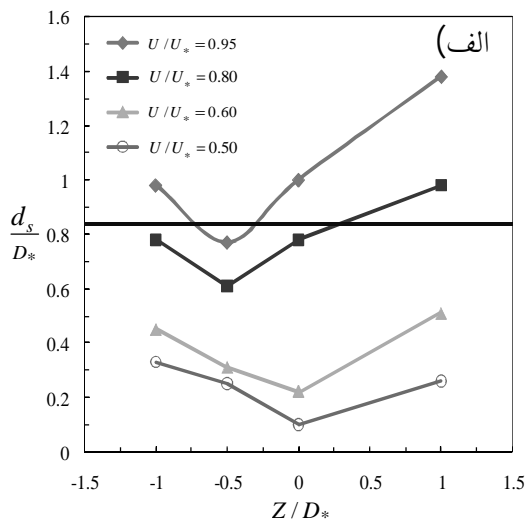
با کاهش تراز کارگذاری فونداسیون به  $Z/D_* = -1$ ، حداکثر آب‌شستگی به  $0.98D_*$  می‌رسد. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که اگرچه با کاهش تراز کارگذاری فونداسیون از  $Z/D_* = -0.5$  به  $Z/D_* = -1$ ، حداکثر آب‌شستگی افزایش می‌یابد، با وجود این به دلیل این که در این وضعیت تنها پایه‌ها در معرض جریان هستند، ابعاد چاله آب‌شستگی نسبت به وضعیت‌های قبل کمتر است.

برای مقایسه حداکثر عمق آب‌شستگی در گروه پایه کج با شرایط تک‌پایه استوانه‌ای، مقادیر عمق نهایی آب‌شستگی برای سرعت نسبی  $0.95$  آستانه حرکت و عمق‌های نسبی

(ب) بررسی تأثیر رقوم کارگذاری بر حداکثر آب‌شستگی اطراف گروه پایه کج برای بررسی رقوم کارگذاری فونداسیون بر مقدار آب‌شستگی، ۴ تراز کارگذاری مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که به دلیل هندسه متفاوت فونداسیون و پایه‌ها، تراز کارگذاری فونداسیون تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مکانیزم آب‌شستگی و نیز مقدار آن دارد. در نمودارهای شکل ۶ تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی برای شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی نشان داده شده است. در این نمودارها، خط ممتد مربوط به حداکثر آب‌شستگی تک پایه بوده که طبق نتایج پژوهشگران  $2/4$  برابر قطر پایه (معادل  $0.84$  عرض فونداسیون  $(D_*)$  در این پژوهش) است.

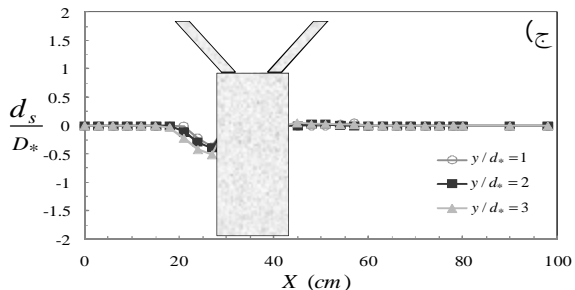
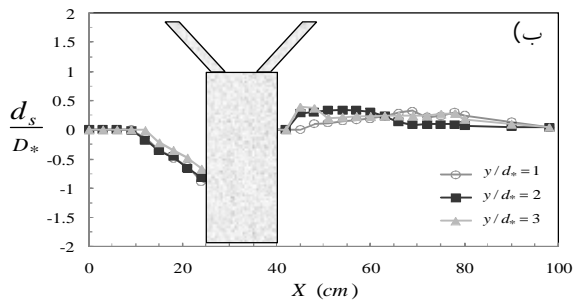
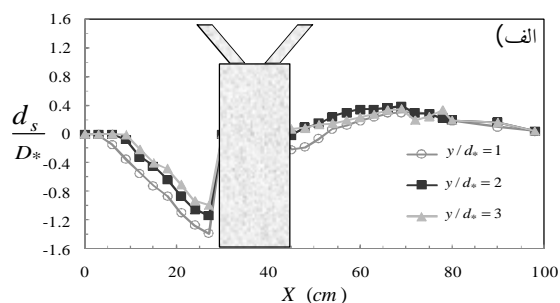
همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، در هر سرعت و عمق نسبی جریان، با افزایش رقوم کارگذاری از  $Z/D_* = -1$  تا  $Z/D_* = 1$ ، حداکثر عمق آب‌شستگی ابتدا تا عمق نسبی کارگذاری  $Z/D_* = -0.5$  کاهش یافته و سپس با افزایش عمق کارگذاری فونداسیون، مقدار آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

مقایسه نتایج نشان داد که حداکثر عمق آب‌شستگی در تراز نسبی  $Z/D_* = 1$  و عمق نسبی  $y/D_* = 1$  رخ می‌دهد. در این تراز به دلیل قرار گرفتن کامل فونداسیون در مقابل جریان حداکثر آب‌شستگی تا  $1.38D_*$  می‌رسد.



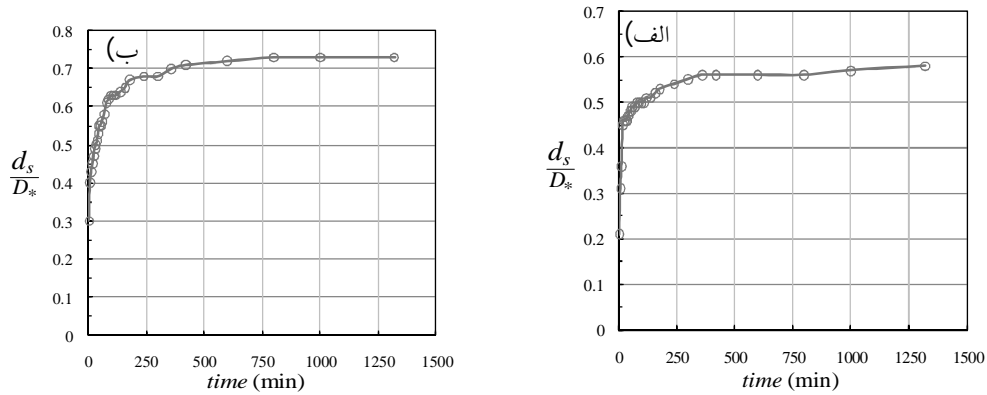
شکل 6- مقایسه تغییرات عمق نهایی آبشستگی برای شرایط مختلف هیدرولیکی و ترازهای کارگذاری فونداسیون، (الف) عمق نسبی  $y/D_* = 1$ ، (ب) عمق نسبی  $y/D_* = 2$  و (ج)  $y/D_* = 3$

۱ تا ۳ در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل علاوه بر داده‌های آزمایشگاهی، حداکثر عمق آبشستگی برای تک پایه برابر با عرض فونداسیون و عرض پایه که برابر با  $2/4$  قطر پایه است، در این شکل نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، به غیر از شرایطی که تراز کارگذاری فونداسیون  $Z/D_* = -0.5$  است، در سایر ترازها و برای کلیه عمق‌های نسبی، حداکثر عمق آبشستگی از تک پایه بیشتر می‌شود. از سوی دیگر به دلیل این‌که حداکثر سرعت نسبی در این پژوهش  $0.95$  آستانه حرکت بود، برای شرایطی که فونداسیون در تراز  $10$  سانتی‌متر بالاتر از بستر بود، حداکثر عمق آبشستگی به  $2/4$  برابر عرض آن که توسط پژوهشگران و برای سرعت تقریباً برابر با آستانه حرکت به دست آمده است، نمی‌رسد. همان طور که در این نمودار مشخص است، برای شرایطی که رقوم نسبی کارگذاری  $Z/D_* = -0.5$  است، حداکثر عمق آبشستگی از حالت تک پایه کمتر است.

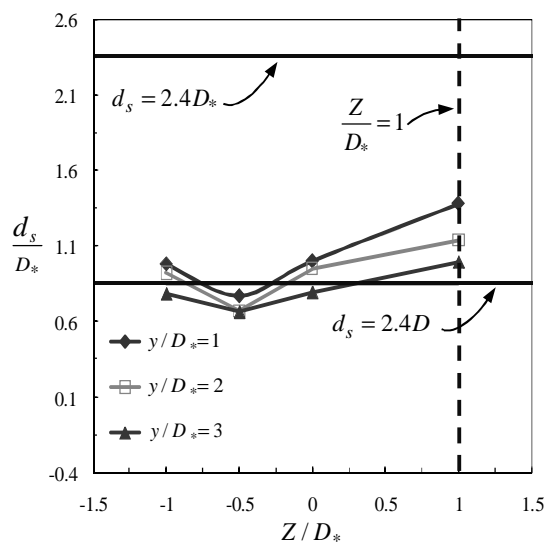


شکل 5- نیمرخ نهایی آبشستگی برای شرایط هیدرولیکی مختلف و رقوم کارگذاری  $Z/D_* = 1$  (الف)  $U/U_c = 0.95$ ، (ب)  $U/U_c = 0.8$ ، و (ج)  $U/U_c = 0.6$



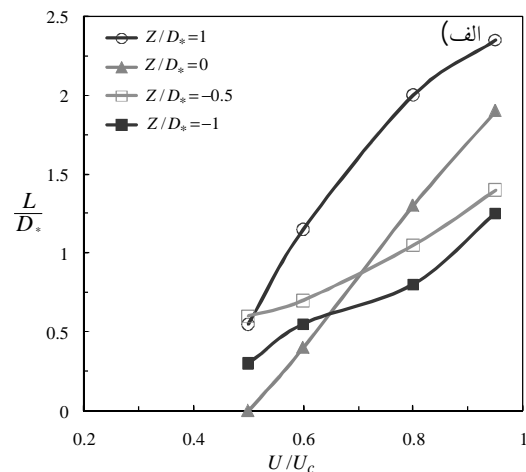
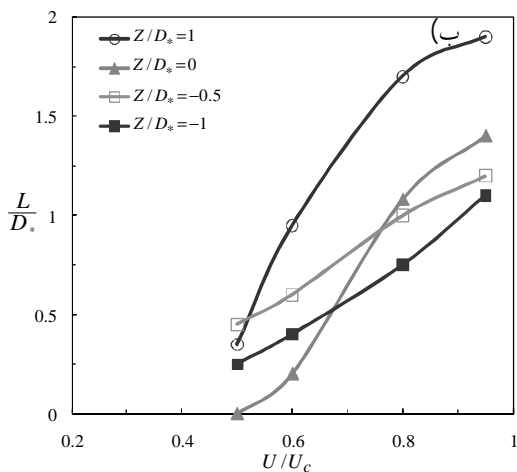


شکل 7- توسعه زمانی آب‌شستگی در مقابل پایه پل در وضعیت رقوم کارگذاری فونداسیون برابر  $Z/D_* = -0.5$ ،  
 الف)  $U/U_c = 0.95$  و  $y/D_* = 1$  و ب)  $U/U_c = 0.8$  و  $y/D_* = 3$



شکل 8- تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی برای سرعت نسبی  $U/U_c = 0.95$  و عمق‌های نسبی مختلف

اطلاع از ابعاد چاله آب‌شستگی برای طراحی محدوده آسیب‌پذیر از نظر فرسایش موضعی ناشی از پایه‌های پل و ایجاد پوشش‌های حفاظتی ضروری است. در شکل 9، تغییرات حداکثر طول چاله آب‌شستگی در مقابل پایه برای شرایط مختلف هیدرولیکی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت جریان طول آب‌شستگی برای کلیه رقوم کارگذاری فونداسیون افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که در هر سرعت و رقوم کارگذاری فونداسیون، با افزایش عمق جریان، طول چاله آب‌شستگی برای کلیه سرعت‌ها و رقوم کارگذاری فونداسیون به طور متوسط ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه‌های انجام شده نشان داد که حداکثر طول آب‌شستگی با افزایش رقوم کارگذاری فونداسیون از  $Z/D_* = -1$  به  $Z/D_* = 1$  افزایش چشم‌گیری یافته و از  $2.3 D_*$  به  $1.25 D_*$  در سرعت نسبی  $0.95$  آستانه حرکت می‌رسد.



شکل 9- تغییرات حداکثر طول آب‌شستگی مقابل پایه برای شرایط مختلف هیدرولیکی و رقوم کارگذاری فونداسیون،  
 الف) عمق نسبی جریان  $y/D_* = 1$  و ب) عمق نسبی جریان  $y/D_* = 3$

## نتیجه‌گیری

بدین وسیله از حوزه معاونت پژوهشی تشکر و تقدیر به عمل می‌آید.

## منابع

1. Abdou M. I. 1993. Effect of sediment gradation and coarse material fraction on clear water scour around bridge piers. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University. Fort Collins, CO. 205 pp.
2. Breusers H. N. C. and Raudkivi A. J. 1991. Scouring. A. A. Balkema Rotterdam, Brookfield. 143 pp.
3. Chiew Y. M. and Melville B. W. 1987. Local scour around bridge pier, Journal of Hydraulic Research. 25(1):15-26.
4. Jones J. S. Kilgore R. T. and Misitichelli M. P. 1992. Effect of footing location on bridge pier scour. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 118(2):280-290.
5. Kothyari U. C. Grade R.J. and Ranga Raju K. G. 1992. Temporal variation of scour around circular bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 118(8):1091-1106.
6. Melvill B. W. and Chiew Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. J. Hyd.Eng. ASCE. 125(1):59-65.
7. Melville B. W. and Raudkivi A. J. 1996. Effect of foundation geometry on bridge pier scour, Journal of Hydraulic Engineering. 122(4):203-209.
8. Melville B. W. and Sutherland A. J. 1988. Design Method for Local Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 114(10):1210-1226.
9. Oliveto G. and Hager W. H. 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 128(9):811-820.
10. Parola A. C. and Jones J. S. 1989. Sizing Riprap to Protect Bridge Piers From Scour. Transportation Research Record. 2(1290):276-279.
11. Raudkivi A. J. and Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 109(3):339-350.
12. Vittal N. Kothyari U. C. and Haghigat M. 1994. Clear-water scour around bridge pier group. J. Hyd. Eng. ASCE. 120(11):1309-1318.

یکی از مباحث مهم در مهندسی رودخانه، مطالعه اندرکنش سازه‌های تقاطعی نظیر پل‌ها با رودخانه است که پیامد آن وقوع آب‌شستگی در مجاورت این سازه‌ها است. در پژوهش حاضر اثر رقوم کارگذاری فونداسیون و شرایط مختلف هیدرولیکی بر حداکثر عمق آب‌شستگی در اطراف گروه پایه کج بررسی شد.

بررسی نتایج نشان داد که رقوم کارگذاری فونداسیون تأثیر معنی‌داری بر آب‌شستگی دارد. تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به افزایش رقوم کارگذاری ( $Z/D_*$ ) از ۱- تا ۱، نشان داد که به دلیل قرار گرفتن فونداسیون در مقابل جریان، مقدار حداکثر آب‌شستگی به طور متوسط برای کلیه سرعت‌ها و عمق‌های نسبی ( $U/U_c$ ، ۰/۹۵ تا ۰/۵ و  $y/D_*$  ۱ تا ۳)، ۲۴ درصد افزایش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد در کنار تأثیر چشمگیر سرعت جریان بر حداکثر عمق آب‌شستگی، عمق نسبی نیز تأثیر معنی‌داری بر آن دارد به‌گونه‌ای که با کاهش عمق نسبی از  $y/D_* = 3$  به  $y/D_* = 1$ ، مقدار آب‌شستگی ۲۸ درصد افزایش می‌یابد.

مقایسه‌های انجام شده در رابطه با تأثیر توام پایه و فونداسیون نشان می‌دهد که در شرایطی که فونداسیون پایین‌تر از حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای تک پایه قرار داده شود، مقدار آب‌شستگی در گروه پایه کج از حالت تک پایه بیشتر بوده که این موضوع به دلیل تأثیر توام دو پایه و نیز کج‌شدگی آن به سمت بالادست است. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب فونداسیون در زیر بستر و بالاتر از حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای تک پایه، مقدار آب‌شستگی کاهش می‌یابد.

## سپاس‌گزاری

هزینه‌های انجام این پژوهش از محل گرنت پژوهشی دانشگاه گیلان و طرح پژوهشی مربوطه تأمین شده است.