

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر زاویه استقرار گروه پایه‌ها بر روی فونداسیون بر مقدار آبخستگی اطراف پایه پل

مهدی اسمعیلی ورکی*^۱، سیده سمیرا سعادت‌ی پاجه‌کناری^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۳

^۱ استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه منابع طبیعی و کشاورزی ساری

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: esmaeili.varaki@yahoo.com

چکیده

با قرارگیری پایه پل در مقابل جریان گردابه‌هایی در مقابل آن شکل گرفته که در نتیجه فعالیت آن مواد بستر پیرامون پایه فرسایش یافته و چاله آبخستگی شکل می‌گیرد و در صورت کافی نبودن عمق پی و شمع‌های پایه پل، شکست پل را به دنبال خواهد داشت. در تحقیق حاضر تأثیر زاویه‌های مختلف استقرار گروه پایه‌ها بر ابعاد چاله آبخستگی در شرایط مختلف هیدرولیکی و رقوم کارگذاری فونداسیون به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. گروه پایه‌های مورد بررسی از دو پایه مستطیلی که با زاویه‌های مختلف (قائم، ۲۸، ۳۸ و ۴۵) بر روی فونداسیونی مستطیلی نصب گردید، تشکیل شده بود. آزمایش‌ها در دو سرعت نسبی متفاوت (نسبت سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت ۰/۹۵ و ۰/۸) و سه رقوم نسبی مختلف کارگذاری فونداسیون (فاصله روی فونداسیون تا سطح بستر نسبت به عرض آن برابر با ۱-، ۰/۵- و صفر) انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که به‌غیر از تراز نسبی کارگذاری فونداسیون صفر که سطح‌رویی فونداسیون نقش طوقه را ایفا می‌نماید و در این تراز، کمینه عمق آبخستگی در شرایط کارگذاری پایه‌ها به صورت قائم رخ می‌دهد، در سایر ترازهای کارگذاری فونداسیون و از میان زاویه‌های مختلف مورد بررسی، مقدار بیشینه و کمینه عمق آبخستگی به ترتیب در زاویه‌های ۲۸ و ۳۸ درجه رخ می‌دهد. مقایسه نتایج بیشینه طول آبخستگی نشان داد که روند تغییرات این پارامتر مشابه با بیشینه عمق آبخستگی هست.

واژه‌های کلیدی: آبخستگی، رقوم کارگذاری فونداسیون، زاویه استقرار پایه، گروه پایه‌ها

Investigating Experimentally the Effect of Installation of Piers Group on Foundation on Scour Depth Around Bridge Piers

M Esmaili Varaki*¹, SS Saadati Pacheh Kenari²

Received: 16 August 2014 Accepted: 3 May 2015

¹-Assist. Prof., Water Eng. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Guilan, Iran

²-M.Sc. Student, Water Eng. Dept., Univ. of agricultural and natural resource science of Sari, Iran

* Corresponding Author, Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

Abstract

After construction of bridge pier in a river, eddy flow pattern forms around the piers and erosion of bed material and scouring occur, and if foundation depth or piles depth is insufficient, the bridge will be collapsed. In this research, effects of the installation angles of piers group on scour dimensions under different hydraulic conditions and top levels of foundation installation were investigated experimentally. The model of bridge piers group was placed on a rectangular foundation with 3 angles of installation (vertical, degrees of 28, 38 and 45). Experiments were conducted under two different relative velocities (ratio of flow velocity to corresponding inception of motion velocity, 0.8 and 0.95) and three relative levels of foundation (ratio of top level of foundation to width of it, zero, -0.5 and -1). Comparison of the results showed that at zero relative level of foundation, the top level of foundation played as collar and the minimum scour occurred at the vertical installation angle. At the other relative levels of foundation and among the different installation angles of the piers, the angles of 28 and 38 had the maximum and minimum scour depths respectively. Furthermore, variation of the maximum length of scour had a similar trend to the scour depth.

Keywords: Bridge Pier Group, Foundation level, Installation angle, Scour

مقدمه

برخورد به بستر با جریان اصلی ترکیب‌شده 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 گرداب عمل نموده و رسوبات را از کف به سمت بالا حرکت می‌دهد. به عبارت دیگر جهت حرکت این سیستم گردابی رو به بالا هست. بررسی‌ها نشان می‌دهد گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای را در ایجاد حفره آبشستگی اطراف پایه پل دارند (ملویل و ساترلند ۱۹۸۸).

یکی از رایج‌ترین آبشستگی‌های موضعی، آبشستگی اطراف پایه‌های پل بوده که یکی از مباحث مهم در هیدرولیک رسوب بشمار 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 بزرگ که نقش آن‌ها برای حمل‌ونقل و امداد رسانی به مناطق آسیب‌دیده پراهمیت‌تر می‌گردد، خواهد شد.

در اثر برخورد آب به پایه پل به علت کاهش فشار از سطح جریان به سمت بستر، جریان‌های رو به پایین ایجاد می‌شود. این جریان‌های رو به پایین پس از

جوشن‌شده در چاله آبشستگی، کاهش می‌یابد. پژوهش‌های انجام‌شده 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، الیوتو و هگر ۲۰۰۲، لی و استورم ۲۰۰۹).

مطالعات انجام‌شده در خصوص تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان مانند سرعت و عمق بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل نشان داد که تأثیر عمق جریان بر بیشینه 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 هست (رادکیوی و اتما ۱۹۸۳، ملویل و چیو ۱۹۹۹).

امروزه با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال گوناگونی بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به پل‌ها با گروه پایه کج اشاره نمود. در تحقیق حاضر اثر زاویه‌های مختلف کارگذاری گروه پایه به صورت کج‌شدگی و اگر بر روی فونداسیون مستطیلی بر مقدار آبشستگی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و نیز رقوم کارگذاری فونداسیون مورد بررسی قرار گرفت.

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 می‌گردد که آن‌ها را می‌توان به صورت رابطه تابعی زیر نوشت:

$$f_1(y, d_s, D, D_*, D_{50}, z, U, U_c, \rho, \mu, g, \sigma_g, \theta, \beta, t, t_e) = 0 \quad [1]$$

سرعت متوسط جریان و سرعت جریان در شرایط آستانه حرکت، ρ ، چگالی آب، μ ، لزوجت دینامیک، g ، شتاب ثقل، σ_g ، انحراف معیار مصالح رسوبی بستر، θ ، زاویه انحراف پایه‌ها نسبت به راستای قائم و

تاکنون محققان متعددی مسئله آبشستگی پایه‌های پل را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیقات جنبه‌های مختلف از پارامترهای اثرگذار بر آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات انجام‌شده در رابطه با تأثیر پارامترهای هندسی پایه نظیر قطر پایه و یکنواختی سطح مقطع نشان داد که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، بیشینه 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 هست. نتایج تحقیقات نشان داد برای شرایطی که فونداسیون در عمقی کمتر از بیشینه آبشستگی برای تک‌پایه قرار گیرد، بیشینه 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 تک‌پایه افزایش می‌یابد. تحقیقات انجام‌شده حاکی از آن است که با کج‌شدگی پایه در صفحه موازی با جریان و به سمت بالادست، بر مقدار بیشینه آبشستگی افزوده خواهد شد و در صورت تمایل پایه به سمت پایین دست مقدار آبشستگی کاهش می‌یابد (ملویل و ساترلند ۱۹۸۸، بروسر و رادکیوی ۱۹۹۱، جونز و همکاران ۱۹۹۲، ویتال و همکاران ۱۹۹۴، ملویل و رادکیوی ۱۹۹۶، بوزکاز و یلدیز ۲۰۰۴، سیمارو و همکاران ۲۰۱۱، سلیمی ۱۳۸۶، اسمعیلی ورکی و همکاران ۱۳۹۲).

تحقیقات انجام‌شده در رابطه با اثر مشخصات رسوبات بستر نظیر قطر ذرات و یکنواختی بر بیشینه آبشستگی حاکی از آن است که هر چه غیریکنواختی رسوبات بیشتر گردد، مقدار آبشستگی به دلیل ایجاد لایه در این رابطه (y) ، عمق جریان، d_s ، عمق آبشستگی، D ، قطر پایه پل، D_* ، عرض فونداسیون، D_{50} ، قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر است، z ، فاصله بستر جریان تا روی فونداسیون، U و U_c ،

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی و به طول ۸/۶ متر، عرض ۰/۹۲ و عمق ۱ متر که دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف پلکسی‌گلاس بود، انجام شد. به‌منظور تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ که قادر بود دبی سیستم را تا ۷۰ لیتر بر ثانیه تأمین نماید، استفاده گردید (شکل ۱). جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن اندازه‌گیری بالادست شده که در انتهای آن سرریز مثلی جهت اندازه‌گیری دبی جریان نصب شد. سپس جریان با عبور از سرریز وارد مخزن آرام‌کننده پایین‌دست شده و در ادامه وارد کانال می‌گردید. جهت کاهش تلاطم جریان ورودی به کانال و ممانعت از شکل‌گیری جریان‌های عرضی در ورودی کانال، از مستقیم‌سازنده جریان در ابتدای کانال استفاده شد. برای تنظیم عمق جریان در کانال از دریچه پروانه‌ای که در انتهای کانال نصب شده بود، استفاده گردید. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها تنظیم دقیق دبی بسیار حائز اهمیت بود، از یک دستگاه کنترل‌کننده دور موتور برای تنظیم دور الکتروموتور پمپ استفاده گردید که با استفاده از آن امکان تنظیم دقیق دبی جریان با کمینه اتلاف وقت میسر شد. جهت اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل، محل نصب آن ۵ متر بعد از ورودی انتخاب گردید.

در صفحه موازی جریان، β ، زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان، t زمان از شروع آبشستگی و t_e زمان نهایی یا تعادل آبشستگی، هست. با به کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه ۱ را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعد زیر نوشت:

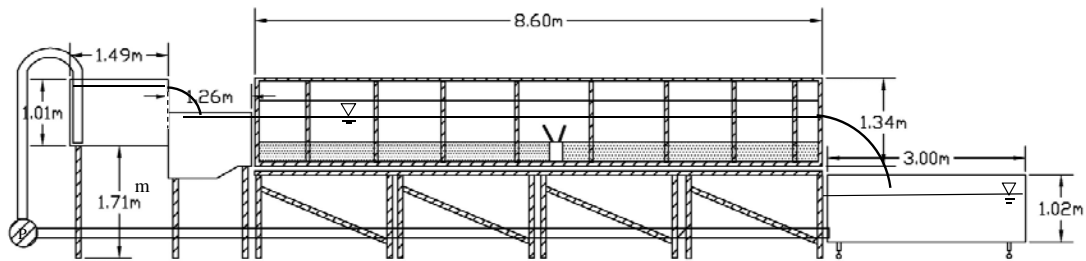
$$f_2\left(\frac{y}{D_*}, \frac{d_s}{D_*}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{D_{50}}{D_*}, \frac{D}{D_*}, \frac{z}{D_*}, \frac{U}{U_c}, Fr, Re, \sigma_g, \theta, \beta, \frac{t}{t_e}\right) = 0 \quad [2]$$

با توجه به شرایط آزمایشگاهی، از میان پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایه پل، پارامتر انحراف معیار هندسی به جهت یکنواختی رسوبات انتخاب شده و زاویه پایه های پل در صفحه قائم، ثابت در نظر گرفته شد. همچنین به جهت اینکه عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از مقدار ۹۱۰۰ بیشتر خواهد بود، لذا از تأثیر این پارامتر صرف نظر نموده و رابطه ۲ به صورت رابطه زیر ساده می‌گردد.

$$\frac{d_s}{D_*} = f_3\left(\frac{y}{D_*}, \frac{U}{U_c}, Fr, \frac{z}{D_*}, \theta, \frac{t}{t_e}\right) \quad [3]$$

رابطه ۳ به‌عنوان یک رابطه پایه‌ای برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

ب) تجهیزات آزمایشگاهی



شکل ۱- طرح کلی فلوم آزمایشگاهی.

نمونه مقیاس ۱/۱۹۰ از پل هشتم اهواز هست. در انتخاب مقیاس سعی شد که ابعاد نهایی پایه به‌گونه‌ای باشد که دیواره‌ها بر روی آبشستگی تأثیری نداشته باشند، طبق نظر رادکوی و اتما (۱۹۸۳) نسبت عرض فلوم به عرض پایه از ۶/۲۵ بیشتر باشد، دیواره‌های

پایه گروه کج مورد بررسی در این تحقیق از دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر که با زاویه‌های قائم، ۲۸، ۳۸ و ۴۵ درجه بر روی فونداسیون مستطیلی شکل به طول و عرض ۱۶ و ۱۰ سانتی‌متر نصب شده بودند، تشکیل شد. ابعاد پایه

این تحقیق دارای قطر ۰/۷ میلی‌متر انتخاب گردید 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 متر از فلوم آزمایشگاهی که محدوده مورد مطالعه برای آبخستگی بود، قرار داده شد. ضخامت مواد بستر با توجه به بیشینه عمق آبخستگی ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد. جهت شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، بالادست و پایین‌دست بازه مورد مطالعه از رسوبات درشت‌دانه که در مرحله الک کردن باقی‌مانده بود، پوشانده شد. در شکل ۲، نمایی از پایه نصب‌شده با زاویه‌های مختلف نشان داده شد.

فلوم تأثیری بر مقدار آبخستگی نخواهند داشت. مقدار این نسبت برای پایه و فونداسیون پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۲۶ و ۱۰ بود. اندازه ذره رسوب یکی از عوامل مؤثر بر عمق آبخستگی است. برای حذف اثر اندازه رسوب بر عمق آبخستگی موضعی، طبق تحقیق ملویل و ساترلند (۱۹۸۸)، نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی باید از ۲۵-۲۰ بیشتر باشد. همچنین رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) اظهار داشتند که جهت ممانعت از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر رسوبات باید از ۰/۷ میلی‌متر بیشتر باشد. رسوبات مورد استفاده در



شکل ۲- نمایی از پایه گروه کج استقرار یافته در تراز کارگذاری ۰/۵- و زاویه‌های مختلف، (الف) ۲۸ درجه، (ب) ۳۸ درجه، (ج) ۴۵ درجه و (د) قائم.

ج) روش انجام آزمایش‌ها

قبل از شروع آزمایش‌های اصلی لازم بود که سرعت آستانه حرکت و نیز زمان تعادل مشخص گردد. بنابراین برای شرایط مختلف عمق و دبی، وضعیت آستانه حرکت به صورت آزمایشگاهی بررسی و در نهایت مقدار متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت

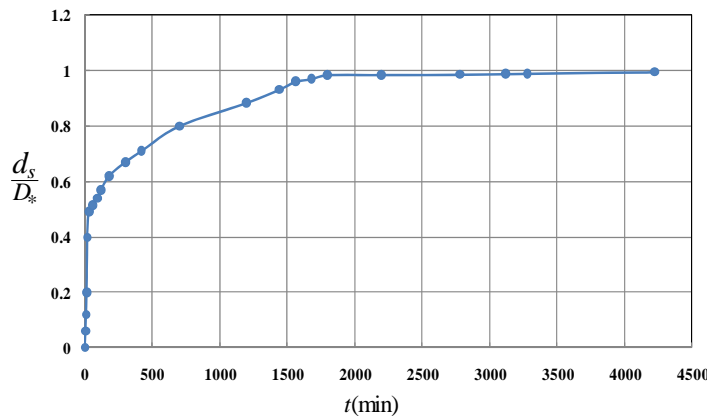
۰/۲۲ متر بر ثانیه تعیین گردید. مقایسه نتایج حاصله با دیگرام شیلدز و روابط تجربی مطابقت مطلوبی را نشان داد. پدیده آبخستگی در اطراف پایه‌های پل فرآیندی زمان‌بر بوده و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هست. محققان معیارهای مختلفی را جهت تعیین زمان تعادل

در هر آزمایش، ابتدا با تعیین دبی جریان برای سرعت و عمق موردنظر، آب به تدریج و به آرامی وارد فلوم شده و سپس بعد از تنظیم دبی، عمق موردنظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار گردید.

تحلیل نتایج

به جهت عدم امکان اندازه‌گیری مستمر عمق آبشستگی در طول زمان ۲۵ ساعت، در کلیه آزمایش‌ها تغییرات آبشستگی به مدت ۷ ساعت که تقریباً معادل وقوع ۸۵ درصد آبشستگی است، به صورت پیوسته اندازه‌گیری و سپس بیشینه عمق آبشستگی بعد از قطع آزمایش در زمان ۲۵ ساعت اندازه‌گیری شد. در مجموع به منظور بررسی تأثیر زاویه گروه پایه، شرایط هیدرولیکی و رقوم کارگذاری بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه پایه کج ۲۴ آزمایش انجام شد که دامنه پارامترهای موردبررسی در جدول ۱ ارائه شد.

پیشنهاد نموده‌اند. ملویل و چیو (۱۹۹۹) اشاره نمودند 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 نمودند که در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر آبشستگی رخ ندهد. در آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش از معیار اتما و رادکیوی (۱۹۸۳) جهت 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 عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۳). با مقایسه نتایج حاصل از آبشستگی‌های اندازه‌گیری شده، زمان تعادل ۱۵۰۰ دقیقه که معادل با ۲۵ ساعت بود، حاصل شد.



شکل ۳- توسعه زمانی آبشستگی برای $U/U_c = 0.95$ و $z/D_s = 0$ و زاویه استقرار پایه‌های ۲۸ درجه.

به بالادست، انحراف خطوط جریان در فاصله بیشتری از محل فونداسیون در بالادست شروع شده و پس از برخورد به پایه متمایل به بستر جریان می‌شوند. بنابراین در پایه‌های کج، گردابه‌های نعل اسبی زودتر از موقعیت فونداسیون به بستر نزدیک شده و در نتیجه سرعت توسعه چاله آبشستگی از طرفین به مقابل فونداسیون در مقایسه با پایه قائم سریع‌تر بودن و در همان لحظات اولیه شروع آزمایش چاله آبشستگی به مقابل فونداسیون می‌رسد. ولی در شرایط قائم بودن

الف) تغییرات توسعه زمانی عمق آبشستگی اطراف گروه پایه

در شکل ۴، تغییرات توسعه زمانی آبشستگی برای زاویه‌های مختلف استقرار پایه در تراز نسبی $z/D_s = 0$ نشان داده شد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در این تراز به دلیل آنکه فونداسیون به‌گونه‌ای نقش طوقه را ایفا می‌نماید، شروع آبشستگی از طرفین فونداسیون آغاز و به بالادست آن ادامه می‌یابد. در شرایط کج بودن پایه‌های پل، به دلیل تمایل پایه جلویی

جریان در مقابل پایه برای شرایط مختلف استقرار پایه‌های پل، آشکارسازی جریان با استفاده از تزریق مواد رنگی صورت گرفت.

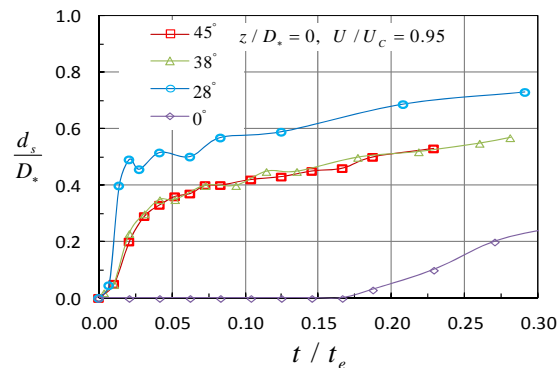
پایه‌ها، سطح‌رویی فونداسیون به صورت طوقه عمل نموده و نقش چشم‌گیری در کاهش اولیه نرخ توسعه زمانی آبشستگی دارد. به‌منظور درک بهتر از الگوی

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی برای مطالعه تأثیر زاویه استقرار بر مقدار آبشستگی.

تراز نسبی قرارگیری فونداسیون (z/D_*)	عمق نسبی جریان (y/D_*)	سرعت نسبی (U/U_c)	دبی جریان ($L S^{-1}$)	زاویه‌های استقرار پایه گروه (degree)
-۱ و -۰/۵، ۰	۱	۰/۸ و ۰/۹۵	۱۱-۵۸	۴۵ و ۳۸، ۲۸، ۰

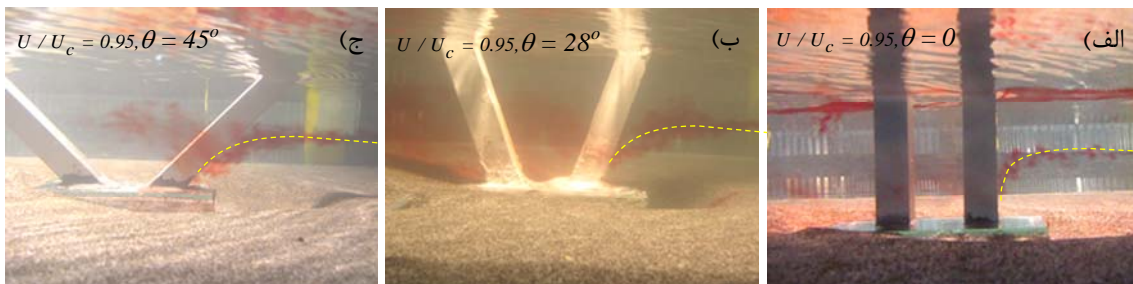
روی فونداسیون، جریان نزدیک شونده به پایه با زاویه تماسی کمتری به سمت بستر متمایل می‌شود. در نتیجه تغییرات کمتری در الگوی جریان و تنش برشی در مجاورت پایه شکل گرفته و منجر به کاهش مقدار آبشستگی می‌شود.

نتایج مربوط به توسعه زمانی آبشستگی در تراز نسبی -۰/۵ در شکل ۶ نشان داده شد. مقایسه نتایج نشان داد که به تدریج با تغییر زاویه استقرار پایه‌ها از حالت قائم به ۴۵ درجه سرعت توسعه آبشستگی کاهش می‌یابد. با وجود این با رسیدن عمق آبشستگی بر روی فونداسیون، توسعه عمق آبشستگی متوقف می‌گردد.



شکل ۴- توسعه زمانی آبشستگی برای سرعت نسبی ۰/۹۵ و $z/D_* = 0$ ، و عمق نسبی ۱.

در شکل ۵ نمایی از الگوی جریان برای پایه‌های قائم، ۲۸ و ۴۵ درجه نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش زاویه استقرار پایه پل بر



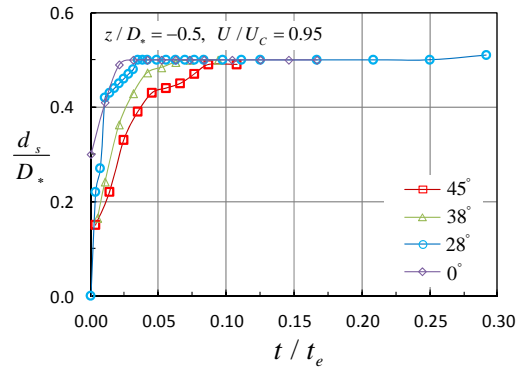
شکل ۵- آشکارسازی جریان نزدیک شونده به گروه پایه‌ها برای زاویه‌های ۴۵، ۲۸ درجه و قائم.

نسبت به دو زاویه دیگر دارد. در شکل ۸، الگوی جریان نزدیک شونده به پایه‌ها برای شرایط مذکور ارائه شد. شبیه‌سازی الگوی جریان نزدیک شونده به پایه پل حاکی از آن است که با کج شدگی پایه به سمت بالادست، زاویه برخورد جریان به پایه پل کاهش یافته و

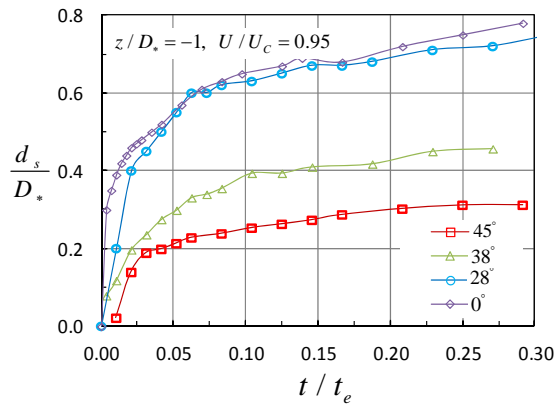
مقایسه نتایج مربوط به توسعه زمانی آبشستگی در تراز نسبی -۱ در شکل ۷ نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقدار لحظه‌ای عمق آبشستگی برای زاویه‌های قائم و ۲۸ درجه اختلاف چشمگیری

برشی ناشی از کج شدگی پایه بالادست نسبت به زاویه های ۲۸ درجه و قائم، کمتر شود. در نتیجه مقدار آبشستگی در زوایای ۲۸ و ۴۵ درجه نسبت به دو زاویه مذکور کمتر هست.

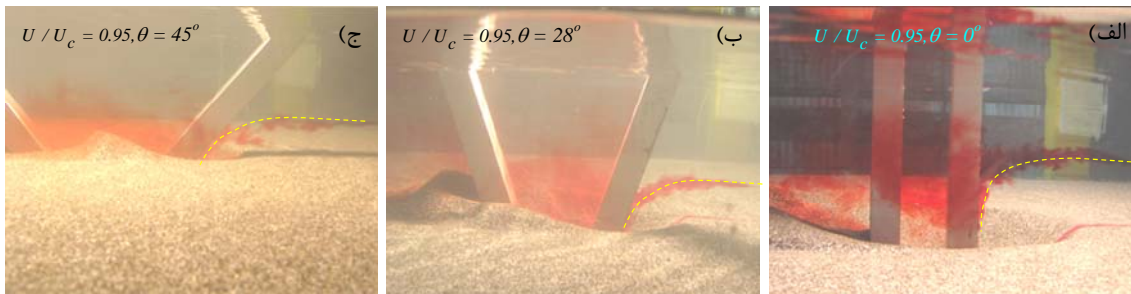
در نتیجه انحنای خطوط جریان نزدیک شونده کاهش محسوسی می یابد بنابراین از شدت گرادیان های سرعت در مجاورت پایه پل کاسته شده و قدرت گردابه ها کم می شود. از این رو انتظار می رود که مقدار افزایش تنش



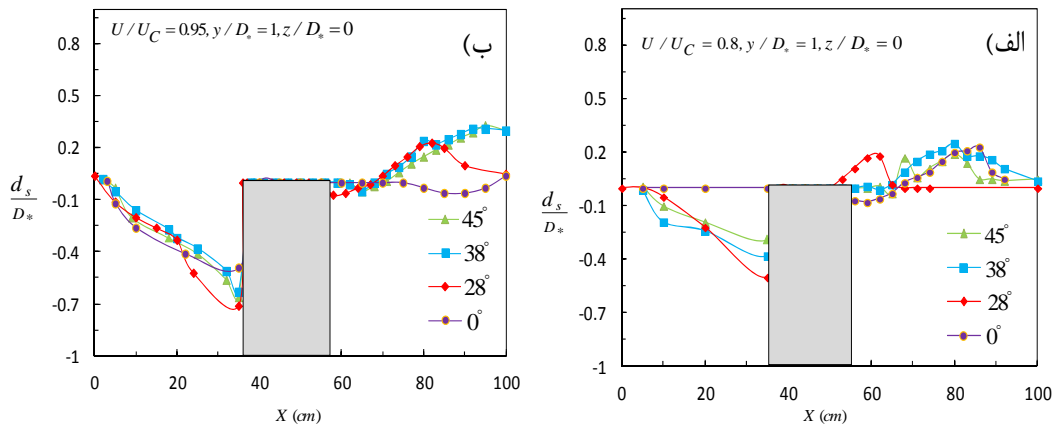
شکل ۶- توسعه زمانی آبشستگی برای سرعت نسبی ۰/۹۵ و $z/D_* = -0.5$ ، و عمق نسبی ۱.



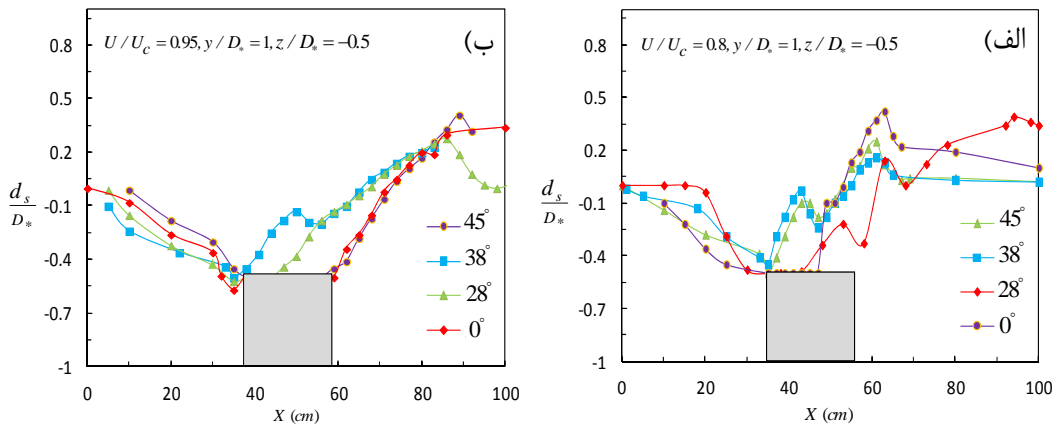
شکل ۷- توسعه زمانی آبشستگی برای سرعت نسبی ۰/۹۵، $z/D_* = -1$ ، و عمق نسبی ۱.



شکل ۸- آشکارسازی جریان نزدیک شونده به گروه پایه ها در تراز کارگذاری $z/D_* = -1$ و برای زاویه های قائم، ۲۸ و ۴۵ درجه.



شکل ۹- نیمرخ نهایی آبخستگی برای تراز نسبی کارگذاری فونداسیون $z/D_* = 0$ ،
الف) سرعت نسبی ۰/۸ و ب) سرعت نسبی ۰/۹۵.



شکل ۱۰- نیمرخ نهایی آبخستگی برای تراز نسبی کارگذاری فونداسیون $z/D_* = -0.5$ ،
الف) سرعت نسبی ۰/۸ و ب) سرعت نسبی ۰/۹۵.

در سرعت نسبی ۰/۸ و ۰/۹۵ آستانه حرکت افزایش می‌دهد.

ارزیابی نتایج آبخستگی در تراز کارگذاری $z/D_* = -0.5$ نشان داد که در این تراز پس از رسیدن آبخستگی به سطح رویی فونداسیون، به تدریج چاله آبخستگی از نظر طول و عرض گسترش یافته ولی توسعه عمقی آن متوقف می‌گردد. از این رو در این تراز کارگذاری فونداسیون، تغییر زاویه تأثیری بر بیشینه عمق آبخستگی نداشت.

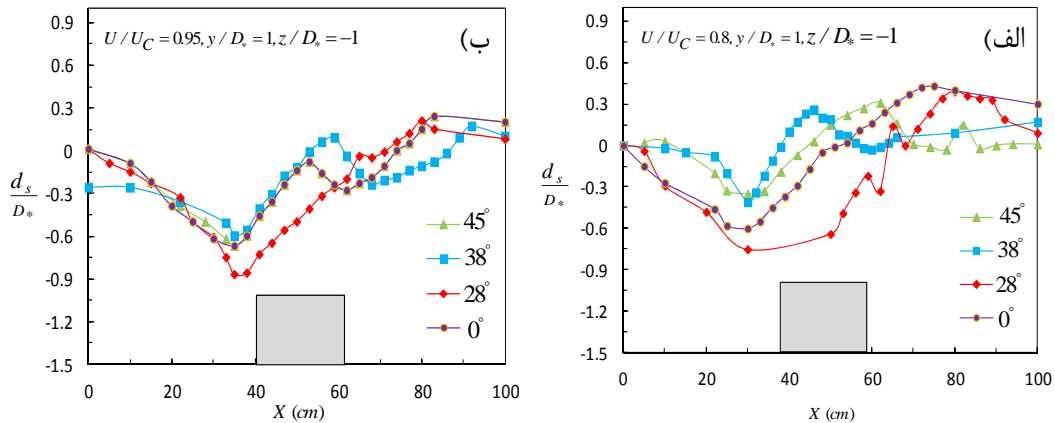
مقایسه نتایج آبخستگی در تراز کارگذاری $z/D_* = -1$ حاکی از آن است که بیشترین مقدار آبخستگی مربوط به زاویه استقرار ۲۸ درجه بوده و

ب) تغییرات بیشینه عمق آبخستگی اطراف گروه پایه

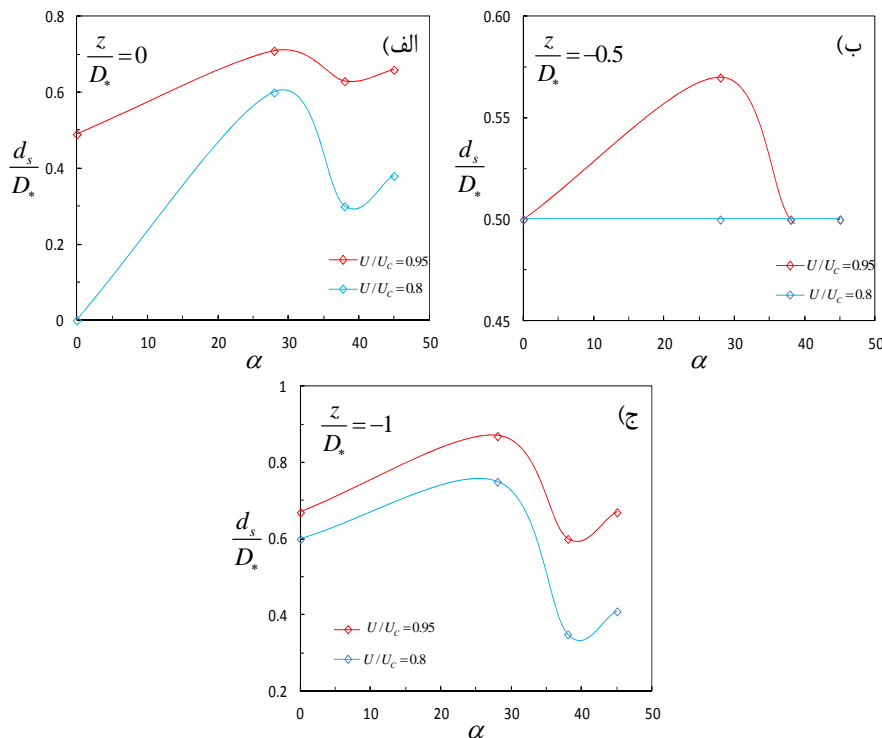
در شکل‌های ۹ تا ۱۱، تغییرات بیشینه عمق آبخستگی برای شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی نشان داده شد. مقایسه نتایج نشان داد که در تراز کارگذاری $z/D_* = 0$ ، نشان داده شده است. همان‌طور که در قبل بیان شد، در این تراز کارگذاری سطح رویی فونداسیون مانند طوقه عمل نموده و از شدت فرسایش می‌کاهد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که تغییر زاویه استقرار پایه از قائم به مایل، مقدار بیشینه عمق آبخستگی را به‌طور متوسط ۳۶ و ۴۳ درصد به ترتیب

به تدریج با افزایش زاویه به ۴۵ درجه مقدار بیشینه عمق آبشستگی به طور متوسط ۵۳ و ۳۱ درصد به ترتیب در سرعت نسبی ۰/۹۵ و ۰/۸ آستانه حرکت کاهش می یابد. در شکل های ۱۲ و ۱۳، تأثیر تغییر زاویه استقرار پایه بر بیشینه عمق و طول آبشستگی نشان داده شد. مقایسه نتایج نشان داد که به غیر از تراز کارگذاری

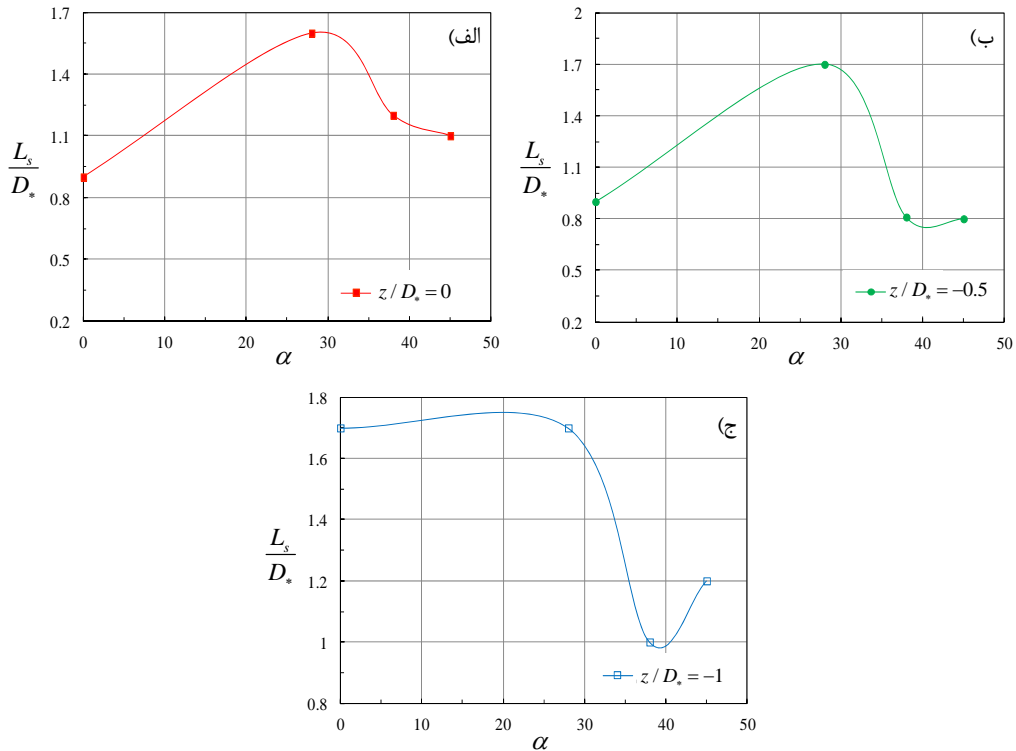
می نماید و در این تراز کمترین مقدار آبشستگی در شرایط استقرار پایه به صورت قائم شکل می گیرد، در سایر ترازها، زاویه استقرار پایه های ۳۸ درجه منجر به کمترین مقدار آبشستگی و زاویه ۲۸ درجه بیشترین مقدار آبشستگی می گردد.



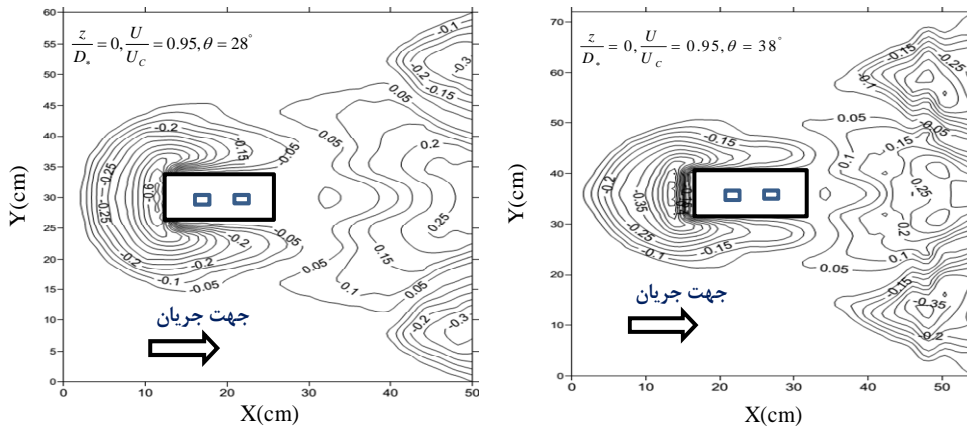
شکل ۱۱- نیمرخ نهایی آبشستگی برای تراز نسبی کارگذاری فونداسیون $z/D_* = -1$ ، الف) سرعت نسبی ۰/۸ و ب) سرعت نسبی ۰/۹۵.



شکل ۱۲- تأثیر زاویه استقرار پایه بر روی فونداسیون بر بیشینه عمق آبشستگی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و تراز کارگذاری فونداسیون، الف) تراز نسبی ۰، ب) تراز نسبی ۰/۵- و ج) تراز نسبی ۱-.



شکل ۱۳- تأثیر زاویه استقرار پایه بر روی فونداسیون بر بیشینه طول آبخستگی تحت شرایط سرعت نسبی ۰/۹۵ و تراز کارگذاری فونداسیون، الف) تراز نسبی ۰، ب) تراز نسبی ۰/۵- و ج) تراز نسبی ۱-.



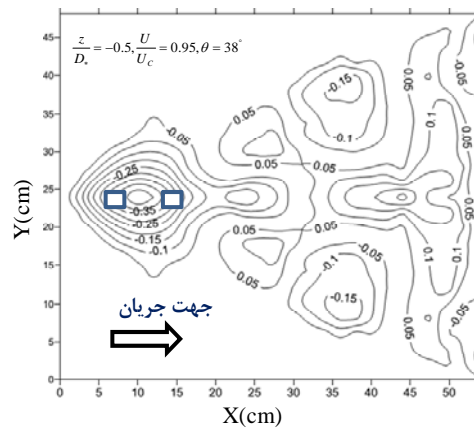
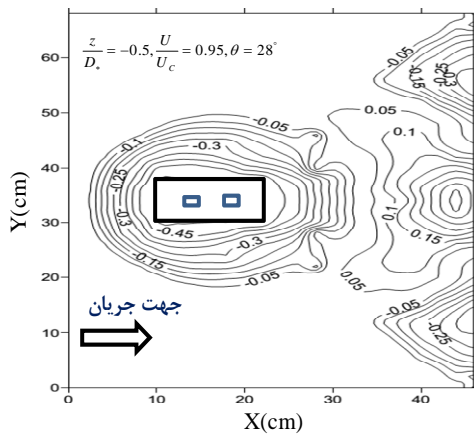
شکل ۱۴- تغییرات توپوگرافی بستر برای تراز نسبی صفر.

کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج مربوط به $z/D_s = -1$ به بیشینه طول آبخستگی نشان داد روند تغییرات بیشینه این پارامتر مشابه با بیشینه عمق آبخستگی هست. در این شرایط نیز با افزایش زاویه از ۲۸ به ۳۸ درجه در سرعت نسبی ۰/۹۵، بیشینه طول آبخستگی در ترازهای

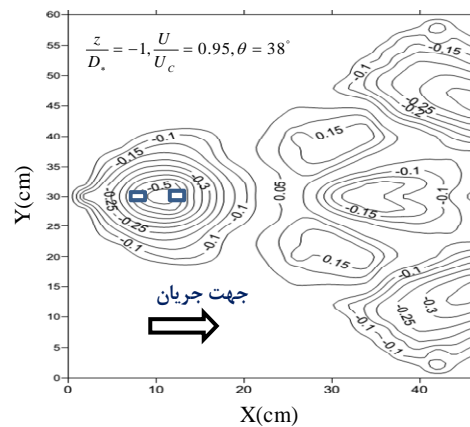
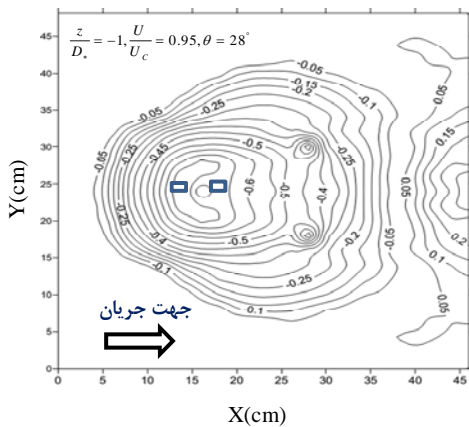
تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش زاویه استقرار پایه از ۲۸ به ۳۸ درجه، بیشینه عمق آبخستگی به میزان ۱۱ و ۵۰ درصد در سرعت‌های نسبی ۰/۹۵ و ۰/۸ برای تراز کارگذاری $z/D_s = 0$ و ۱۱ و ۵۰ درصد در سرعت‌های نسبی ۰/۹۵ و ۰/۸ برای تراز کارگذاری

شد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در کلیه شرایط هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی، ابعاد چاله آبستنگی برای گروه پایه با زاویه ۲۸ درجه کمترین مقدار هست.

نسبی صفر، ۰/۵- و ۱- به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۴۲ درصد کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶، خطوط تران آبستنگی برای زاویه های ۲۸ و ۲۸ درجه که دارای بیشترین و کمترین مقدار آبستنگی است، نشان داده



شکل ۱۵- تغییرات توپوگرافی بستر برای ترانز نسبی ۰/۵-



شکل ۱۶- تغییرات توپوگرافی بستر برای ترانز نسبی ۱-

در هر زاویه استقرار تأثیر قابل توجهی بر بیشینه عمق آبستنگی دارد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که در کلیه زاویه های کارگذاری پایه‌ها، کمینه آبستنگی در شرایطی رخ می‌دهد که فونداسیون در زیر بستر و در ترانز نسبی ۰/۵- کار گذاشته شود. در این شرایط مقدار متوسط عمق آبستنگی برای زاویه های مختلف ۲۵ درصد نسبت به ترانز کارگذاری صفر و ۳۶ درصد نسبت به ترانز نسبی ۱- کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج مربوط به تغییر زاویه استقرار پایه‌ها نشان داد که زاویه های ۲۸ و ۲۸ درجه به ترتیب دارای کمترین و

نتیجه‌گیری کلی

یکی از مباحث مهم در مهندسی رودخانه، مطالعه اندرکنش سازه‌های تقاطعی نظیر پل‌ها با رودخانه هست که پیامد آن وقوع آبستنگی در مجاورت این سازه‌ها است. امروزه با توسعه فناوری‌های ساخت پل‌ها، شاهد تنوع بیشتری در شکل هندسی پایه پل می‌باشیم. در تحقیق حاضر اثر زاویه قرارگیری پایه، رقوم کارگذاری فونداسیون و شرایط مختلف هیدرولیکی بر بیشینه عمق آبستنگی در اطراف گروه پایه کج مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان ترانز کارگذاری فونداسیون

عمق آبشستگی نداشت. ارزیابی نتایج آبشستگی در تراز کارگذاری $z/D_* = -1$ ، به‌طور متوسط با تغییر زاویه از حالت قائم و ۲۸ درجه به ۳۸ درجه، مقدار بیشینه عمق آبشستگی عمق آبشستگی از ۲ برابر قطر پایه به ۱/۱ برابر آن کاهش یافت. مقایسه نتایج بیشینه طول آبشستگی حاکی از آن بود که در کلیه ترازهای کارگذاری فونداسیون، مقدار بیشینه طول نسبی آبشستگی در زاویه ۲۸ درجه و به‌طور متوسط ۱/۷ برابر عرض فونداسیون شکل گرفت.

بیشترین مقدار عمق آبشستگی هست. ارزیابی نتایج نشان داد که در $z/D_* = 0$ ، با تغییر زاویه استقرار پایه از قائم به زاویه ۳۸ درجه، مقدار بیشینه عمق آبشستگی از ۱/۴ برابر قطر پایه به ۱/۸ قطر پایه افزایش می‌یابد. در تراز کارگذاری $z/D_* = -0.5$ ، پس از رسیدن آبشستگی به سطح‌رویی فونداسیون، به‌تدریج چاله آبشستگی از نظر طول و عرض گسترش‌یافته ولی توسعه عمقی آن متوقف می‌گردد. از این‌رو در این تراز کارگذاری فونداسیون، تغییر زاویه تأثیری بر بیشینه

منابع مورد استفاده

اسمعیلی ورکی م، موسی پور س و حاتم جعفری م، ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تاثیر عوامل هندسی بر مشخصات آبشستگی اطراف گروه پایه‌های کج با فونداسیون. مجله پژوهش آب ایران، سال ۷، شماره ۱۳، صفحه‌های ۱۴۱ تا ۱۵۱.

سلیمی س، واقفی م و قدسیان م، ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی آبشستگی موضعی ناشی از پایه کج استوانه‌ای شکل. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن‌ماه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

- Bozkus Z and Yaldiz O, 2004. Effects of inclination of bridge piers on scouring depth. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 130(8): 827-832.
- Breusers N C and Raudkivi A J, 1991. *Scouring*. A A Balkema, Rotterdam, Brookfield, 143 p.
- Jones JS Kilgore RT and Misticelli M P, 1992. Effect of footing location on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 118(2): 280-290.
- Kothiyari UC, Grade RJ and Ranga Raju KG, 1992. Temporal variation of scour around circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 118(8): 1091-1106.
- Lee S and Sturm TW, 2009. Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 135(10): 793-802.
- Melville BW and Chiew YM, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125 (1):59-65.
- Melville BW and Raudkivi AJ, 1996. Effect of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 122 (4): 203-209.
- Melville BW and Sutherland AJ, 1988. Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 114(10): 1210-1226.
- Oliveto G and Hager WH, 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 128(9): 811-820.
- Raudkivi AJ and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 109(3): 339-350.
- Simarro G Cristina M Fael S and Cardoso AH, 2011. Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 137(9): 1089-1093.
- Vittal N Kothiyari UC and Haghghat M, 1994. Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 120(11): 1309-1318.