

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری سطح گروه پایه بر آبشستگی موضعی در حضور گودال برداشت مصالح رودخانه‌ای

رسول دانشفراز^{۱*}، مریم ستاریان کرج آباد^۲، بابک علی نژاد^۳، مهدی ماجدی اصل^۴

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۴

۱- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

*مسئول مکاتبه، پست الکترونیکی: daneshfaraz@yahoo.com

چکیده

آبشستگی اطراف پایه‌های پل در اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای یکی از عوامل خرابی پل‌ها می‌باشد. لذا این پژوهش بصورت آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل در حضور گودال برداشت مصالح در شرایط هیدرولیکی مختلف پرداخته است. سپس برای نخستین بار در این پژوهش سطح پایه‌ها با استفاده از شن جهت کاهش آبشستگی مسلح گردید. نتایج حاصل از مقایسه عمق آبشستگی گروه پایه‌های مسلح با صاف نشان داد که اعمال زبری سبب کاهش حداکثری عمق آبشستگی در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۱ گردید. پس از آن حداکثر کاهش عمق آبشستگی در سایر آزمایش‌ها مربوط به دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۱ با ۶۴/۲۹ درصد کاهش بود. همچنین نتایج این بخش نشان داد که اعمال زبری شن بر سطح پایه‌ها سبب کاهش نرخ آبشستگی و افزایش زمان تعادل گردید. نتایج توسعه زمانی عمق آبشستگی نشان داد که در مدل پایه صاف عمق آبشستگی در اثر افزایش عدد فرود و دبی جریان افزایش یافت لیکن در پایه مسلح عمق آبشستگی با افزایش عدد فرود افزایش یافته و با افزایش دبی افزایش نیافت. بررسی وسعت آبشستگی اطراف پایه‌ها نشان داد که وسعت آبشستگی با افزایش عدد فرود افزایش یافته و با افزایش دبی کاهش یافت. نتایج حاصل از این پژوهش و مقایسه آن با پژوهش‌های دیگر بیانگر مناسب بودن اعمال زبری شن در سطح پایه‌ها جهت کاهش آبشستگی بود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، برداشت مصالح رودخانه‌ای، دبی جریان، عدد فرود، گروه پایه پل

Investigation Experimentally the Effect of Roughness of Pile Group on Local Scouring at Presence of Harvesting of River Material Pit

R Daneshfaraz^{1*}, M Sattariyan², B Alinejad³, M Majedi Asl⁴

Received: September 1, 2020 Accepted: March 14, 2021

1- Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

2- M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

3- Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

4- Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

*Corresponding Author, Email: daneshfaraz@yahoo.com

Abstract

Scouring around the bridge piers due to harvesting of river materials is one of the causes of bridge damage. Therefore, this study has investigated the scouring around the bridge pile group in the presence of material harvesting in several hydraulic conditions. For the first in this study, the surface of the piers was reinforced using gravel to reduce scouring. Comparing the results of scour depth of the reinforced model with simple model showed that the using of roughness caused maximum reduction of the scour depth in the flow of 45 L s^{-1} and Froude number of 0.1. After that, the maximum reduction of scour depth in other experiments was 64.29% and related to the flow of 15 L s^{-1} and the Froude number of 0.1. Also, the results of this section showed that the using of gravel on the surface of the piers reduced the rate of scouring and increased the equilibrium time. The results of time development of scour depth showed that in simple model the scour depth increased due to the increase in both Froude number and flow discharge, but in the reinforced model the scour depth increased with increasing Froude number but did not increase with increasing flow discharge. Evaluating of the scour area around the piers showed that the scour area increased with increasing Froude number and decreased with increasing flow discharge. The results of this study and its comparison with other studies showed the appropriateness of gravel roughness at the surface of piers to reduce scour.

Keywords: Bridge pile group, Flow discharge, Froude number, Local scouring, River material harvesting

مقدمه

آبشستگی موضعی اطراف پایه پل در بستر رودخانه می‌شود. (صالحی نیشابوری و قدسیان ۲۰۰۵). با توجه به افزایش جمعیت و نیاز به ساخت پل‌های عریض، برخی از محققان در طراحی پایه‌های پل از مفهوم گروه پایه استفاده کرده‌اند. گروه پایه، چند پایه با سطح مقطع کوچکتر است که جایگزین پایه اصلی با سطح مقطع بزرگ می‌شود، به نحوی که همان باربری

راحتی دسترسی به مصالح شن و ماسه‌ای با کیفیت در رودخانه‌ها، سبب اقدام به برداشت این مصالح از بستر رودخانه‌ها گردیده‌است. لیکن برداشت مصالح از بستر رودخانه سبب ایجاد تغییرات زیست محیطی، ریخت‌شناسی، اقتصادی و هیدرولیکی اعم از تأثیر در الگوی جریان اطراف پایه‌های پل و تغییر در مکانیسم

پایه اصلی را دارا باشد. مکانیسم آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها پیچیده تر از مکانیسم آبشستگی اطراف پایه منفرد بوده و از چهار عامل اصلی تقویتی، حفاظتی، گردابه‌های برخاستگی و گردابه‌های نعل اسبی به هم فشرده تشکیل شده است. زمانی که پایه‌های پیشین و پسین با هم تداخل آبشستگی داشته باشند، رسوبات شسته شده اطراف پایه‌های پیشین براحتی وارد حفره آبشستگی پایه پایین دستی می‌شوند که سبب تقویت آبشستگی پایه‌های پیشین می‌شوند. عامل حفاظتی به دو طریق رخ می‌دهد، اول هنگامیکه پایه بالادستی حفاظ و مانعی برای پایه پایین دستی در برابر برخورد مستقیم جریان به آن می‌شود و دوم زمانیکه رسوبات شسته شده از پایه بالادستی به داخل حفره آبشستگی پایه پایین دستی ریخته و نمی‌گذارد عمق آبشستگی اطراف آن افزایش یابد. از طرفی منطقه مقابل پایه‌های پایین دستی تحت تأثیر گردابه‌های برخاستگی حاصل از پشت پایه‌های بالادستی قرار می‌گیرد که این عامل پدیده گردابه برخاستگی نامیده می‌شود. حال اگر پایه‌ها در راستای عرض جریان قرار گیرند، فاصله موجود در میان پایه‌ها بصورت تنگ شدگی عمل کرده و گردابه‌های نعل اسبی در میان این پایه‌ها به هم فشرده شده و با قدرت بیشتری سبب آبشستگی اطراف پایه‌ها می‌گردند که به این پدیده نیز گردابه‌های نعل اسبی به هم فشرده می‌گویند.

ژائو و شپارد (۱۹۹۹) پس از انجام پژوهشی در زمینه آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها نتیجه گرفتند که حداکثر عمق آبشستگی در گروه پایه‌ها در پایه‌های ابتدایی رخ می‌دهد. عطایی آشتیانی و بهشتی (۲۰۰۶) تعداد ۱۱۲ آزمایش بر روی گروه پایه‌ها انجام داده و مشاهده کردند که آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها از پروسه‌ی متفاوتی نسبت به آبشستگی تک پایه برخوردار است، بگونه‌ای که فاصله کم میان پایه‌ها سبب تداخل در آبشستگی میان پایه‌ها می‌شود. همچنین آنان نتیجه گرفتند که در محدوده $0.15 < G/D < 2$ (فاصله

میان پایه‌ها: G و قطر پایه: D) رفتار گروه پایه‌ها همانند تک پایه می‌شود. حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) آبشستگی اطراف گروه پایه دو و سه پایه‌ای در حضور طوقه دایره‌ای شکل را بررسی کردند. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که طوقه‌ها نه تنها در کاهش آبشستگی مؤثرند بلکه از لحاظ اقتصادی نیز نسبت به سایر اقدامات متقابل نظیر سنگریزه‌ها، بسیار به صرفه هستند. علاوه براین استفاده از طوقه سبب تاخیر در مکانیسم آبشستگی شده و با افزایش ابعاد طوقه، زمان تعادل نیز افزایش می‌یابد. عقلی (۲۰۱۲) به بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها با بکارگیری توأمان کابل و طوقه پرداخته و نتیجه گرفت که بکارگیری توأمان کابل و طوقه با هم نتایج مطلوب تری نسبت به بکارگیری آنها بصورت جداگانه دارد. رحیمی‌نیا و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر بیرون زدگی زبری‌های سراسری بر روی سطح تک پایه را در کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه پل بررسی کرده و مشاهده کردند که با افزایش اندازه بیرون زدگی زبری‌های سراسری، عمق آبشستگی ۳۴٪ کاهش می‌یابد. بزکوش و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر زاویه قرارگیری گروه پایه‌های پل بر عمق آبشستگی پرداخته و نتیجه گرفتند که استفاده از پایه‌های پل مایل سبب کاهش عمق آبشستگی حداکثر می‌گردد. در زمینه تأثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل مطالعات کمتری انجام شده است. دانشفراز و همکاران (۲۰۱۹ الف) به بررسی آزمایشگاهی اثرات حفره برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای بر روی پایه پل مجاور در در دو دانه بندی ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر و اعداد فرود مختلف پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که در هر دو دانه بندی با کاهش عمق گودال‌ها و عدد فرود، نسبت بی بعد ارتفاع گودال به عمق جریان کاهش و نسبت‌های بی بعد طول و عرض گودال به عمق جریان، افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده کردند که تأثیر حفره برداشت مصالح بر روی آبشستگی اطراف پایه پل بالادست بیش تر از پایه پل پایین دست

می‌باشد. ماجدی اصل و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر برداشت مصالح بر آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل مسلح شده با کابل پرداختند. آنها دریافتند که برداشت مصالح از بالادست گروه پایه باعث کاهش و برداشت از پایین‌دست گروه پایه سبب افزایش عمق آبشستگی حداکثر می‌گردد. ماجدی اصل و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق جداگانه‌ای در اعداد فرود مختلف، مشاهده کردند که با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. دانشفراز و همکاران (۲۰۱۹ ب) بصورت آزمایشگاهی حداکثر عمق و طول انتقال گودال‌های ایجاد شده را تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای در اعداد فرود مختلف را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که زاویه ایستایی مصالح داخل آب، بیشترین تأثیر را در افزایش و نسبت ارتفاع گودال به عمق جریان بیشترین تأثیر را در کاهش طول و عمق آبشستگی گودال دارد. همچنین آنها دریافتند که با افزایش عدد فرود و تنش برشی، نسبت سرعت برشی بحرانی به سرعت جریان افزایش می‌یابد.

با مرور مطالعات انجام شده در زمینه آبشستگی اطراف پایه‌های پل تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای درمی‌یابیم که پرداختن به پدیده آبشستگی اطراف پایه‌های پل و تأثیرات برداشت مصالح رودخانه‌ای بر آن از اهمیت بالایی برخوردار است. مطابق مطالعه صورت گرفته توسط حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) جهت پیشگیری یا به حداقل رساندن آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل دو روش عمده وجود دارد که راهکار اول شامل مسلح‌سازی بستر رسوبی و راهکار دوم ایجاد تغییر در الگوی جریان می‌باشد. در مورد اول، هدف مقابله با فرسایشی بستر با استفاده از مصالحی نظیر سنگریزه بوده و در روش دوم هدف کاهش قدرت گردابه‌های اطراف پایه‌ها توسط انحراف الگوی جریان می‌باشد به نحوی که یا سبب کاهش آبشستگی اطراف پایه شود و یا موجب تشکیل این پدیده در مناطق پایین‌دست پایه‌ها و محلی غیر از

اطراف پایه پل گردد. بدین ترتیب راهکار استفاده شده در این مطالعه جهت کنترل و کاهش آبشستگی اطراف پایه‌های پل، راهکاری مبنی بر روش دوم یا همان انحراف الگوی جریان توسط شن‌های ریز متصل شده در سطح پایه‌ها است. لذا تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبر کردن گروه پایه‌ها در حضورگودال حاصل از برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداخته است. همچنین با دقت در پیشینه تحقیق متوجه می‌شویم که اکثر مطالعات مربوط به گودال و آبشستگی در گروه پایه پل مربوط به استفاده از کابل جهت کنترل آبشستگی می‌باشد. در حالیکه در مطالعه حاضر علاوه بر بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها در حضور گودال برداشت مصالح، برای نخستین بار از زبری شن جهت کاهش آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها استفاده گردیده است. زبر نمودن پایه توسط شن راهکاری نوین، سهل‌الاجرا و مقرون به صرفه از حیث دسترسی راحت به مصالحی از قبیل شن می‌باشد. برخی ویژگی‌های دیگر این پژوهش که باعث تمایز آن از اکثر مطالعات پیشین شده است عبارت از بررسی تأثیر برداشت مصالح بر عمق آبشستگی در بالادست و پایین‌دست پایه‌ها، با بکاربردن مفهوم گروه پایه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل، آنالیز ابعادی به روش پی باکینگهام انجام گرفت. پارامترهای مؤثر در این پژوهش شامل پارامترهای مربوط به سیال، جریان، هندسه کانال، رسوب، پایه، زمان و گودال برداشت مصالح می‌باشد که در معادله ۱ ارائه شده است:

$$f(\rho, d_s, v, g, d_0, V, V_T, u^*, S_0, B, K_a, d_{50}, \rho_s, \sigma_g, D, L_{sx}, L_{sy}, K_r, t_e, t, L, b) = 0 \quad [1]$$

در معادله فوق ρ : چگالی سیال، d_s : عمق آبشستگی، v : ویسکوزیته سینماتیکی، g : شتاب گرانش،

d_0 : عمق اولیه جریان، V : سرعت جریان در بالادست، V_T : سرعت آستانه حرکت ذرات، u^* : سرعت برشی جریان، S_0 : شیب کف کانال، B : عرض کانال، K_a : زبری دیواره کانال، d_{50} : اندازه قطر متوسط ذرات، ρ_s : چگالی رسوب، σ_g : انحراف از معیار استاندارد ذرات، D : قطر پایه، L_{sx} : وسعت طولی آبشستگی، L_{sy} : وسعت عرضی آبشستگی، K_r : زبری سطح پایه‌ها، t_e : زمان تعادل آبشستگی، t : زمان آزمایش، L : طول گودال برداشت مصالح و b : عرض گودال برداشت مصالح می‌باشد. با در نظر گرفتن p ، V و d_0 بعنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بدون بعد بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\frac{d_s}{d_0} = f\left(\frac{V}{\sqrt{gd_0}}, \frac{Vd_0}{v}, \frac{D}{d_0}, \frac{u^*}{V}, \frac{V_T}{V}, S_0, \frac{B}{d_0}, \frac{K_a}{d_0}, \frac{d_{50}}{d_0}, \frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_g, \frac{K_r}{d_0}, \frac{Vt}{d_0}, \frac{Vt_e}{d_0}, \frac{L_{sx}}{d_0}, \frac{b}{d_0}, \frac{L_{sy}}{d_0}, \frac{L}{d_0}\right) \quad [2]$$

با توجه به اینکه شیب بستر، قطر متوسط ذرات رسوب، عرض کانال و سیال مورد استفاده این پژوهش آب و ثابت می‌باشند، لذا پارامترهای S_0 ، $\frac{B}{d_0}$ و $\frac{\rho_s}{\rho}$ قابل چشم‌پوشی هستند. توزیع یکنواخت ذرات رسوبی (دی و همکاران ۱۹۹۵) و ناچیز بودن تأثیر دیواره کانال بر آبشستگی (رادکیوی و اتما ۱۹۸۳) سبب صرف‌نظر کردن از دو پارامتر K_a و σ_g می‌گردد. به دلیل تغییرات ناچیز u^* و V می‌توان از پارامترهای بی‌بعد $\frac{u^*}{V}$ و $\frac{V}{\sqrt{gd_0}}$ نیز چشم‌پوشی کرد (ماجدی اصل و همکاران ۲۰۱۹). پارامتر $\frac{Vd_0}{v}$ معادل عدد بی بعد رینولدز بوده و با توجه به اینکه جریان ایجاد شده در کانال از نوع آشفته می‌باشد، لذا از این پارامتر بی بعد نیز صرف نظر می‌گردد (هندرسون ۱۹۶۶). پس از ساده سازی و تقسیم پارامترهای بی‌بعد بر هم معادله ۲ بصورت زیر خلاصه می‌گردد (دانشفراز و همکاران ۲۰۲۱).

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\frac{K_r}{d_0}, \frac{t}{t_e}, \frac{L_{sx}}{L_{sy}}, \frac{L}{b}, \frac{u^*}{V}, \frac{V_T}{V}, \frac{V}{\sqrt{gd_0}}\right) \quad [3]$$

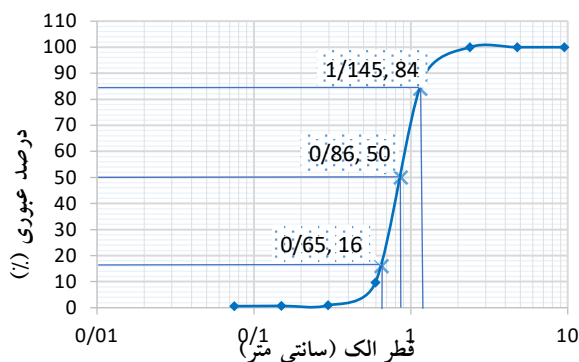
روش انجام آزمایش‌ها

این پژوهش در یک فلوم مستطیلی شکل به طول ۱۳ متر، عرض ۱/۲ متر و عمق ۰/۸ متر، با شیب کف صفر انجام پذیرفت. فلوم مذکور در قسمت ورودی دارای مخزن آرام کننده جریان و در قسمت خروجی دارای آشغالگیر بود. جریان ورودی به فلوم توسط پمپی که توانایی پمپاژ آب به میزان ۷ الی ۵۲ لیتر بر ثانیه را دارد از داخل مخزن اصلی به داخل مخزن آرام‌کننده جریان وارد شده و پس از برخورد با توری تلاطم‌گیر به داخل کانال آزمایش هدایت می‌گردید. مقدار دقیق دبی جریان توسط دستگاه دبی‌سنج التراسونیک قرائت شد. یک بستر رسوبی به طول ۴/۲۵ متر و ارتفاع ۲۲/۶ سانتی‌متر در میان دو کف‌بند شیشه‌ای به طول-های ۲/۵ و ۱/۵ متر ایجاد گردید. گروه پایه‌ها در دو مدل گروه پایه صاف و گروه پایه زبر به تعداد سه عدد در بالادست گودال برداشت مصالح و سه عدد در پایین-دست آن و بصورت پشت سر هم در راستای جریان قرار داده شدند.

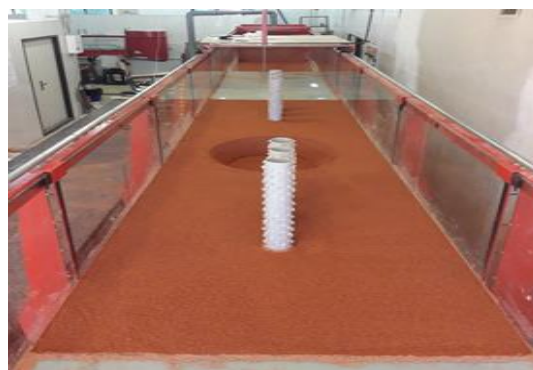
برای انتخاب ابعاد پایه‌ها و رسوبات از محدودیت‌های ارائه شده در مطالعات پیشین استفاده شد. با توجه به محدودیت‌های چو و ملویل (۱۹۸۷) اندازه قطر پایه‌ها نباید از ۱۰ درصد عرض کانال تجاوز کند. همچنین طبق معیار رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) بمنظور حذف اثرات دیواره‌های کانال بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل، نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه بایستی بزرگتر از ۶/۲۵ و نسبت قطر پایه به متوسط ذرات باید بیش از ۲۵-۳۰ و برای پیش‌گیری از تشکیل رپیل در بستر رسوبی، قطر متوسط ذرات باید بیشتر از ۰/۷ میلی‌متر باشد. طبق یافته‌های عطایی آشتیانی و بهشتی (۲۰۰۶) برای اینکه رفتار پایه‌ها در کنار هم مانند گروه پایه باشد، بایستی نسبت فاصله پایه‌ها به قطر پایه در محدوده $2 < G/D < 15/0$ انتخاب گردد (G): فاصله بین پایه‌ها و D : قطر پایه‌ها). در پژوهش حاضر فاصله میان پایه‌ها و قطر آنها بترتیب ۱۲ و ۹ سانتی‌متر و برای جلوگیری از تشکیل رپیل، قطر متوسط رسوبات

۰/۸۶ میلی‌متر با انحراف معیار هندسی $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.32$ و توزیع یکنواخت انتخاب گردید. تصویر بستر

رسوبی و منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.



ب) B



الف) A

شکل ۱- الف: بستر رسوبی، گروه پایه‌های پل زبر و گودال ناشی از برداشت مصالح. ب: منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر. پس از شروع جریان در فلوم، بدلیل تغییرات سریع پروفیل بستر، عمق و طول آبشستگی با فاصله زمانی نیم ساعته و سپس بدلیل کاهش نرخ تغییرات، داده‌ها یک ساعته و دو ساعته توسط اسکنر سه‌بعدی و عمق سنج با دقت ± 1 میلی‌متر برداشت شدند. در انتهای آزمایش برای برداشت داده، ابتدا پمپ خاموش می‌شد و

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها.

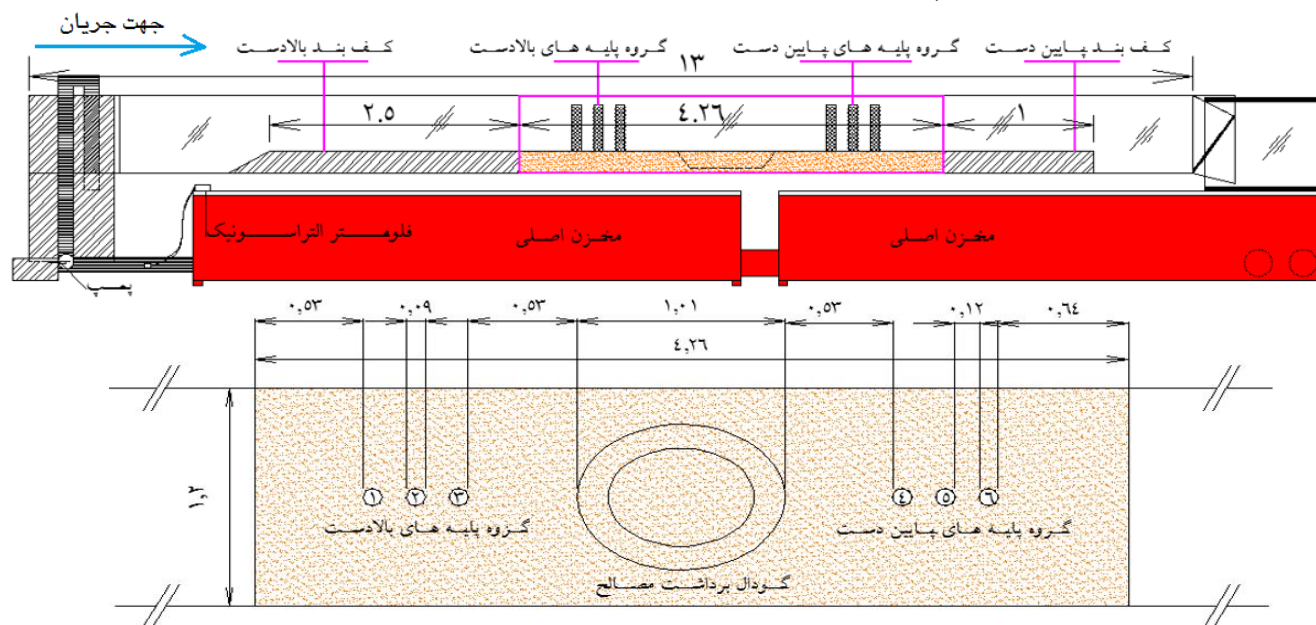
مدل پایه	دبی جریان ($L s^{-1}$)	قطر متوسط ذرات (mm)	قطر پایه (cm)	عدد فرود
صاف	45	0.86	9	0.1
	15	0.86	9	0.1
	15	0.86	9	0.5
زبر	45	0.86	9	0.1
	15	0.86	9	0.1
	15	0.86	9	0.5

در سطح پایه‌های پل بوسیله شن‌های ریز با قطر متوسط ۱ سانتی‌متر با فواصل ۴ سانتی‌متر استفاده گردید. اساس انتخاب قطر شن‌ها تناسب ظاهری ابعاد پایه و شن‌ها بود. پروفیل بستر، عمق آبشستگی و تغییرات وسعت حفره آبشستگی اطراف پایه‌ها بعنوان اطلاعات مورد نیاز این پژوهش برداشت شدند. نتایج داده‌ها در نمودارهایی که توسط برنامه اکسل ترسیم

برای بررسی تأثیر برداشت مصالح، یک گودال بیضی شکل با قطر بزرگ ۱/۰۱ متر (در راستای طولی) و قطر کوچک ۰/۸ متر (در راستای عرضی) در فاصله ۰/۵۳ متر از انتهای گروه پایه‌ها حفر شد. معیار انتخاب ابعاد و شکل گودال با سعی و خطا و بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های شاهد انتخاب گردید. برای کنترل و کاهش آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها از اعمال زبری

گودال برداشت مصالح در شکل ۲ نشان داده شده است.

شده‌اند مرتب سازی و ارائه گردیده و همچنین دیگر شکل‌های آورده شده توسط نرم افزار اتوکد ترسیم شده‌اند. شکل شماتیک مدل، محل پایه‌ها و موقعیت



شکل ۲- شماتیک پایه‌ها، موقعیت چاله و بستر رسوبی.

نتایج و بحث

تأثیر اعمال زبری‌های شن بر سطح پایه‌ها در

کاهش آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها

بلافاصله پس از ایجاد جریان در کانال گردابه‌ها در اطراف پایه‌ها تشکیل و آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها شروع شد. پس از ظاهر شدن حفره آبشستگی در اطراف پایه‌های پل و حرکت رسوبات اطراف پایه‌ها به پایین‌دست، به تدریج از قدرت و حجم گردابه‌ها کاسته شده و سرعت آبشستگی کاهش یافت. در انتهای آزمایش‌ها انتقال رسوبات و وسعت حفره آبشستگی در اطراف پایه‌ها به حدی رسیدند که گردابه‌ها دیگر توانایی انتقال رسوبات به پایین‌دست را نداشتند و رسوبات تنها

در داخل حفره آبشستگی حرکت می‌کردند. این مرحله که با عنوان مرحله تعادل نیز شناخته شده است، بیانگر فرارسیدن زمان اتمام آزمایش بود. برای انتخاب زمان تعادل و اتمام آزمایش‌ها از معیار فاروق و ناگو (۲۰۰۳) استفاده گردید که طبق این معیار هنگامیکه تغییرات عمق آبشستگی پس از گذشت ۱ ساعت کمتر از ۱ میلی‌متر باشد، زمان تعادل آبشستگی فرا رسیده است. نتایج مقایسه‌ای عمق آبشستگی پشت و جلو تمام پایه‌ها در زمان تعادل، برای هر دو مدل پایه صاف و زبر در جدول ۲ ارائه شده‌است. در این جدول مقادیر مثبت بیانگر آبشستگی و مقادیر منفی بیانگر برآمدگی بستر در آن نقاط هستند.

جدول ۲- مقایسه مقادیر عمق آبشستگی (سانتی‌متر) پایه‌ها در مدل پایه صاف و مدل پایه زبر در زمان تعادل (دقیقه).

مدل پایه	دبی (لیتر بر ثانیه)	عدد فرود	موقعیت داده	$V_T V^{-1}$	عمق جریان (متر)	حداکثر عمق آبشستگی در بالادست	حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست	زمان تعادل
	45	0.1	جلو پایه	2.94	0.24	1.7	3.7	420

420	0.5	0.3	0.24	2.94	پشت پایه	0.1	45	صاف
300	1.4	2	0.116	3.65	جلو پایه	0.1	15	
300	-0.3	0.1	0.116	3.65	پشت پایه	0.1	15	
330	7	11.8	0.039	1.1	جلو پایه	0.5	15	
330	3	7.3	0.039	1.1	پشت پایه	0.5	15	
240	-	-	0.24	2.94	جلو پایه	0.1	45	زبر
240	-	-	0.24	2.94	پشت پایه	0.1	45	
300	0.5	0.9	0.116	3.65	جلو پایه	0.1	15	
300	0.2	0.3	0.116	3.65	پشت پایه	0.1	15	
455	8.5	9.3	0.039	1.1	جلو پایه	0.5	15	
455	1.4	4.7	0.039	1.1	پشت پایه	0.5	15	

با توجه به جدول ۲ تأثیر مستقیم اعمال زبری بر کاهش عمق آبشستگی کاملاً مشهود است. مسلح کردن پایه‌ها در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۱، سبب از بین رفتن آبشستگی اطراف پایه‌ها گردیده است، بطوریکه پس از گذشت ۴ ساعت از شروع آزمایش، هیچگونه آبشستگی در بستر رخ نداده است. در بقیه مدل‌ها نیز پس از مسلح کردن سطح پایه کاهش آبشستگی در مقابل و پشت پایه‌ها رخ داده است. علاوه بر ناچیز بودن عمق آبشستگی پس از اعمال زبری بر سطح پایه-ها در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه با عدد فرود ۰/۱، حداکثر کاهش عمق آبشستگی در سایر آزمایش‌ها مربوط به دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۱، با ۶۴/۲۹ درصد کاهش بوده است. علت کاهش آبشستگی پس از اعمال زبری بر سطح پایه‌ها این است که زبری‌های موجود در سطح پایه‌ها سبب ایجاد گردابه‌های ریز در اطراف پایه-ها و انحراف گردابه‌های اصلی می‌گردند که این امر سبب استهلاک قدرت گردابه‌های اصلی شده و موجب کاهش آبشستگی اطراف پایه‌ها می‌شود. مقایسه نتایج عمق آبشستگی بالادست و پایین‌دست گودال برداشت مصالح نشان می‌دهد که عمق آبشستگی گروه پایه‌های بالادست بیشتر از گروه پایه‌های پایین‌دست بوده است. علت این است که جریان آب پس از ورود به فلول آزمایشی و طی کردن آن ابتدا با سرعت بیشتری به گروه پایه‌های بالادست برخورد کرده و در آنها

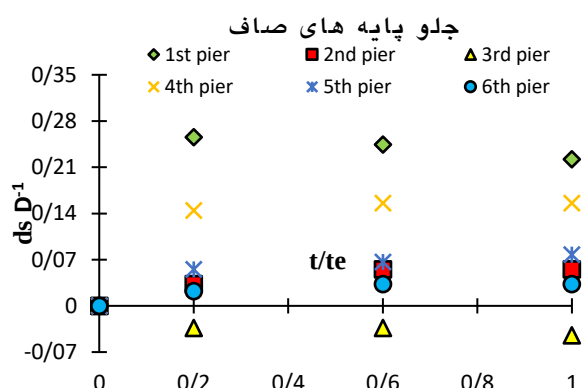
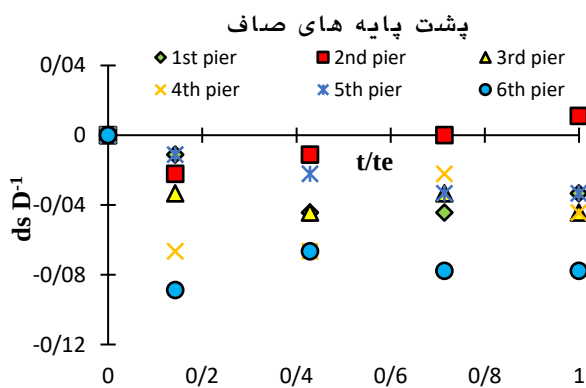
آبشستگی ایجاد می‌کند. اما در اثر برخورد بر موانع بالادست و گذر جریان آب از گودال برداشت مصالح بدلیل افزایش عمق آب، از سرعت جریان کاسته شده و جریان با قدرت کمتری به پایه‌ها برخورد می‌کند که این پدیده سبب کاهش آبشستگی در اطراف گروه پایه‌های پایین‌دست می‌گردد. مطابق جدول حداکثر عمق آبشستگی در گروه پایه بالادست، در مدل صاف و در مقابل پایه شماره ۱ با مقدار ۱۱/۸ سانتی‌متر بود. علاوه بر آنچه در بالا ذکر شد، جدول ۲ نشان می‌دهد که اعمال زبری بر سطح پایه‌ها سبب افزایش زمان تعادل گردیده است. حداکثر افزایش زمان تعادل مربوط به مدل با دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۵ با مدت ۱۲۰ دقیقه می‌باشد. دلیل افزایش زمان تعادل این است که مسلح کردن پایه موجب کاهش نرخ تغییرات آبشستگی می‌گردد. لذا مدت زمان زیادی لازم است تا آبشستگی در بستر به تعادل برسد. بنابراین استفاده از زبری‌های شن روش مناسبی جهت کاهش آبشستگی می‌باشد.

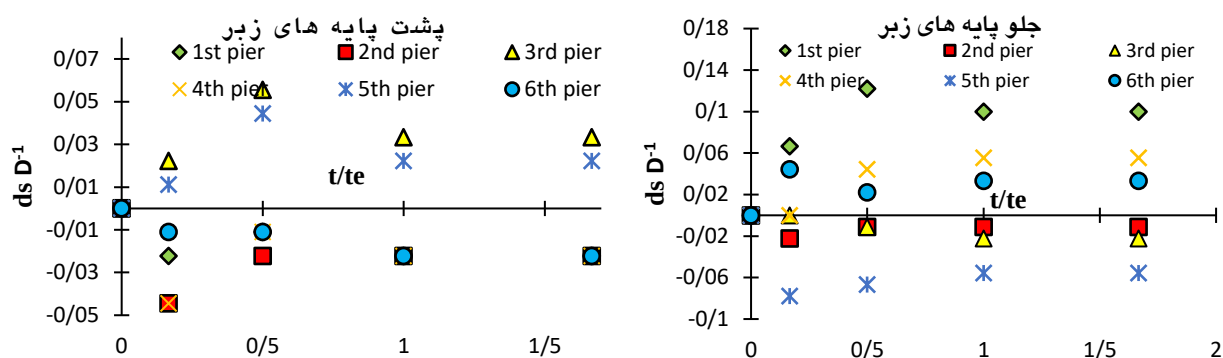
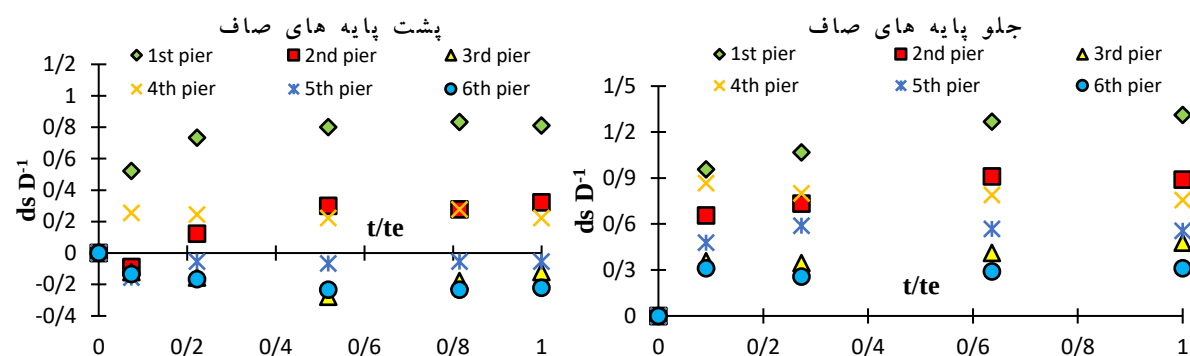
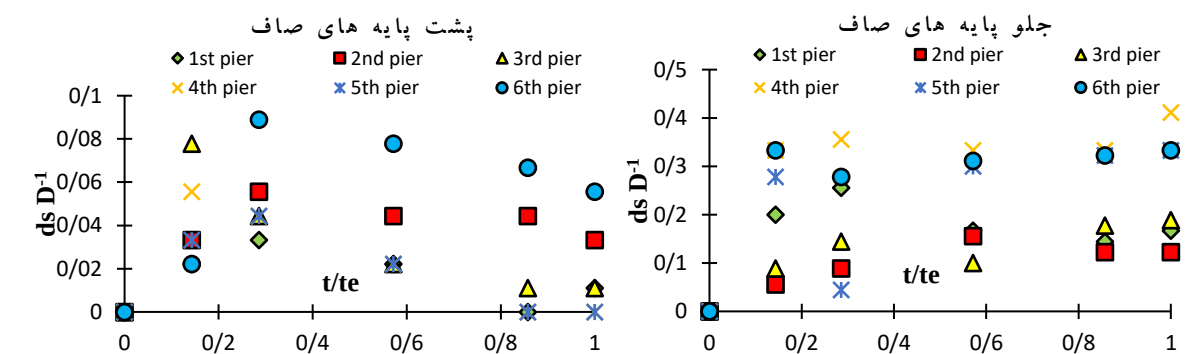
بررسی توسعه زمانی عمق آبشستگی

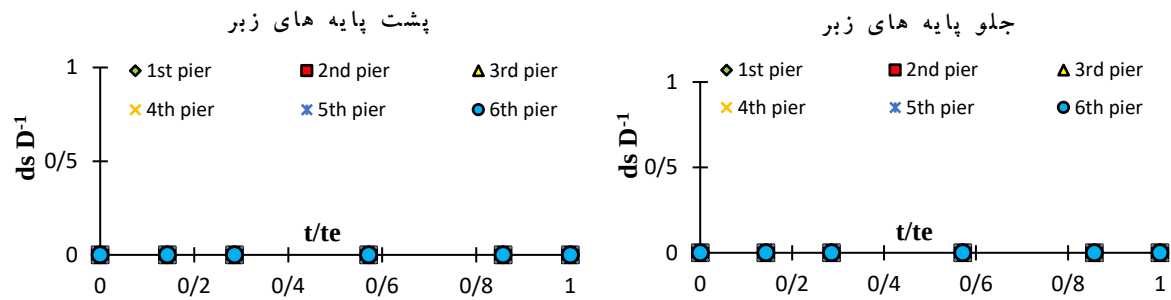
اطراف گروه پایه‌ها در دو مدل پایه صاف و پایه زبر شکل‌های ۳ تا ۵ گسترش زمانی عمق آبشستگی بی‌بعد شده ($d_s D^{-1}$) در مقابل زمان بی‌بعد شده (t/t_e) را برای تمام مدل‌ها (صاف و زبر) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حداکثر عمق آبشستگی در تمام مدل‌ها هم در

موجود در اطراف پایه‌ها را به پایین‌دست منتقل می‌کنند. در صورتیکه زبری‌های موجود در سطح پایه‌ها موجب کاهش قدرت این گردابه‌ها گردیده و در مقابل انتقال رسوبات توسط این گردابه‌ها مقاومت می‌کند، لذا انتقال رسوبات به پایین‌دست با سرعت و حجم کمتری انجام می‌گیرد. مقایسه سه شکل با هم نشان داد که در مدل پایه صاف عمق آبشستگی در اثر افزایش عدد فرود و دبی جریان افزایش یافت اما در پایه مسلح عمق آبشستگی با افزایش عدد فرود افزایش یافت ولی با افزایش دبی افزایش نیافت. بنابراین نتیجه می‌گیریم که تأثیر تغییرات عدد فرود بر آبشستگی بیشتر از تغییرات دبی می‌باشد. دلیل این امر این است که در آزمایش با $Q=15 \text{ L/s}$, $Fr=0.1$ عمق جریان برابر 0.116 سانتی‌متر بوده، در آزمایش $Q=15 \text{ L s}^{-1}$, $Fr=0.5$ عمق آب برابر 0.39 سانتی‌متر بوده و در آزمایش با $Q=45 \text{ L s}^{-1}$, $Fr=0.1$ عمق آب برابر 0.243 سانتی‌متر بوده است. بنابراین به دلیل اینکه در دبی ثابت با افزایش عدد فرود عمق جریان کاهش یافته و در عدد فرود ثابت با افزایش دبی جریان عمق آب افزایش یافته است، لذا انتظار داریم میزان عمق آبشستگی با افزایش عدد فرود در دبی ثابت افزایش یابد. همچنین به دلیل اینکه در مدل زبر با افزایش دبی آبشستگی افزایش نیافته است، لذا نتیجه می‌گیریم که مسلح کردن پایه‌ها توسط شن در عمق‌های بالا نتایج مطلوب تری ارائه می‌دهد.

بالادست و هم در پایین‌دست گودال برداشت مصالح مربوط به مقابل پایه‌های پیشین (پایه‌های شماره ۱ و ۴) بوده است. بعنوان نمونه در دبی 15 لیتر بر ثانیه و عدد فرود 0.1 مشاهده می‌شود که در مقابل پایه اول نسبت d_s/D برابر با 0.22 دارای حداکثر عمق آبشستگی بی‌بعد شده در میان تمام پایه‌ها بوده و پس از آن به ترتیب پایه‌های ۲ و ۳ با مقادیر 0.155 و 0.044 در مقادیر بعدی قرار دارند. دلیل این امر این است که پایه‌های پیشین اولین موانع در مقابل مسیر جریان بوده و پس از برخورد جریان به این پایه‌ها از قدرت جریان و گردابه‌ها کاسته شده و پایه‌های پسین کمتر مورد آبشستگی قرار می‌گیرند. علاوه بر این مشاهده گردید که در هر کدام از پایه‌ها که مقابل آن عمق آبشستگی بیشتر بود، پشت آن کمتر فرسایش یافته است. علت این پدیده این است که جریان پس از طی مسیر فلوام به پایه‌ها برخورد کرده و سپس با ایجاد گردابه‌های نعل اسبی سبب فرسایش رسوبات مقابل پایه گردیده و آن‌ها را به پشت پایه‌ها ریخته است. در تمام مدل‌ها مشاهده گردید که نرخ تغییرات عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های مسلح کمتر از پایه‌های صاف بود. بعنوان نمونه در شکل ۳ مقابل پایه اول در مدل صاف در t/t_e برابر با 0.2 دچار آبشستگی قابل توجهی شده که در مدل زبر این نسبت برابر با 0.5 است. زیرا در مدل صاف گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی رسوبات



شکل ۳- توسعه زمانی آبهسنگى برای $Q=15 \text{ L s}^{-1}$ و $Fr=0.1$ در مدل زیر.شکل ۴- توسعه زمانی آبهسنگى برای $Q=15 \text{ L s}^{-1}$ و $Fr=0.5$ در مدل زیر.


 شکل ۵- توسعه زمانی آبشستگی برای $Q=45 \text{ L s}^{-1}$ و $Fr=0.1$ در مدل زبر.

بعنوان نگهبان برای پایه شماره ۲ عمل کرده و سبب کاهش آبشستگی اطراف این پایه می‌شوند. پایه شماره ۳ علاوه بر اینکه تحت تأثیر پدیده نگهبانی پایه دوم قرار گرفته، بدلیل نزدیک بودن به گودال برداشت مصالح دارای وسعت آبشستگی بیشتری نسبت به پایه ۲ می‌باشد. حداکثر وسعت آبشستگی در پایه‌های بالادست مربوط به پایه اول در مدل صاف با مقدار $6/5$ سانتی-متر در جهت عرضی (x) و 32 سانتی-متر در جهت طولی (y) بود. آنچه در مورد پایه‌های بالادست در شکل اول بحث شد در مورد پایه‌های پایین‌دست نیز صادق است. اما تفاوت‌هایی میان این دو گروه پایه وجود داشته که یکی از این تفاوت‌ها، در نرخ گسترش وسعت آبشستگی اطراف پایه‌ها است. در شکل ۶ الف مشاهده شد که پایه ۴ از گروه پایه‌های پایین‌دست به صورت ناگهانی و سریع شروع به افزایش وسعت در اطراف خود کرده، اما گسترش وسعت آبشستگی در اطراف پایه ۱ از گروه پایه‌های بالادست به صورت تدریجی رخ داده است. برعکس این توضیحات در مورد پایه ۳ و ۶ نیز صادق است، یعنی پایه ۳ دارای گسترش وسعت ناگهانی و پایه ۶ دارای گسترش وسعت تدریجی بوده است. بدلیل تأثیرات ناشی از وجود گودال برداشت مصالح گسترش وسعت آبشستگی در اطراف پایه‌های نزدیک به گودال، سریعتر از پایه‌های دور از آن رخ می‌دهد. تفاوت دیگر، تفاوت در تأثیر زبری بر وسعت آبشستگی میان پایه‌های بالادست و پایین‌دست است. در شکل اول از شکل ۶ مشاهده می‌شود که پس از اعمال زبری بر سطح

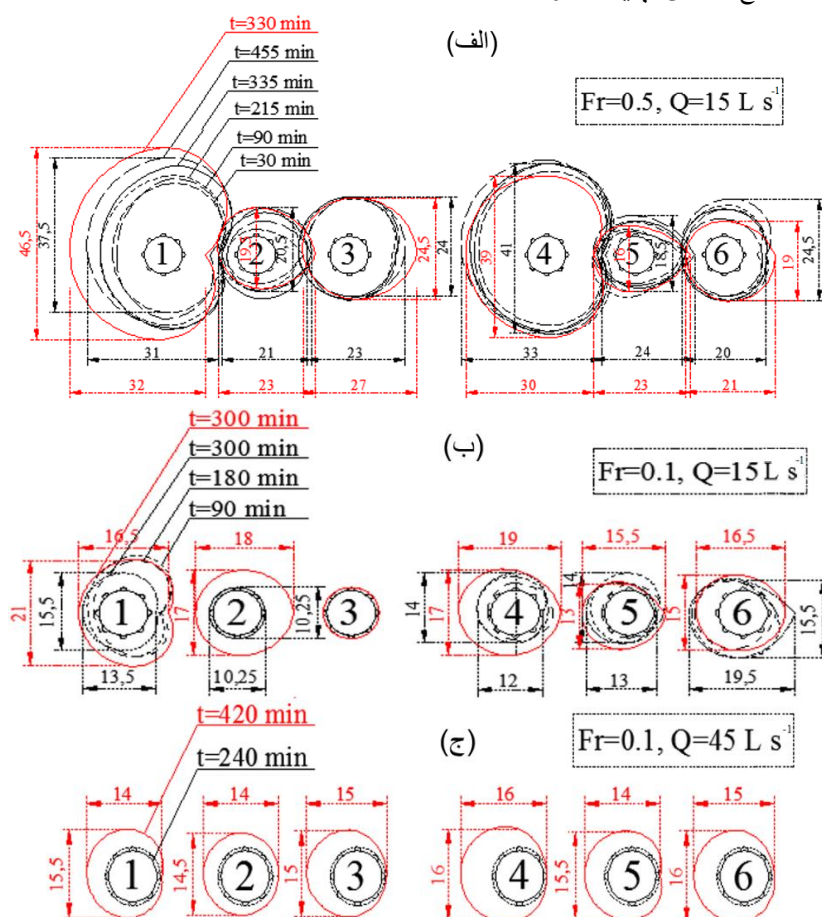
تأثیر زمان بر وسعت حفره آبشستگی

اطراف پایه‌های پل در مدل پایه زبر

در ابتدای آزمایش که هنوز جریانی در کانال وجود نداشت، وسعت حفره آبشستگی برابر صفر بود. پس از برقراری جریان در کانال تغییرات زیادی در گسترش حفره آبشستگی اطراف پایه‌های پل مشاهده گردید. منحنی قرمز رنگ در شکل ۶ بیانگر وسعت حفره آبشستگی برای مدل صاف بوده و نمودارها با رنگ سیاه، نشان دهنده مدل زبر می‌باشند. این شکل نمایانگر کاهش وسعت حفره آبشستگی پایه‌های بالادست در اثر اعمال زبری است. در شکل ۶- الف ($Fr=0.5$, $Q=15 \text{ L s}^{-1}$) سطح حفره در اطراف پایه ۱ بیش از سطح حفره در اطراف سایر پایه‌های بالادست گودال است. زیرا پایه شماره ۱ اولین مانع در مقابل جریان بوده و جریان آب با سرعت بیشتری به آن برخورد می‌کند. برخورد ناگهانی جریان آب با پایه شماره ۱ سبب افزایش گردابه‌های اصلی از قبیل گردابه نعل اسبی و برخاستگی در اطراف پایه ۱ شده و موجب افزایش عمق آبشستگی در اطراف این پایه می‌گردد. در پایه شماره ۲ به دلیل اثرات نگهبانی پایه شماره ۱، جریان با سرعت کم به این پایه برخورد کرده و گردابه‌هایی با قدرت کمتر تشکیل می‌شوند. علاوه بر این رسوبات شسته شده از اطراف پایه شماره ۱ که متمایل به حرکت به سمت پایین دست هستند، در مقابل و اطراف پایه شماره ۲ انبار شده و سبب جبران رسوبات شسته شده از اطراف این پایه می‌شوند. پایه شماره ۱ و پایه شماره ۳

آبشستگی در اطراف پایه‌ها به مقدار صفر سانتی‌متر رسیده است. از مقایسه سه شکل نتیجه می‌شود که با افزایش عدد فرود وسعت آبشستگی اطراف پایه‌ها نیز افزایش یافته اما افزایش دبی سبب کاهش وسعت آبشستگی گردیده است. علت این امر غلبه کردن تأثیر تغییرات عدد فرود بر تغییرات دبی جریان است. بعنوان نمونه در شکل ۶- ب جریان با دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۱، آبشستگی پایه چهارم در جهت عرضی ۱۷ سانتی‌متر بوده که پس از افزایش دبی به ۴۵ لیتر بر ثانیه این مقدار به ۱۶ سانتی‌متر رسیده است. در حالیکه در همین شکل با افزایش عدد فرود به مقدار ۰/۵، مقدار وسعت آبشستگی نیز به ۳۹ سانتی‌متر رسیده است.

پایه‌ها، کاهش وسعت آبشستگی اطراف پایه‌های بالادست بیشتر از گروه پایه‌های پایین‌دست بود. بطوریکه حداکثر کاهش وسعت آبشستگی در گروه پایه‌های بالادست ۹ سانتی‌متر بوده و در گروه پایه پایین دست ۱ سانتی‌متر بوده است. در شکل ۶- ب ($Fr=0.1, Q=15 \text{ L s}^{-1}$) علاوه بر اینکه وسعت آبشستگی در اطراف تمام پایه‌ها کمتر از شکل اول است، وسعت آبشستگی در مدل زبر کمتر از مدل صاف است که بیانگر استفاده مطلوب از زبری‌ها جهت کاهش آبشستگی است. در این شکل حداکثر وسعت آبشستگی مربوط به پایه اول در مدل صاف، برابر با ۲۱ سانتی‌متر در جهت عرضی است. در شکل ۶- ج ($Fr=0.5, Q=15 \text{ L s}^{-1}$) نیز پس از مسلح کردن پایه‌ها، وسعت



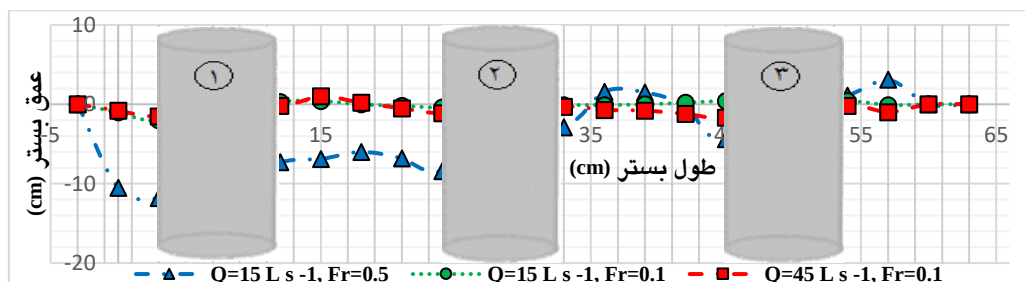
شکل ۶- تغییرات زمانی وسعت حفره آبشستگی در گروه پایه بالادست و پایین‌دست گودال برداشت مصالح بر حسب سانتی‌متر.

بررسی پروفیل بستر در انتهای زمان

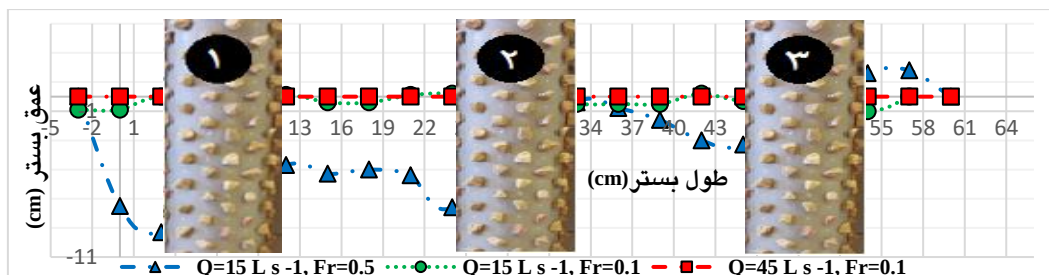
آزمایش‌ها برای دو مدل پایه صاف و زبر

شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ پروفیل بستر در انتهای آزمایش‌ها را برای تمام مدل‌ها در بالادست و پایین‌دست گودال برداشت مصالح نشان می‌دهد. محور قائم عمق بستر برحسب سانتی‌متر بوده و محور افقی نیز محور طولی بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. مطابق شکل -ها پروفیل بستر هم در بالادست و هم در پایین‌دست گودال برداشت مصالح، پس از اعمال زبری کاهش یافته است. بطوریکه حداکثر تراز پروفیل بستر در مدل صاف با مقدار ۱۱/۸- سانتی‌متر به مقدار ۹/۳- سانتی‌متر تغییر یافته است. اما روند طولی و شکل پروفیل بستر در هر دو مدل صاف و زبر مانند هم است. دلیل این پدیده این است که اعمال زبری بر سطح پایه‌ها بر

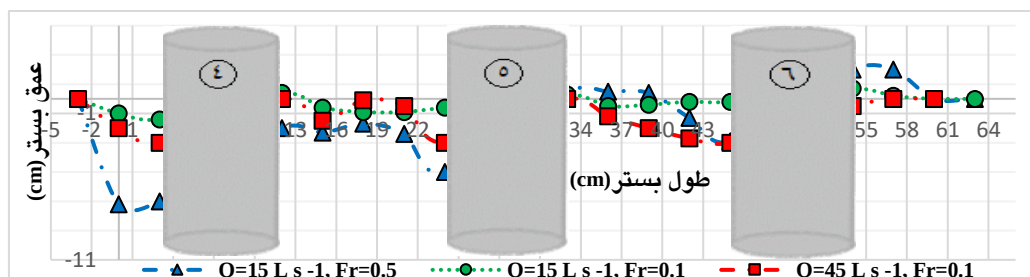
ماهیت پدیده آبشستگی تأثیر نمی‌گذارد، بلکه با کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی سبب کاهش کمی این پدیده می‌گردد. با توجه به اینکه در مدل زبر تراز بستر در $Fr=0.5$, $Q=15 \text{ L s}^{-1}$ پایینتر از $Fr=0.1$, $Q=15 \text{ L s}^{-1}$ بوده و آنهم کمتر از $Fr=0.1$, $Q=45 \text{ L s}^{-1}$ می‌باشد، نتیجه می‌شود که پروفیل بستر با افزایش عدد فرود و دبی افزایش یافته است، اما تأثیر افزایش عدد فرود بیش‌تر از دبی بوده است. علاوه بر این مشاهده گردید که پروفیل بستر در ابتدای گروه پایه‌ها و همچنین جلو پایه‌ها در تراز پایین‌تری نسبت به انتهای گروه پایه‌ها و پشت پایه‌ها قرار دارد. زیرا مقداری از رسوبات شسته شده از بالادست به پشت پایه‌ها و پایین‌دست گروه پایه‌ها منتقل شده و در همانجا انباشته شده است.



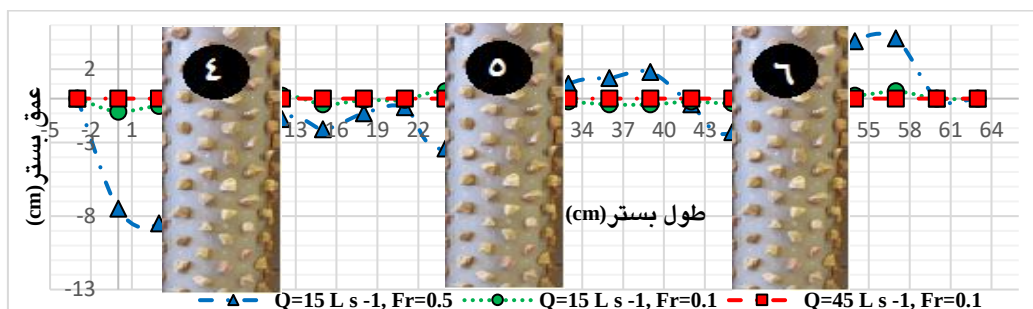
شکل ۷- پروفیل بستر در انتهای آزمایش‌ها برای گروه پایه‌های بالادست در مدل صاف.



شکل ۸- پروفیل بستر در انتهای آزمایش‌ها برای گروه پایه‌های بالادست در مدل زبر.



شکل ۹- پروفیل بستر در انتهای آزمایش‌ها برای گروه پایه‌های پایین‌دست در مدل صاف.

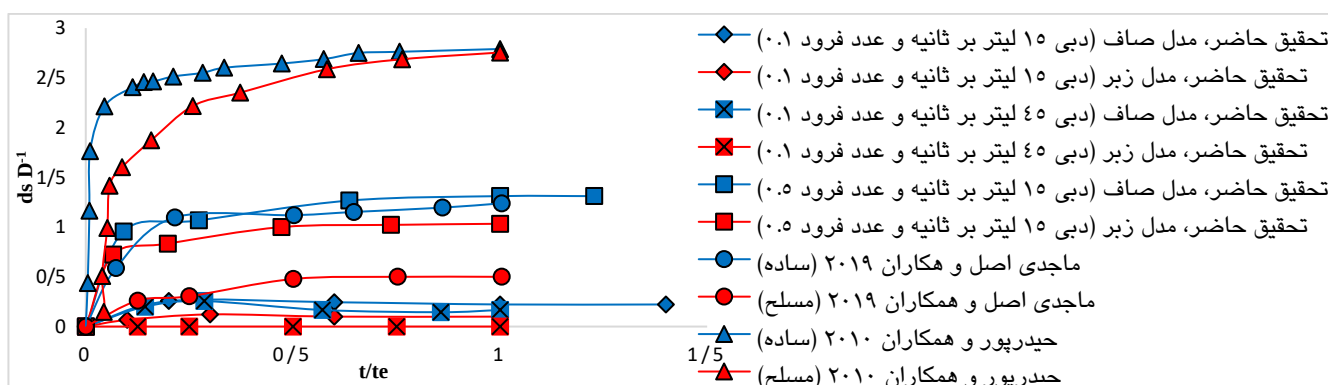


شکل ۱۰- پروفیل بستر در انتهای آزمایش‌ها برای گروه پایه‌های پایین‌دست در مدل زبر.

آزمایش شده جهت مقایسه اتخاذ گردیده است. دلیل انتخاب پایه اول برای مقایسه، بالا بودن عمق آبشستگی اطراف این پایه نسبت به سایر پایه‌ها است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که در تحقیق حاضر پس از اعمال زبری بر سطح پایه‌ها درصد کاهش آبشستگی برای مدل‌های $Q=15 \text{ L s}^{-1}$, $Fr=0.1$ ، $Q=45 \text{ L s}^{-1}$, $Fr=0.1$ و $Q=15 \text{ L s}^{-1}$, $Fr=0.5$ به ترتیب برابر کاهش حداکثری، ۵۵ و ۲۱ درصد بوده است. در حالیکه راهکار ارائه شده توسط حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) موجب کاهش ۱۲ درصد و مطالعه انجام شده توسط ماجدی اصل و همکاران (۲۰۱۹) سبب کاهش ۵۹ درصد عمق آبشستگی شده است. مقایسه میزان کاهش عمق آبشستگی این مطالعه با مطالعات مذکور مؤید مناسب بودن راهکار ارائه شده در این مطالعه یا همان اعمال زبری بمنظور کاهش آبشستگی است.

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج سایر محققین

همانطور که در پیشینه تحقیق ذکر شد، تاکنون هیچ مطالعه‌ای مبنی بر بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه-های زبر شده با شن در حضور گودال برداشت مصالح انجام نشده است، لذا در این بخش سعی شده است تا با استفاده از مطالعاتی نزدیک به مطالعه حاضر، مقایسه‌ای میان این مطالعه و سایر مطالعات صورت گیرد. بدین ترتیب از مطالعات حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) با دبی جریان ۱۱ لیتر بر ثانیه و عمق جریان ۰/۱۲ متر و ماجدی اصل و همکاران (۲۰۱۹) با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۵ جهت مقایسه استفاده گردیده است. به دلیل کثرت داده‌های موجود در مطالعه حاضر تنها داده‌های مربوط به مقابل پایه شماره ۱ (اولین پایه از بالادست گودال برداشت مصالح) در تمامی مدل‌های



شکل ۱۱- مقایسه منحنی توسعه زمانی آبشستگی تحقیق حاضر و سایر محققین برای حداکثر عمق آبشستگی.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها در بالادست و پایین‌دست گودال حاصل از برداشت مصالح در دو مدل پایه پل (پایه پل صاف و پایه پل زبر) در شرایط هیدرولیکی مختلف بصورت آزمایشگاهی بررسی گردید. آزمایش‌های انجام شده مؤید این موضوع بودند که با اعمال زبری بر روی پایه‌های پل، عملکرد مناسبی در جهت کنترل آبشستگی اطراف گروه پایه پل مشاهده گردید. پس از مسلح کردن سطح پایه توسط زبری شاهد کاهش آبشستگی در مقابل و پشت پایه‌ها بودیم. علاوه بر ناچیز بودن عمق آبشستگی پس از اعمال زبری بر سطح پایه‌ها در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه با عدد فرود ۰/۱، حداکثر کاهش عمق آبشستگی در سایر آزمایش‌ها مربوط به دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۱، با ۶۴/۲۹٪ کاهش بود. مقایسه نتایج عمق آبشستگی بالادست و پایین‌دست گودال برداشت مصالح نشان می‌دهد که عمق آبشستگی گروه پایه‌های بالادست بیشتر از گروه پایه‌های پایین‌دست بوده است. علاوه بر کاهش عمق آبشستگی در اثر اعمال زبری بر سطح پایه‌ها، این راهکار سبب افزایش زمان تعادل آبشستگی نیز گردیده است. حداکثر افزایش زمان تعادل مربوط به مدل با دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۵ با مدت ۱۲۰ دقیقه بود. در تمام مدل‌ها نرخ تغییرات عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های مسلح کمتر از پایه‌های صاف بوده و تغییرات اطراف پایه‌های مسلح با سرعت کمتر و در مدت زمان بیشتری به وقوع پیوسته‌اند. نتایج مربوط به توسعه زمانی آبشستگی اطراف

منابع مورد استفاده

- Aghli M, 2012. Effect of combination wrapping cable and collar on scouring depth cylindrical bridge pier groups on rivers meander, Master's thesis, Shiraz University, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering. (In Persian with English abstract)
- Ataie-Ashtiani B and Beheshti AA, 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. Journal of Hydraulic Engineering 132: 1100-1104.
- Bozkuş Z, Özalp MC and Dinçer AE, 2018. Effect of pier inclination angle on local scour depth around bridge pier groups. Arabian Journal for Science and Engineering 43(10): 5413-5421.
- Chiew YM and Melville BW, 1987. Local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Research 25(1): 15-26.

پایه‌ها نشان داد که عمق آبشستگی در مدل پایه صاف در اثر افزایش عدد فرود و دبی جریان افزایش یافت اما در پایه مسلح عمق آبشستگی با افزایش عدد فرود افزایش یافت ولی با افزایش دبی در عدد فرود ثابت افزایش نیافت. از بررسی وسعت آبشستگی در مدل‌های مختلف نتیجه شد که با افزایش عدد فرود وسعت آبشستگی اطراف پایه‌ها نیز افزایش می‌یابد. حداکثر وسعت آبشستگی در پایه‌های بالادست مربوط به پایه اول در مدل صاف با مقدار ۴۶/۵ سانتی‌متر در جهت عرضی (x) و ۳۲ سانتی‌متر در جهت طولی (y) بود. نتایج مربوط به پروفیل بستر در مدل‌های مختلف نشان داد که پروفیل بستر هم در بالادست و هم در پایین‌دست گودال برداشت مصالح، پس از اعمال زبری کاهش یافته است. بطوریکه حداکثر تراز پروفیل بستر در مدل صاف با مقدار ۱۱/۸- سانتی‌متر به مقدار ۹/۳- سانتی‌متر تغییر یافته است. با توجه به اینکه در مدل زبر تراز بستر در $Fr=0.5, Q=15 \text{ L s}^{-1}$ پایین‌تر از $Fr=0.1, Q=15 \text{ L s}^{-1}$ بوده و آنهم کمتر از $Fr=0.1, Q=45 \text{ L s}^{-1}$ می‌باشد، بنابراین نتیجه می‌شود که پروفیل بستر با افزایش عدد فرود و دبی افزایش یافته است، اما تأثیر افزایش عدد فرود بیش‌تر از دبی بوده است. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج دیگر محققین نشان‌دهنده کارایی و مناسب بودن این راهکار نسبت به سایرین بود. در نهایت استفاده از شن بدلیل سهولت اجرا و مقرون به صرفه بودن ایده و راهکار معقولی جهت کنترل و کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه‌ها می‌باشد.

- Daneshfaraz R, Chabokpour J, Desineh M and Ghaderi A, 2019 a. The experimental study of the effects of the river mining holes on the bridge piers. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(7): 1619-1633. (In Persian with English abstract)
- Daneshfaraz R, Chabokpour J and Dasineh M, 2019 b. The experimental investigation of the maximum depth and length of the created pit holes due to the bed material removal under subcritical flow condition. *Journal of Water and Soil Conservation* 26(1): 111-130. (In Persian with English abstract)
- Daneshfaraz R, Sattariyan M, Alinejad B and Majedi Asl M, 2021. Experimental investigation of the effects of flow discharge on the scour rate around the groups of bridge piers with rough surface in the presence of aggregate extraction pits. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 24(4): 123-136. (In Persian with English abstract)
- Dey S, Bose SK and Sastry GLN, 1995. Clear water scour at circular piers: a model. *Journal of Hydraulic Engineering* 121 (12): 869-876.
- Heidarpour M, Afzalimehr H, and Izadinia E, 2010. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research* 25(4): 411-422.
- Henderson F, 1966. *Open Channel Flow*. Macmillan Series in Civil Engineering. New York.
- Majedi Asl M, Daneshfaraz R and Valizadeh S, 2019. Experimental investigation of the river materials mining effect on the scouring around armed pier groups. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6): 1363-1380. (In Persian with English abstract)
- Majedi-Asl M, Daneshfaraz R, Abraham J and Valizadeh S, 2021. Effects of hydraulic characteristics, sedimentary parameters, and mining of bed material on scour depth of bridge pier groups. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 35(2): 4020148.11.
- Mia MF and Nago H, 2003. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(6): 420-427.
- Raudkivi A and Ettema R, 1983. Clear water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(3): 338-350.
- Rahiminiya A, Heidarpour M and Shahsavari H, 2016. The effect of roughness protrusions in reducing scour around bridge piers and its impact on the vertical velocity profiles. *Journal of Water and Soil Conservation* 23(5): 325-332. (In Persian with English abstract)
- Salehi Neishabouri SAA and Ghodsiyan M, 2005. River aggregate harvesting guide No. 336, Office of Standards and Technical Standards. (In Persian with English abstract)
- Zhao G and Sheppard DM, 1999. The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups. Pp. 377-391. In *Stream Stability and Scour at Highway Bridges: Compendium of Stream Stability and Scour Papers Presented at Conferences Sponsored by the Water Resources Engineering (Hydraulics) Division of the American Society of Civil Engineers, ASCE*.