

اثر مقیاس مدل در آزمایش‌های آبستکی پایه‌های پل

نرگس رئیسی^{۱*}، مهدی قمشی^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: n_raeesi123@yahoo.com

چکیده

آبستکی اطراف پایه‌های پل یکی از دلایل عدم پایداری آن‌ها می‌باشد و در صورت عدم اتخاذ راهکار مناسب، در نهایت منجر به تخریب این سازه می‌گردد. از این رو، مطالعه مکانیزم وقوع آبستکی و پارامترهای اثرگذار بر مقدار آن حائز اهمیت است. این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر مقیاس پایه‌های پل در آزمایش‌های آبستکی انجام شده است. بدین منظور، آزمایش‌ها برای پایه پل‌های استوانه‌ای به قطرهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر با برقراری شرایط آب زلال در سرعت‌های نسبی ۰/۹۵، ۰/۸۶، ۰/۷۶ و ۰/۶۷ در یک کانال آزمایشگاهی با بستری از ذرات رسوبی به اندازه متوسط ۰/۵۱ میلی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش ۱۳/۱۵ درصدی سرعت نسبی جریان از ۰/۷۶ به ۰/۸۶ برای پایه ۴۰ میلی‌متری عمق آبستکی ۳۸/۸ درصد، و با افزایش ۲۰ درصدی قطر پایه از ۵۰ به ۶۰ میلی‌متر، در سرعت نسبی ۰/۹۵ عمق آبستکی ۱۰/۳۴ درصد افزایش داشته است. هم‌چنین با تحلیل نتایج آزمایش‌ها پایه ۴۰ میلی‌متری، پایه‌ای با قطر مناسب برای انجام سایر کارهای آزمایشگاهی مشابه پیشنهاد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: آب زلال، آبستکی، پایه پل استوانه‌ای، سرعت نسبی، مقیاس پایه

Effect of Model Scale in Bridge Piers Scour Experiments

N Raesi^{1*}, M Ghomeshi²

Received: 8 May 2014 Accepted: 6 December 2014

¹- M.Sc. Student, Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

²- Prof., Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

*Corresponding Author, Email: n_raesi123@yahoo.com

Abstract

The scour around the bridge piers causes instability of them, and without applying an appropriate solution, it eventually leads to demolition of the structure. Therefore, study on the mechanism of the occurrence of the scour and effective parameters on the amount of scour are important. This study was preformed to find the effect of bridge pier's dimension on the scour depth. Therefore, the tests were carried out for cylindrical bridge piers with diameters of 10, 20, 30, 40, 50 and 60 mm in clear water condition with relative velocities (water velocity over scour critical velocity) of 0.95, 0.86, 0.76 and 0.67 in a laboratory flume. The mean size of bed particles was equal to 0.51 mm. The results showed that with an increase of 13.15 percent in relative velocity of the flow from 0.76 to 0.86 for pier with diameter of 40 mm, also with an increase of 20 percent in the pier diameter from 50 to 60 mm at the flow relative velocity of 0.95, the scour depth increased 38.8 and 10.34 percent, respectively. In addition, by analysis of the experimental results, the pier with diameter of 40 mm was an appropriate one with suitable diameter so it was proposed for the other similar experiments.

Keywords: Clear water, Cylindrical pier, Relative velocity, Scale pier, Scour

مقدمه

آبشستگی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش شرایط جریان و حرکت مصالح بسترهای فرسایش‌پذیر صورت می‌گیرد. تعیین عمق آبشستگی از این جهت دارای اهمیت می‌باشد، که اولاً بیانگر میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و ثانیاً در طراحی ابعاد فونداسیون سازه‌هایی که در مسیر جریان آب قرار دارند، نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. با حضور پایه‌های پل در مسیر جریان، سرعت موضعی و آشفتگی جریان افزایش می‌یابد. بسته به

شکل سازه، گردابه‌هایی ایجاد می‌گردند که نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال می‌نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب بستر و فرسایش‌های موضعی در اطراف سازه افزایش یافته و منجر به پائین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می‌گردد (بی‌نام ۱۳۹۰). بر این اساس، محققان زیادی مسئله آبشستگی پیرامون پایه‌های پل را مورد مطالعه قرار داده‌اند. از آن‌جا که پدیده آبشستگی فرآیندی بسیار پیچیده است و عوامل زیادی در شکل‌گیری این پدیده مؤثر هستند،

شرایط آب زلال و بستری یکنواخت از ماسه، رابطه‌ای را بدست آوردند که به شکل نوک پایه، نسبت طول به عرض پایه و زاویه نزدیک شدن جریان به پایه بستگی دارد. برای تعیین عمق آبخستگی، چانگ و همکاران (۲۰۰۴) آزمایش‌هایی را پیرامون پایه پل‌های استوانه‌ای در شرایط آب زلال و رسوب یکنواخت بستر انجام دادند و به مقایسه نتایج مزبور پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که رسوب یکنواخت در تعیین عمق آبخستگی عملکرد مناسب‌تری را داشته و یک فرمول رگرسیونی بر مبنای قطر پایه و متوسط اندازه ذرات رسوب بستر ارائه دادند. شپارد و همکاران (۲۰۰۶) برای پیش‌بینی عمق آبخستگی پیرامون پایه‌های استوانه‌ای در شرایط آب زلال، آزمایش‌هایی را در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده در یک کانال به طول $3.8/4$ m، عرض $6/1$ m و عمق $6/4$ m انجام دادند. جریان آب در این کانال توسط یک مخزن در نیروگاه برق‌آبی تأمین می‌شد. برای انجام آزمایش‌ها از پایه‌هایی با مقطع دایره‌ای به قطر 0.114 ، 0.305 و 0.914 متر و سه قطر مختلف رسوب، 0.22 ، 0.8 و $2/9$ میلی‌متر استفاده کردند. نتایج بدین شرح بود: ۱. بیشینه عمق آبخستگی در دماغه پایه رخ می‌دهد. ۲. نسبت عمق آبخستگی به عمق جریان با سرعت جریان رابطه خطی دارد. ۳. در شرایط هیدرولیکی ثابت، تأثیر قطر پایه بر عمق آبخستگی قابل مشاهده می‌باشد، عبارتی با افزایش قطر پایه‌های مورد آزمایش، بیشینه عمق آبخستگی در جلو پایه پل افزایش می‌یابد. مشکواتی تروجنی و همکاران (۱۳۹۰) از کانالی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب 8 ، 0.255 و 0.3 متر، اندازه متوسط ذرات رسوب بستر 0.81 mm و پایه پل به قطرهای 21 ، 30 و 40 میلی‌متر، به منظور بررسی تأثیر اندازه قطر پایه در آبخستگی استفاده کردند. نتایج آزمایش‌هایشان نشان داد که در یک عدد فرود ثابت با افزایش قطر پایه، عمق آبخستگی افزایش می‌یابد و هم چنین با افزایش

محققان هنوز موفق به ارائه راه حل واحدی برای محاسبه عمق حفره آبخستگی و یا کاهش آن نشده‌اند. محققانی چون بروزرز و همکاران (۱۹۹۷) و ملویل و کلن (۲۰۰۰) هر کدام تحقیق‌های با ارزشی را در این زمینه انجام داده‌اند و بر روی عوامل مؤثر بر این پدیده مطالعه نموده‌اند. عواملی چون شکل آبراهه، خصوصیات جریان، شکل و زاویه استقرار پایه‌ها نسبت به جریان و خصوصیات رسوب همگی از عواملی هستند که در پیچیدگی مسئله آبخستگی پایه‌های پل دخالت می‌نمایند (شفاعی بجستان ۱۳۸۷).

بر اساس مطالعه‌های لی و همکاران (۱۹۶۱) شکل پایه، بر روی عمق آبخستگی تأثیر به سزایی دارد. آن‌ها پایه مستطیلی و استوانه‌ای را در شرایط آب زلال و دانه‌بندی یکنواخت مواد بستر مورد بررسی قرار دادند و روابطی را برای تخمین بیشینه عمق آبخستگی ارائه نمودند. نتایج آن‌ها مؤید این بود که هر چه شکل پایه از خطوط جریان تبعیت بیشتری داشته باشد، آبخستگی در کنار آن پایه بیشتر کاهش می‌یابد. رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) آزمایش‌هایی را برای بررسی آبخستگی در شرایط آب زلال پیرامون پایه پل‌های استوانه‌ای انجام دادند. آن‌ها در مطالعه‌های خود به این نتیجه رسیدند که عمق تعادل آبخستگی به نسبت عمق جریان به قطر پایه بستگی دارد، و فرمولی را به منظور برآورد بیشینه عمق آبخستگی ارائه نمودند. جانسون (۱۹۹۶) با اضافه نمودن آمار جدید به آمار ریچاردسون (۱۹۹۱) و با استفاده از داده‌های صحرائی معادله‌ای برای تخمین عمق آبخستگی که در $F_r < 0.8$ معتبر است، ارائه داد. ملویل و ساترلند (۱۹۹۸) بر اساس داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های خود، بیشینه عمق آبخستگی در شرایط آب زلال را بر اساس قطر پایه‌های استوانه‌ای بدین شکل ارائه کردند ($d_s/d = 2.4$)، که در این رابطه d_s بیشینه عمق آبخستگی و d قطر پایه پل می‌باشد. ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر روی پایه‌های استوانه‌ای در

بستر و پایان هر آزمایش، تغییرات بی‌بعد عمق آبخستگی به قطر پایه در محدوده هر کدام از پایه‌ها نسبت به زمان ثبت شد، به‌همین دلیل پارامتر زمان از آزمایش‌ها حذف گردید. هم‌چنین برای انجام آزمایش‌ها، پایه‌هایی با مقطع دایره‌ای و از جنس چوب ساخته شده بودند؛ به‌همین دلیل مقدار C_D نیز ثابت می‌باشد. با توجه به اینکه عدد رینالدز در محدوده انجام آزمایش‌های صورت پذیرفته بیشتر از ۲۰۰۰ می‌باشد (بر اساس جدول ۱)، بنابراین جریان در محدوده آشفته بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد (چاو ۱۹۸۹). با توجه به ثابت بودن متغیرهای انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی، چگالی نسبی ($S_g = \rho_s / \rho$)، B/D و D_{50}/D برای هر پایه پل، در تمامی آزمایش‌ها و هم‌چنین مقدار سرعت آستانه حرکت برای مصالح بستر مقداری ثابت می‌باشد و نکته حائز اهمیت این است که، بعلت ثابت بودن عمق جریان در کلیه آزمایش‌های صورت پذیرفته، سرعت نسبی جریان (معرف شدت جریان) و عدد فرود بر عمق آبخستگی روند مشابهی را نشان می‌دهند. از این رو، رابطه بدون بعد به‌صورت زیر قابل ارائه می‌باشد:

$$d_s/D = f(F_r) \quad [۳]$$

امکانات آزمایشگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در کانالی با سطح مقطع مستطیلی به طول ۶ متر، عرض مفید ۷۲ سانتی‌متر و عمق ۶۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. دیواره‌ها و کف کانال از جنس شیشه سیکوریت با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بودند. لازم به ذکر است که در کلیه آزمایش‌های این تحقیق، شیب مجرای کانال برابر صفر تنظیم شده است. برای اندازه‌گیری دبی از یک فلومتر نصب شده در ابتدای کانال با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه استفاده شد. جریان مورد نیاز با

دبی در هر پایه، می‌توان افزایش عمق آبخستگی را مشاهده کرد.

تحقیق حاضر، به‌منظور سنجش تأثیر مقیاس پایه پل‌های استوانه‌ای بر آبخستگی موضعی، با استفاده از مدل آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس در صورت مطلوب بودن نتایج، کمینه مقیاس پایه پل، برای کارهای مشابه، جهت تطبیق بیشتر با واقعیت استخراج خواهد شد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

به‌منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در بررسی پدیده آبخستگی مؤثر می‌باشند اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه ۱ ارائه شده‌اند:

$$f(d_s, y, B, D, D_{50}, V, V_c, g, t, C_D, \sigma, \nu, \rho, \rho_s) = 0 \quad [۱]$$

که در آن d_s عمق آبخستگی، y عمق جریان، B عرض کانال، D قطر پایه پل، D_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی، V سرعت جریان، V_c سرعت آستانه حرکت، g شتاب ثقل، t زمان، C_D ضریب شکل پایه، σ انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی، ν لزوجت سینماتیکی سیال، ρ چگالی آب و ρ_s چگالی رسوب بستر می‌باشند. با تجزیه و تحلیل ابعادی صورت پذیرفته، با استفاده از روش پای باکینگهام رابطه کلی زیر به‌دست می‌آید:

$$d_s/D = f(R_e, F_r, D_{50}/D, S_g, \sigma, B/D, V/V_c) = 0 \quad [۲]$$

برای حذف پارامتر زمان از آزمایش‌های صورت پذیرفته و انجام آن‌ها در شرایط جریان پایدار، زمان تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر زمان تعادل بستر در نظر گرفته شد (برای به‌دست آوردن زمان تعادل شرایط

موجب کاهش جریان رو به پائین می‌گردد و کاهش عمق آبخستگی را در پی دارد. با توجه به این نقطه نظر، باید انتخاب عمق جریان بگونه‌ای صورت پذیرد که اثر این پدیده بر عمق آبخستگی از بین برود. به همین دلیل، کمینه عمق جریان برای از بین بردن این اثر باید بیش از ۲ الی ۳ برابر قطر پایه باشد. از این رو، در آزمایش‌ها شرط $(D/y < 0.7)$ به دقت رعایت می‌شد تا عمق حفره متأثر از عمق جریان قرار نگیرد (ملویل ۱۹۹۷). نکته دیگری که در تعیین عمق جریان حائز اهمیت است، رعایت بیشینه تنش برشی در شرایط آب زلال است. زمانی که سرعت جریان در محدوده $0.3V_c < V < 0.6V_c$ باشد، آبخستگی در شرایط آب زلال است و اگر سرعت متوسط جریان (V) بیش از سرعت آستانه حرکت (V_c) باشد آبخستگی در شرایط بستر زنده صورت می‌پذیرد. در آزمایش‌های این تحقیق، آبخستگی در شرایط آب زلال انجام پذیرفته است (ملویل و چپو ۱۹۹۹).

با توجه به موارد فوق، برای تعیین سرعت آستانه حرکت، در کانال آزمایشگاهی بر روی بستر رسوبی و بدون حضور پایه، عمق‌های متفاوتی با تنظیم بیشینه دبی، ۲۵ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد تا بتوان حرکت یا عدم حرکت رسوب‌های بستر را با چشم مشاهده نمود. پس از اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته در نهایت، مقدار متوسط جریان برای آستانه حرکت رسوب‌ها ۰/۲۱ متر بر ثانیه تعیین گردید. بر این اساس عمق ثابت، ۱۶ سانتی‌متر جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. جدول ۱ شرایط جریان حاکم بر آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

در رسوب غیرچسبیده با اندازه متوسط ۰/۰۵ تا ۰/۷ میلی‌متر تشکیل می‌شود. از این رو، طبق نظر رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) جهت ممانعت از تشکیل ریپل در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، باید $D_{50} \geq 0.7mm$ باشد. اما برای رسوب با $D_{50} < 0.7mm$ ، ریپل‌ها در سرعت‌های جریان بیش از $0.6V_c$ تشکیل می‌شوند. برای رفع این مشکل، انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی باید در محدوده ۱/۱ تا ۱/۵ باشد. در این محدوده از انحراف معیار، ذرات درشت‌تر سطح بستر را پوشانده و لایه مسلح ایجاد می‌شود، ولی این ذرات به قدر کافی بزرگ نیستند تا حفره آبخستگی را بپوشانند؛ زیرا شدت آشفتگی جریان در این ناحیه زیاد است. بنابراین، در این حالت آبخستگی در شرایط آب زلال همانند شرایط مربوط به ذراتی که ایجاد ریپل نمی‌کنند، رخ می‌دهد (بروزرز و رادکیوی ۱۹۹۱). با توجه به شرایط ذکر شده، برای تأمین رسوب بستر از ماسه باقی‌مانده بین الک با شماره‌های ۳۰ و ۴۰ در محدوده اندازه ذرات ۰/۵۹ تا ۰/۴۳ میلی‌متر استفاده و بستر در بازه ۲ متری به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با رسوب‌های با اندازه متوسط ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر و انحراف معیار ۱/۱۸ پوشانده شد.

ج) طبق توصیه الیتو و هاگر (۲۰۰۲) برای جلوگیری از تأثیر زبری بر عمق آبخستگی، باید عمق آب بیش از ۲۰ میلی‌متر انتخاب گردد. هم چنین طبق نظر اتما (۱۹۸۰) در جریان‌های کم عمق، گرداب موج کمانی در سطح آب تولید می‌گردد و علت آن گردش در خلاف جهت جریان است؛ که با جریان تداخل یافته و

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها.

V/V_c^*	$V (ms^{-1})$	$B (m)$	$y (m)$	$Q (m^3s^{-1})$	F_r	R_e
۰/۹۵	۰/۲	۰/۷۲	۰/۱۶	۰/۰۲۵	۰/۱۶	۲۲۰۰۰
۰/۸۶	۰/۱۸	۰/۷۲	۰/۱۶	۰/۰۲۰	۰/۱۴	۱۹۸۰۰
۰/۷۶	۰/۱۵	۰/۷۲	۰/۱۶	۰/۰۱۷	۰/۱۲	۱۶۵۰۰

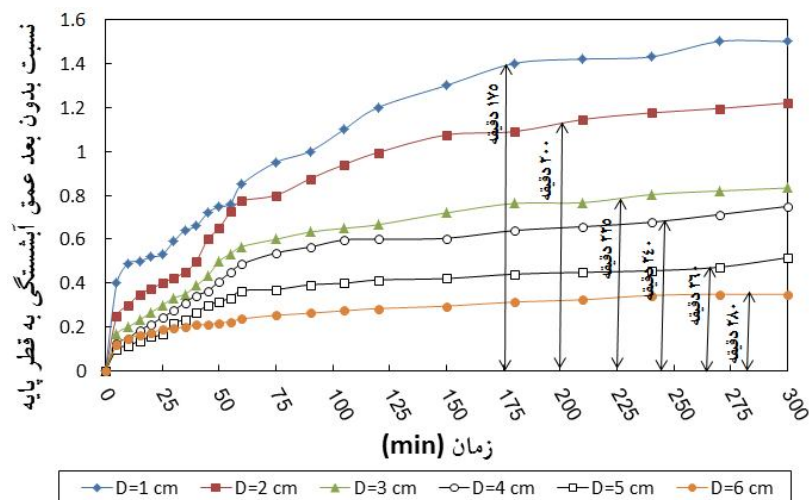
۰/۶۷ ۰/۱۴ ۰/۷۲ ۰/۱۶ ۰/۰۱۶ ۰/۱۱ ۱۵۴۰۰

V/V_c^* بیان‌گر سرعت نسبی جریان است.

بطوریکه در حدود ۱ الی ۲ سانتی‌متر از سطح رسوب‌ها را می‌پوشاند، پمپ با دبی کمینه راه اندازی و جریان ورودی با سرعت بسیار کم وارد کانال می‌گردد تا سطح آب هم چنان بالا بیاید. پیش از آنکه آب از روی دریچه ریزش کند، دریچه را به آهستگی گشوده تا اینکه دبی و ارتفاع آب درون کانال در مقدار مورد نظر تنظیم گردد. سطح آب در کانال با استفاده از ارتفاع سنج سوزنی با دقت $\pm 0.1mm$ اندازه‌گیری می‌شد. پس از برقراری جریان به مدت مشخص، پمپ خاموش می‌شد، و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی، آب موجود در کانال به آرامی زهکشی می‌شد تا توپوگرافی بستر تغییر نکند و در نهایت توپوگرافی بستر در اطراف پایه در یک شبکه 2×2 سانتی‌متری به وسیله متر لیزری با میزان دقت $\pm 1mm$ برداشت می‌گردید.

پدیده آبخستگی حول پایه پل‌ها، با گذشت زمان گسترش پیدا کرده و در نهایت به حالت تعادلی خود می‌رسد. به منظور تعیین زمان مناسب برای انجام آزمایش‌ها، یک آزمایش ۳۰۰ دقیقه‌ای با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه ($V/V_c = 0.95$) انجام گرفت و زمانی که توسعه حفره آبخستگی به بیشینه خود رسید، زمان به دست آمده به عنوان زمان انجام آزمایش اطراف هر پایه تعیین گردید (در طی آزمایش‌های انجام گرفته، عمق آبخستگی در جلو پایه پل در زمان‌های مشخص اندازه‌گیری می‌گردد). با توجه به شکل ۲ زمان انجام آزمایش‌ها متناسب با ابعاد هر پایه متفاوت است.

در شروع هر آزمایش دریچه کشویی در انتهای مجرای کانال بطور کامل بسته شده و آب به آرامی به درون کانال هدایت شد تا از ایجاد ناهمواری (ریپل) در سطح بستر جلوگیری شود. پس از بالا آمدن سطح آب،



شکل ۲- منحنی توسعه زمانی حفره آبخستگی.

بدین منوال صورت پذیرفت که، عمق‌های آبخستگی با استفاده از دستگاه اکوساندر از جلو پایه‌های پل نادری در ایستگاه اهواز- رودخانه کارون و در راستای عمود

در ادامه به منظور دستیابی به نتایج تحقیق، بایستی به مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های صحرایی بپردازیم. نحوه برداشت داده‌های صحرایی

صحرایی بدست آوردن بیشینه عمق آبخستگی در محدوده مورد بررسی و در نهایت محاسبه عمق آبخستگی نسبی بوده است. شکل ۳ الف) دستگاه اکوساندر و ب) نحوه برداشت داده‌ها را نشان می‌دهد.



(ب)

بر جهت جریان برداشت گردید. صفحه دستگاه اکوساندر بایستی به صورت عمودی بر سطح آب قرار گیرد، تا در ارسال امواج صوتی توسط دستگاه خللی صورت نپذیرد. برگشت امواج، عمق‌های آبخستگی را بر دستگاه عمقیاب نشان می‌دهد. هدف از داده‌برداری



(الف)

شکل ۳- نحوه داده‌برداری صحرایی الف) دستگاه اکوساندر ب) نحوه برداشت داده‌ها.

سرعت آبخستگی در لحظات اولیه آزمایش بیشتر بوده و سپس با کاهش اثر گردابه‌های نعل اسبی پشت پایه به تدریج کم می‌گردید. در این مرحله ۲۴ آزمایش در شش قطر پایه پل، در سرعت‌های نسبی (V/V_c) ۰/۹۵، ۰/۸۶، ۰/۷۶ و ۰/۶۷ به ترتیب متناظر با اعداد فرود بالادست ۰/۱۶، ۰/۱۴، ۰/۱۲ و ۰/۱۱ (در شرایط آب زلال) انجام گرفت (جدول ۲).

نتایج و بحث

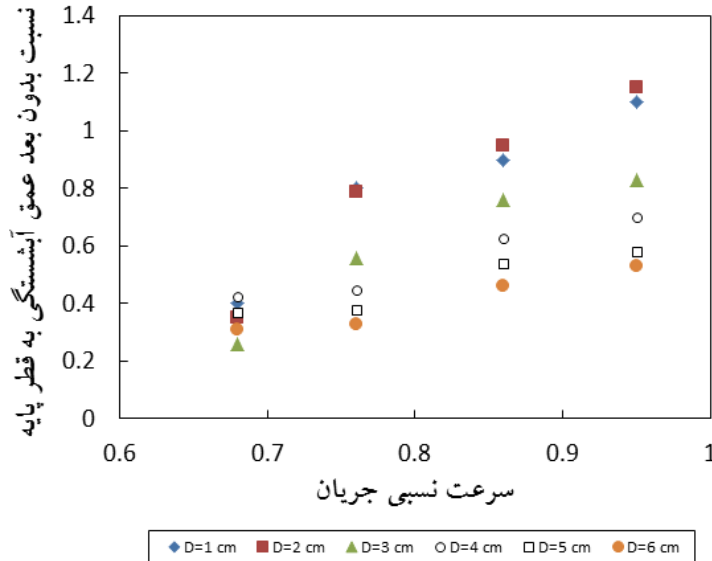
در ابتدا پایه در منطقه مورد نظر در محدوده آزمایش قرار گرفت، بعد از اطمینان از عمود بودن پایه، تنظیم دبی و عمق جریان صورت پذیرفت. بلافاصله گردابه‌ها پیرامون پایه تشکیل و آبخستگی با سرعت بسیار بالا از جلو پایه شروع و سپس به طرفین کشیده می‌شد. پس از مدت کوتاهی از شروع آزمایش، آبخستگی به پائین دست (پشت پایه پل) می‌رسید.

جدول ۲- تغییرات بی‌بعد عمق آبخستگی به قطر پایه پل در شرایط هیدرولیکی ثابت.

سرعت نسبی جریان	قطر پایه‌های پل (mm)					
	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
$V/V_c = 0.95$	۱/۱	۱/۱۵	۰/۸۳	۰/۷	۰/۵۸	۰/۵۳
$V/V_c = 0.86$	۰/۹	۰/۹۵	۰/۷۶	۰/۶۲۵	۰/۵۴	۰/۴۶
$V/V_c = 0.76$	۰/۸	۰/۸	۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۳۸	۰/۳۳
$V/V_c = 0.67$	۰/۴	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۴۲۵	۰/۳۷	۰/۳۱

در اطراف پایه تشکیل می‌شود. بر این اساس، با افزایش $0.95/0$ (یا $0.67/0$ به $0.95/0$) افزایش $0.45/0.45$ درصدی عدد فرود جریان از $0.11/0$ به $0.16/0$ برای پایه 60 میلی‌متری، عمق آبشستگی به میزان $68/42$ درصد افزایش داشته است.

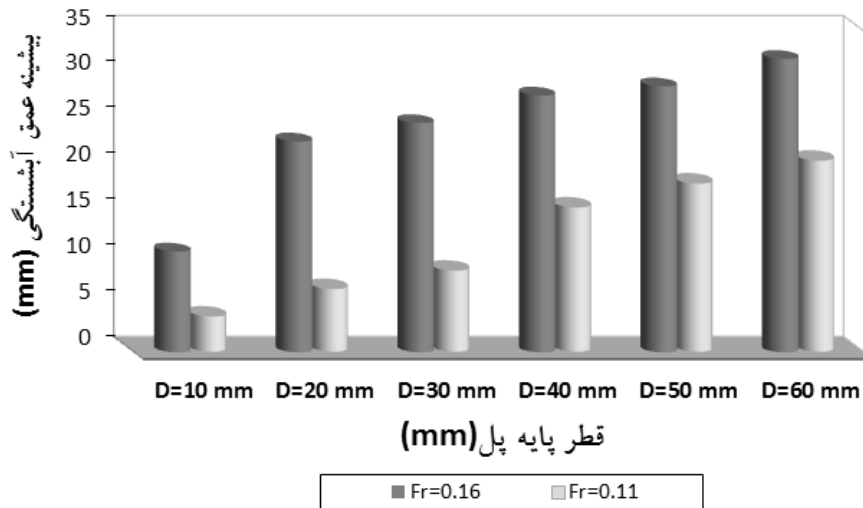
نتایج مربوط به جدول ۲ با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شکل ۴ تأثیر عدد فرود جریان بر تغییرات بی‌بعد عمق آبشستگی به قطر پایه مشهود است. با افزایش سرعت نسبی جریان، حفره عمیق‌تر و وسیع‌تری ناشی از فعالیت جریان‌های گردابی



شکل ۴- تأثیر عدد فرود جریان بر عمق بی‌بعد آبشستگی به قطر پایه.

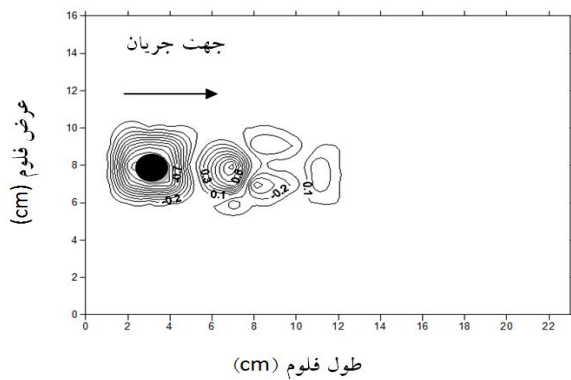
شکل ۵ در اعداد فرود $0.16/0$ و $0.11/0$ اثر تغییر قطر پایه بر بیشینه عمق آبشستگی را نشان می‌دهد. از مقایسه پایه‌های 50 و 60 میلی‌متری، می‌توان بیان داشت که با افزایش 20 درصدی قطر پایه، در سرعت نسبی $0.95/0$ ($F_r = 0.16$) عمق آبشستگی $10/34$ درصد، و در سرعت نسبی $0.67/0$ ($F_r = 0.11$) عمق آبشستگی $2/70$ درصد افزایش را نشان داده است.

تأثیر اندازه قطر پایه در آبشستگی موضعی اطراف پایه در سرعت نسبی ثابت نشان می‌دهد، با افزایش قطر پایه مقطع عرضی در محل پایه تنگ‌تر شده و سرعت جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه جریانی با تلاطم بیشتر در اطراف پایه شکل می‌گیرد. این تلاطم باعث ایجاد یک جریان رو به پائین قوی‌تری در جلو پایه شده و با گذشت زمان حفره آبشستگی را عمیق‌تر می‌کند.



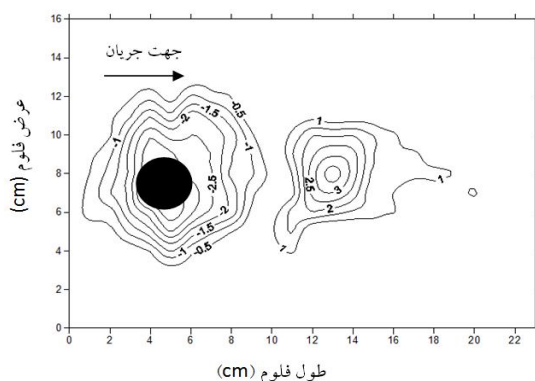
شکل ۵- اثر قطر پایه بر بیشینه عمق آبشستگی.

عرضی حفره آبشستگی به جهت قرارگیری مانعی بزرگتر در برابر جریان، و از این رو افزایش جریان-های گردابی افزایش می‌یابد (اشکال ۶ و ۷).

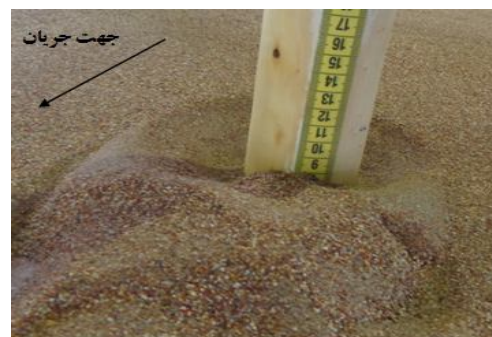


شکل ۶- توسعه حفره آبشستگی پیرامون پایه ۱۰ mm بر حسب سانتی‌متر ($V/V_c = 0.95$).

الگوی آبشستگی پیرامون پایه‌های ۱۰ و ۴۰ میلی‌متری در سرعت نسبی $(F_r = 0.16)$ نشان می‌دهد، با افزایش قطر پایه میزان توسعه طولی و



شکل ۷- توسعه حفره آبشستگی پیرامون پایه ۴۰ mm بر حسب سانتی‌متر ($V/V_c = 0.95$).



از برآزش غیر خطی استفاده شد. و در نهایت روابط با نرم‌افزار آماری SPSS 20 پس از تحلیل‌های متعدد مطابق روابط زیر استخراج گردید (R^2 ضریب همبستگی بین مقادیر و α سطح معنی‌دار پراکندگی بین مقادیر می‌باشند):

$$d_s/D = 2.89F_r^{0.5} - 0.15 \quad (R^2 = 0.91, \alpha = 0.01)$$

$$d_s/D = 3.02F_r^{0.6} - 0.11 \quad (R^2 = 0.92, \alpha = 0.01)$$

$$d_s/D = 3.2F_r^{0.57} - 0.11 \quad (R^2 = 0.86, \alpha = 0.01)$$

$$d_s/D = 1.57F_r^{0.45} - 0.14 \quad (R^2 = 0.96, \alpha = 0.05)$$

$$d_s/D = 1.04F_r^{0.34} - 0.13 \quad (R^2 = 0.93, \alpha = 0.05)$$

$$d_s/D = 1.08F_r^{0.4} - 0.11 \quad (R^2 = 0.97, \alpha = 0.05)$$

انجام شده‌اند، استخراج شده و پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند. مقدار همبستگی این دو مقدار (آزمایشگاهی و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری در سطوح مربوط بدست آمده است.

با بهره‌گیری از تجزیه و تحلیل ابعادی صورت گرفته، پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر بیشینه عمق آبشستگی به‌دست آمده است. از این رو، به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بی‌بعد مؤثر ($d_s/D, F_r$) و روند تغییر آن‌ها و ارائه روابط ریاضی،

[۴] پایه ۱۰ میلی‌متر:

[۵] پایه ۲۰ میلی‌متر:

[۶] پایه ۳۰ میلی‌متر:

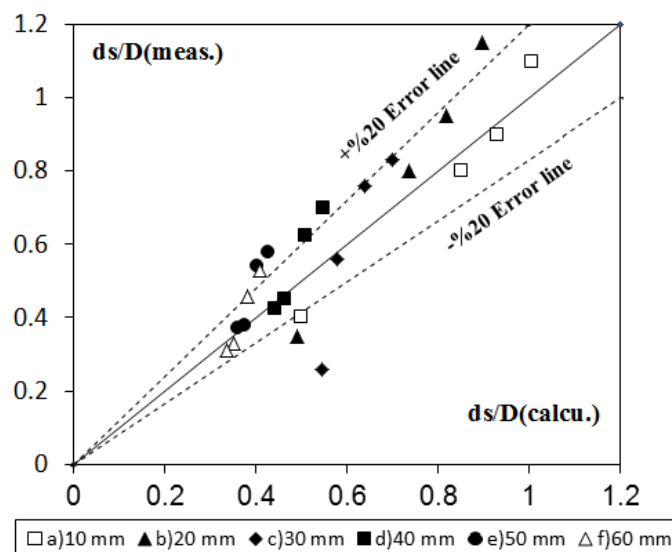
[۷] پایه ۴۰ میلی‌متر:

[۸] پایه ۵۰ میلی‌متر:

[۹] پایه ۶۰ میلی‌متر:

در شکل ۸ مقدار عمق بی‌بعد آبشستگی به قطر پایه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (محور قائم) و مقدار عمق بی‌بعد آبشستگی به قطر پایه با استفاده از روابط ۴ الی ۹ (محور افقی) با هم مقایسه شده‌اند.

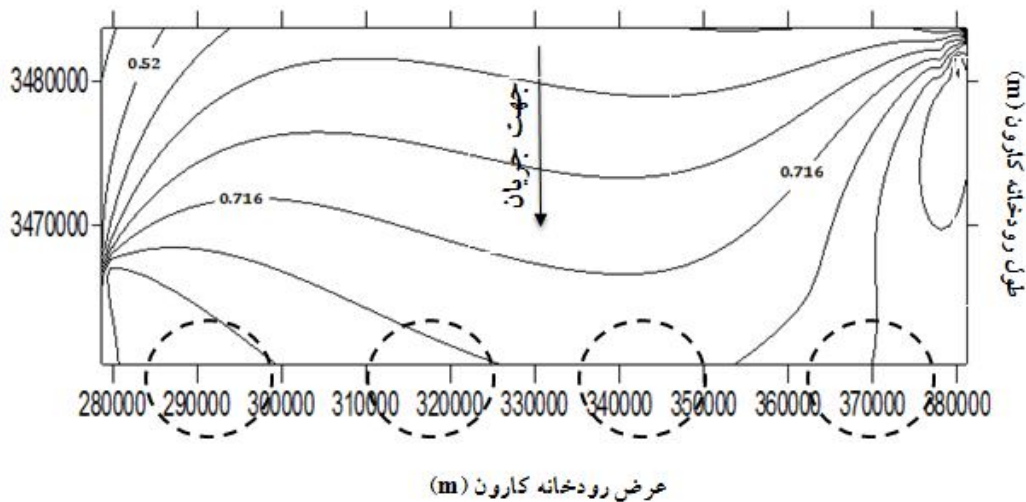
این شکل با علم به اینکه آزمایش‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دامنه‌های مختلف پارامترها



شکل ۸- مقایسه بین عمق بی‌بعد آبشستگی به قطر پایه اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با روابط (۴-۹).

مکانی را از نظر GPS نشان می‌دهند)، که بر اساس آن می‌توان بیشینه عمق آبشستگی را به‌منظور انجام مقایسه برآورد نمود. هم چنین در جدول ۳ اطلاعات رودخانه کارون نشان داده شده است. مقادیر مزبور را در روابط بدست آمده با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی قرار داده و از مقایسه نتایج، می‌توان پایه‌ای ۴۰ mm را به‌عنوان پایه‌ای با قطر مناسب برای انجام کارهای آزمایشگاهی مشابه در نظر بگیریم.

در ادامه، با استفاده از آمار صحرائی، به مقایسه روابط ارائه شده می‌پردازیم تا مشخص شود که کدامیک از روابط جواب نزدیک‌تری با آمار واقعی دارد، و بتوان کمینه قطر پایه مناسب برای کارهای آزمایشگاهی را استخراج کنیم. شکل ۹ الگو شماتیک توسعه آبشستگی که با استفاده از نرم‌افزار Surfer 8 ترسیم شده است، در ایستگاه اهواز را نشان می‌دهد (لازم به توضیح است مقادیر روی محورها، موقعیت



شکل ۹- الگو شماتیک توسعه آبشستگی (ایستگاه اهواز).

جدول ۳- آمار و اطلاعات صحرائی جمع آوری شده ایستگاه اهواز- رودخانه کارون (محدوده پل نادری).

$Q (m^3 s^{-1})$	$B (m)$	$V (ms^{-1})$	$y (m)$	F_r	$D (m)$	d_s/D (موجود)	d_s/D (پایه ۴۰mm)
۳۲۲	۲۵۰	۰/۳۷	۳/۵	۰/۱	۱/۵	۰/۴۸	۰/۴۲

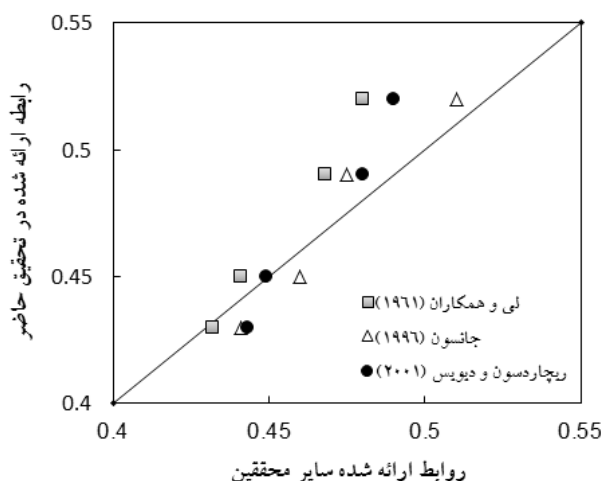
۴۵ درجه نشان می‌دهد که با توجه به روند مقادیر، رابطه به‌دست آمده از دقت خوبی برای محاسبه آبشستگی برخوردار است. عمق بی‌بعد آبشستگی به قطر پایه تحقیق حاضر در جدول ۴ با روابط ارائه شده محققین مقایسه گردیده است. به‌طوری‌که در جدول مشخص است نتایج آزمایش‌های تحقیق، همخوانی خوبی را نشان می‌دهند.

مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی

شکل ۱۰ مقایسه نتایج تحقیق حاضر (رابطه پایه ۴۰ میلی‌متر) با روابط آبشستگی استخراج شده توسط محققینی چون لی و همکاران (۱۹۶۱)، جانسون (۱۹۹۶) و ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱) را نشان می‌دهد. با استفاده از روش‌های آماری ضریب همبستگی بین مقادیر به ترتیب ۰/۹۷٪، ۰/۹۵٪ و ۰/۹۹٪ در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشند. پراکندگی نقاط پیرامون خط

جدول ۴- مقایسه عمق بی‌بعد آبشستگی به قطر پایه تحقیق حاضر با روابط ارائه شده سایر محققین.

F_r	(تحقیق حاضر) d_s/D	(لی و همکاران) d_s/D	(جانسون) d_s/D	(ریچاردسون و دیویس) d_s/D
۰/۱۶	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۴۹
۰/۱۴	۰/۴۹	۰/۴۶۸	۰/۴۷۵	۰/۴۸
۰/۱۲	۰/۴۵	۰/۴۴۱	۰/۴۶	۰/۴۴۹
۰/۱۱	۰/۴۳	۰/۴۳۲	۰/۴۴۱	۰/۴۴۳



شکل ۱۰- مقایسه عمق بی‌بعد حاصل از نتایج تحقیق حاضر با روابط ارائه شده سایر محققین.

نتیجه‌گیری کلی

نسبی ۰/۸۶ عمق آبشستگی ۱۱/۷ درصد افزایش می‌یابد.

علاوه بر نتایج فوق، با استفاده از رگرسیون غیرخطی چند متغیره روابطی برای هر اندازه پایه جهت محاسبه عمق بی‌بعد آبشستگی به قطر پایه ارائه گردید. علاوه بر این مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی با هم مقایسه شدند، که تطابق نسبتاً مناسبی را نشان دادند. در ادامه، جمع‌آوری آمار صحرائی به منظور یافتن رابطه‌ای جامع و دقیق برای پیش‌بینی عمق آبشستگی متناسب با آمار واقعی انجام شد. با مقایسه نتایج بدست آمده از روابط و قضاوت مهندسی می‌توان گفت که از میان روابط ارائه شده، رابطه پیشنهادی پایه ۴۰ میلی-متری از دقت بالاتری نسبت به سایر روابط برخوردار می‌باشد. از این رو، پایه ۴۰ میلی‌متری به‌عنوان مقیاس مناسب در بین سایر پایه‌ها معرفی گردید. در نهایت رابطه مزبور با روابط ارائه شده توسط تنی چند از محققین مقایسه گردید که نشان می‌دهد این تحقیق می‌تواند روشی کارآمد برای تعیین کمینه قطر پایه پل مناسب در انجام دیگر کارهای آزمایشگاهی مشابه محسوب شود.

در این تحقیق، به منظور سنجش مقیاس پایه پل-های استوانه‌ای بر آبشستگی، با بررسی جامع مطالعه-های پیشین و انجام تحلیل ابعادی پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر پدیده آبشستگی شناسایی و آزمایش‌ها بر مبنای آن‌ها طرح ریزی شد.

نتایج نشان می‌دهند که: با افزایش سرعت نسبی جریان بر روی هر پایه، با تقویت جریان‌های گردابی حول پایه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. با افزایش ۱۰/۴ درصدی سرعت نسبی جریان از ۰/۸۶ به ۰/۹۵ عمق آبشستگی برای پایه ۲۰ میلی‌متری ۲۱/۱ درصد افزایش می‌یابد. از این رو، عدد فرود بالادست پایه‌های پل در ایجاد آبشستگی از اهمیت خاصی برخوردار است.

هم چنین با افزایش قطر پایه پل‌های استوانه‌ای، بعثت کاهش مقطع عرضی جریان و ایجاد منطقه گردابی پرفشار وسیع و شسته شدن بیش‌تر رسوب‌های حول پایه و انتقال آن‌ها به پشت پایه، عمق آبشستگی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با افزایش ۶۶/۶ درصدی قطر پایه از ۳۰ به ۵۰ میلی‌متر، در سرعت

منابع مورد استفاده

بی‌نام، ۱۳۹۰. راهنمای روش‌های محاسبه آبخستگی موضعی (نشریه شماره ۵۴۹). معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، تهران.

شفاعی بجستان م، ۱۳۸۷. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

مشکواتی تروجنی ج، صانعی م، مسعودیان م و ضیاء تبار احمدی م، ۱۳۹۰. تأثیر اندازه قطر پایه در آبخستگی موضعی اطراف پایه پل، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Breusers HNC, Niccollet G and Shen HW, 1997. Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research* 15(3): 211-252.

Breusers HNC and Raudkivi A, 1991. *Scouring. Hydraulic Structures Design Manual* Balkema Pub., Rotterdam, Netherlands.

Chang W, Lai J and Yen C, 2004. Evolution of scour depth at circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 130(9): 905-913.

Chiew YM and Melville BW, 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research* 25(1): 15-26.

Chow VT, 1989. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co, New York, N.Y.

Ettema R, 1980. Scour at bridge piers. Rep.No 216, University of Auckland, School of Engineering. New Zealand.

Jonson PA, 1996. Comparison of pier-scour equations using field data. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 121(8): 626-629.

Lee SO, Seungh K and Sturm TW, 1961. Comparison of laboratory and field measurements of bridge pier scour. U.S. Geological Survey, 3039 Mailers Road Atlanta, GA 30360-2824 USA.

Lee SO 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, 1997. Pier and abutment scour. Integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 132(2): 125-136.

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 Coleman SE, 2000. *Bridge Scour*. Water Resources Publication, Colo.

Melville BW and Sutherland A, 1998. 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 A and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 109(3): 338-350.

Richardson EV, 1991. Bridge scour. Pp. 1-40. *Proceeding of the Bridge Scour Symposium*. Hydraulic Engineering National Conference ASCE.

Richardson EV and Davis SR, 2001. Evaluating scour at bridges. *Journal of Hydraulic Engineering Circular* 18(1): 323-340.

Sheppard D, Odeh M and Glasser T, 2006. Large scale clear-water local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 130(10): 957-963.