

## کنترل آبشستگی موضعی پایه‌پل با استفاده از مواد نانو ساختار

احسان قاسمی<sup>۱</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۲\*</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۲</sup>، امیر احمد دهقانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۵

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: zahiri@gau.ac.ir

### چکیده

آبشستگی موضعی یکی از دلایل عمده عدم پایداری پل‌ها و در نهایت شکست آن‌ها می‌باشد. بنابراین علاوه بر بحث پایداری، تخمین عمق آبشستگی در مجاورت پایه‌ها نیز دارای اهمیت است. راهکارهای زیادی به‌منظور کاهش عمق آبشستگی پایه‌پل‌ها ارائه شده است. در این پژوهش از یک راه‌حل غیرسازه‌ای و دوست‌دار محیط زیست برای کاهش عمق آبشستگی پایه‌پل‌ها استفاده شده است. مواد نانو ساختار به دلیل دارا بودن خاصیت ضد آب، می‌توانند برای کاهش آبشستگی کاربرد داشته باشند. برای دستیابی به اهداف پژوهش، رسوب بستر اطراف پایه‌پل با نوعی ماده نانو ساختار به نام نانورس مخلوط شد. آزمایش‌ها بر روی یک پایه‌پل استوانه‌ای واقع در یک کانال مستطیلی و در شرایط جریان ماندگار انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی حدود ۵۸/۳٪ در دبی جریان بیشینه (۱۶ لیتر بر ثانیه) با اختلاف زیاد نسبت به سایر مقادیر دبی جریان اتفاق افتاده است. در این دبی جریان، عمق بیشینه آبشستگی به دلیل وجود مواد نانو ساختار از ۶۰ میلی‌متر به حدود ۲۵ میلی‌متر کاهش یافته است. کمینه کاهش عمق آبشستگی با حدود ۴۱/۶ درصد در کوچکترین دبی جریان (۴ لیتر بر ثانیه) به‌دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، پایه‌پل، جریان ماندگار، مواد نانو ساختار

## Controlling Local Scouring Around Bridge Pier using Nano-Structured Materials

E Ghasemi<sup>1</sup>, A Zahiri<sup>2\*</sup>, M Meftah<sup>2</sup>, AA Dehghani<sup>2</sup>

Received: 05 January 2016 Accepted: 05 March 2017

<sup>1</sup>-M.Sc. Graduate of Water Structures, Gorgan Univ., of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

<sup>2</sup>-Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Soil and Water Engin., Gorgan Univ. of Agric. Sciences and Natural Resources, Iran

\*Corresponding Author, Email: zahiri.areza@gmail.com

### Abstract

Local scour is one of the main drivers of instability and failure of bridge piers. Therefore, in addition to the stability issue, the scour depth reduction is also important. Numerous solutions have been presented for scour depth reduction. In this study, a new idea environmentally-friendly and non-structural approach has been introduced for bridge pier scour depth reduction. Nano-structured materials are waterproof, they can be used for scouring reduction in alluvial beds. For achievement of research aims, the bed sediment around the bridge pier was mixed with some nano-structured material called nanoclay. The experiments were carried out in a laboratory flume under steady conditions on a cylindrical bridge pier. The obtained results showed that, the highest scour depth reduction percentage (58.3%) occurred for the largest flow discharge ( $16 \text{ L s}^{-1}$ ) by a large difference compared to other values of flow discharge. In this case, the scour depth was decreased from 60mm to 25mm due to presence of nano-structured material. The lowest percentage of scour depth reduction was nearly 41.6 for the minimum flow discharge ( $4 \text{ L s}^{-1}$ ).

**KeyWords:** Bridge pier, Local scour, Nano-structured materials, Steady flow

### مقدمه

اطراف سازه‌های رودخانه‌ای از قبیل پایه‌پل‌ها به حرکت درآمده و باعث خالی شدن فضای اطراف این پایه‌ها می‌شود (ریچاردسون و دیویس ۲۰۰۱).

همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی آن‌ها تخریب می‌شود. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل یکی از عوامل اصلی تخریب پل‌ها است (ملویل و هدفیلد ۱۹۹۹). به همین دلیل روش‌های مناسب برای کاهش و کنترل عمق آبشستگی مورد توجه بسیاری از محققان بوده است.

رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های حوضه‌های آبریز می‌باشند. در حوضه‌های آبریز فرآیندهای متفاوتی اتفاق می‌افتند که بارش-رواناب، فرسایش اراضی و سایر اقدامات بشری از جمله این فرآیندها می‌باشند. انتقال رسوب حوضه به رودخانه‌ها از طریق رواناب باعث مشکلات عدیده‌ای برای سیستم رودخانه‌ها و سازه‌های احداث شده در آن می‌شود. با وقوع سیلاب و افزایش قابل توجه دبی و نیز سرعت جریان، مواد رسوبی از بستر و کناره‌های رودخانه و نیز از

عرض پایه بر عمق بیشینه آبشستگی را مورد مطالعه قرار دادند. هانکو (۱۹۷۱) و بروسرز و همکاران (۱۹۷۷) یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر پدیده آبشستگی یعنی دبی جریان را مورد بررسی قرار دادند. تاکنون روش‌های زیادی برای کنترل آبشستگی در محل پایه‌های پل ارائه شده است. ورمن (۱۹۸۹) و لوچلان و ملویل (۲۰۰۱) تاثیر پوشش سنگ‌چین، کومار (۱۹۹۶) اثر طوقه و ملویل و هادفیلد (۱۹۹۹) تاثیر شمع‌های حفاظتی را بر کنترل و کاهش عمق آبشستگی پایه‌پل‌ها بررسی نمودند. چپو (۱۹۹۲) برای اولین بار استفاده از شکاف در پایه‌های پل را برای کنترل آبشستگی مطرح نمود. آزمایش‌های این محقق نشان داد که ابعاد شکاف و نیز موقعیت آن در کاهش عمق آبشستگی در بیشترین حالت تا ۲۰ درصد مؤثر می‌باشند. کومار و همکاران (۱۹۹۹) نیز تأثیر شکاف در پایه‌پل بر کاهش عمق آبشستگی را بررسی نمودند. به‌طور کلی این روش‌ها باعث ایجاد مشکلاتی مانند ناپایداری سازه، اختلال در شرایط هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه و مهم‌تر از آن اختلال در محیط زیست رودخانه خواهند شد. به همین دلیل در این پژوهش سعی شده است راه حل بهینه‌ای بر اساس کمینه‌سازی این مشکلات برای کاهش عمق آبشستگی پایه‌پل‌ها ارائه شود. به این منظور، به عنوان یک ایده جدید از مواد نانوساختار (نانورس) برای کاهش عمق بیشینه آبشستگی استفاده شده است. مواد نانو که در اندازه  $10^{-9}$  متر می‌باشند، کاربرد گسترده‌ای در علوم مختلف مهندسی داشته‌اند. در نتایج تحقیقاتی که در زمینه اختلاط مواد نانوساختار با بتن منتشر شده است به تأثیر این مواد در افزایش مقاومت بتن و کاهش نفوذپذیری آن اشاره شده است (چانگ و همکاران ۲۰۰۲). با توجه به این‌که بیشینه عمق آبشستگی موضعی در محل پایه‌های پل در شرایط جریان ماندگار اتفاق می‌افتد، در این پژوهش برای بررسی اثر کاربرد مواد نانوساختار رس بر کاهش عمق آبشستگی در محل پایه‌پل، شرایط جریان به‌صورت ماندگار در نظر گرفته شده است.

این روش‌ها در دو دسته مقابله با فرسایش و از بین بردن عامل فرسایش به کاررفته‌اند. در دسته اول، با به-کارگیری مواد و مصالح مختلف مثل انواع سنگ‌چین‌ها یا سنگریزه‌های حفاظتی در اطراف پایه‌پل، از حرکت ذرات بستر در محل سازه جلوگیری می‌شود. در راه‌کار دوم، حذف عوامل فرسایش‌دهنده مثل جریان‌های ثانویه و گرداب‌های نعل اسبی در مجاورت پایه‌پل مورد توجه قرار می‌گیرند (ملویل و ساترلند، ۱۹۸۸).

پارامترهای هندسی و هیدرولیکی زیادی بر شدت و وضعیت آبشستگی در محل پایه‌پل‌ها تأثیرگذار هستند. فرهلیچ (۱۹۸۹) به بررسی اثر شکل پایه‌پل بر مقدار عمق بیشینه آبشستگی پرداخته و شکل پایه را عاملی مهم و مؤثر بر عمق آبشستگی دانست. ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱) بر اساس متغیرهای هیدرولیکی و شکل پایه، رابطه مهمی را برای تعیین عمق آبشستگی در محل پایه‌پل ارائه نمودند. با توجه به اعتبار زیاد این رابطه، از آن در مدل‌های ریاضی نیز استفاده می‌شود. بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱) اثر زاویه برخورد جریان با پایه‌پل را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش زاویه برخورد جریان، موقعیت بیشینه عمق آبشستگی در امتداد کناره‌های پایه از سمت جلو به سمت پشت و انتهای پایه جابه‌جا می‌شود. چپو و ملویل (۱۹۸۷)، آلابی (۲۰۰۶) و نیز ارونقی و همکاران (۱۳۸۵) شدت تنگ‌شدگی عرض کانال در محل احداث پل بر میزان عمق بیشینه آبشستگی را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که انقباض و تنگ‌شدگی در مسیر آبراهه باعث افزایش قدرت فرسایش و انتقال رسوب بر روی بستر آبراهه شده و پایین‌افتادگی سطح بستر آبراهه را به دنبال خواهد داشت. کانداسامی (۱۹۸۹) و اتما و همکاران (۲۰۰۶) اثر عمق جریان بر وضعیت آبشستگی در محل پایه‌ها و نیز نحوه و نوع گردابه‌های ایجاد شده در این محل را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که در نسبت‌های کوچک عمق جریان به قطر پایه، عمق آبشستگی متأثر از عمق جریان می‌باشد، در حالی‌که در نسبت‌های متوسط، عمق آبشستگی متأثر از عمق جریان و اندازه پایه است. بروسرز (۱۹۷۷) و رادکیوی (۱۹۸۶) اثر

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی پدیده‌های فیزیکی امکان کاربرد و تعمیم نتایج آزمایشگاهی را برای نمونه واقعی یا طبیعی فراهم می‌نماید. از این‌رو در این پژوهش تعدادی از این پارامترها که تأثیر بیشتری بر آبشستگی دارند، انتخاب شده است. این پارامترها شامل هندسه پایه، مشخصات جریان، خواص سیال و خصوصیات رسوب می‌باشند. بنابراین عمق بیشینه آبشستگی با تابع زیر قابل بیان است:

$$d_s = f(Q, v, V, y, g, \rho, d_{50}, \sigma_g, \rho_s, V_c, D, Al, t) \quad [1]$$

که  $d_s$  عمق بیشینه آبشستگی،  $Q$  دبی جریان،  $\rho$  و  $v$  به ترتیب چگالی و لزجت سینماتیکی سیال،  $V$  سرعت متوسط جریان در بالادست پایه،  $y$  عمق جریان بالادست،  $g$  شتاب گرانشی،  $d_{50}$  و  $\sigma_g$  به ترتیب قطر میانه و انحراف معیار هندسی توزیع اندازه رسوبات،  $\rho_s$  چگالی رسوبات،  $V_c$  سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر،  $D$  قطر پایه،  $Al$  امتداد زاویه جریان نسبت به پایه‌پل،  $t$  زمان و  $f$  نشان‌دهنده تابع است. با استفاده از روش باکینگهام و با فرض ثابت بودن چگالی نسبی رسوبات، معادله فوق به صورت زیر

خلاصه می‌شود:

$$\frac{d_s}{Da} = f\left[\frac{v}{V_c}, \frac{y}{D}, \frac{V^2}{gD}, \frac{VD}{v}, \frac{D}{d_{50}}, \sigma_g, \frac{Vt}{D}, Al\right] \quad [2]$$

از آن‌جا که در این تحقیق پارامترهای  $\frac{D}{d_{50}}$ ،  $\frac{V}{V_c}$ ،  $\sigma_g$ ،  $AL$  و  $t$  ثابت در نظر گرفته شده‌اند، معادله فوق به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$\frac{d_s}{D} = f\left[\frac{y}{D}, \frac{V^2}{gD}, \frac{VD}{v}\right] \quad [3]$$

که عبارت  $\frac{V^2}{gD}$  عدد فرود پایه ( $Fr_b$ ) و عبارت  $\frac{VD}{v}$  عدد رینولدز پایه‌پل ( $Re$ ) است.

روابط تجربی تخمین عمق بیشینه آبشستگی

روابط تجربی زیادی توسط محققان مختلف برای تخمین عمق بیشینه آبشستگی در محل پایه‌پل در شرایط جریان یکنواخت و ماندگار ارائه شده است. در این پژوهش نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با نتایج روابط تجربی جدول ۱ مقایسه شده است که در این روابط عبارت ( $Fr_1$ ) عدد فرود جریان است.

جدول ۱- روابط تجربی تخمین عمق بیشینه آبشستگی مورد استفاده در این پژوهش.

شماره رابطه	محقق (محققان)	رابطه
[۴]	لارسن (۱۹۵۸)	$\frac{y_s}{D} = 1.34 \sqrt{\frac{y}{D}}$
[۵]	نیل (۱۹۶۴)	$\frac{y_s}{D} = 1.5 \left(\frac{y}{D}\right)^{0.3}$
[۶]	شن (۱۹۶۹)	$\frac{y_s}{D} = 2.34 \left(\frac{y}{D}\right)^{0.381} Fr_1^{0.619} y^{-0.06}$
[۷]	بروسرز (۱۹۷۷)	$\frac{y_s}{D} = 2 \tanh\left(\frac{y}{D}\right) K_s K_\theta$
[۸]	ریچاردسون و همکاران (۱۹۸۳)	$\frac{y_s}{y_1} = 2 K_1 K_2 \left(\frac{D}{y_1}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43}$
[۹]	ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱)	$\frac{y_s}{D} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{y_1}{D}\right)^{0.35} Fr_1^{0.43}$
[۱۰]	بریاد و همکاران (۲۰۰۴)	$y_s = 0.18 K_w K_{SP} K_\theta \left(D \frac{V}{v}\right)^{0.6}$

سانتی‌متر انجام شد. یک دریچه کشویی در انتهای کانال به منظور کنترل ارتفاع آب آن در نظر گرفته شد. هم‌چنین در انتهای فلوم نیز جریان به یک مخزن خروجی که به منظور اندازه‌گیری حجمی دبی جریان تعبیه شده است وارد می‌شود. در شکل ۱ مقطع طولی فلوم و پایه درون آن نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، کف کانال از فاصله ۳ متر از ورودی با استفاده از سکوی فلزی تا ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بالا آورده شده است. در بخش میانی این کانال به طول حدود ۳ متر، کف کانال از رسوبات ماسه پوشش داده شد تا برای آزمایش‌های آبشستگی آماده شود. این قسمت محل نصب پایه‌پل است که با توجه به معیارهای لازم برای آزمایش‌های آبشستگی موضعی، قطر این پایه استوانه‌ای ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شیب طولی کانال برای تمامی آزمایش‌ها مقدار ثابت ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد.

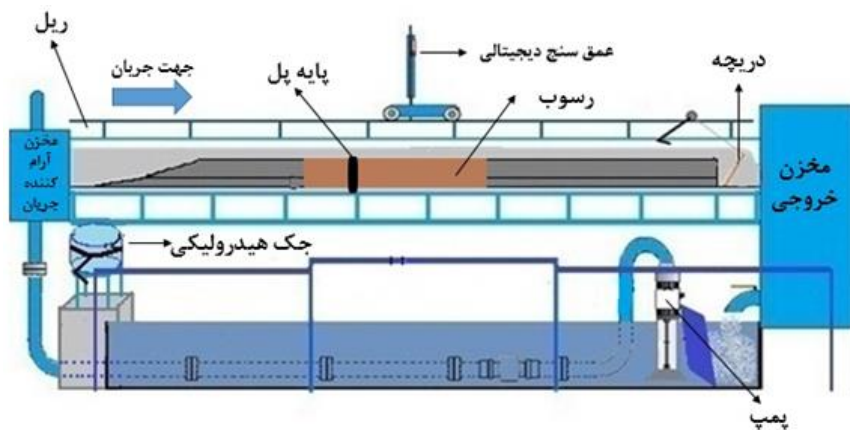
به منظور ارزیابی دقت نتایج این روابط از دو شاخص آماری  $RMSE$  و  $MAE$  که به ترتیب جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق می‌باشند، استفاده شده است. این معیارها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_{obs} - P_{com})^2}{N}} \quad [11]$$

$$MAE = \frac{\sum \frac{|P_{obs} - P_{com}|}{P_{abs}} \times 100}{N} \quad [12]$$

که  $P_{obs}$  پارامتر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه،  $P_{com}$  پارامتر به دست آمده از روابط تجربی و  $N$  تعداد داده‌های مورد بررسی است.

تجهیزات و مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و در یک کانال مستطیلی از جنس پلکسی-گلاس به طول ۹/۵ متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰



شکل ۱- مقطع طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در پژوهش حاضر و اجزاء آن.



شکل ۲- دستگاه تنظیم فرکانس دبی جریان.

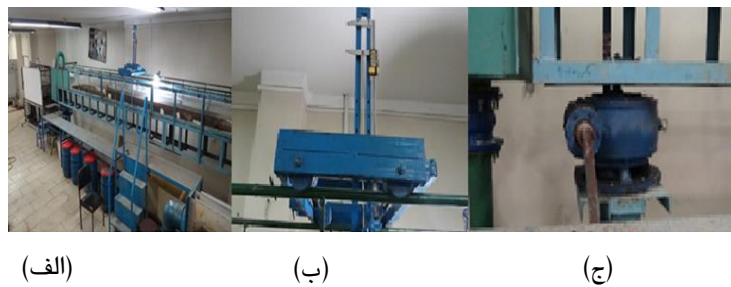
در شکل ۳-الف نمایی از کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است. برای برداشت عمق حفره آبشستگی

از آنجا که یکی از مهم‌ترین پارامترهای جریان در مجاری روباز، دبی جریان (یا عدد فرود) است، بنابراین تنظیم و کنترل دبی جریان دارای اهمیت زیادی است. در این پژوهش از دستگاهی استفاده شد که با تغییر فرکانس پمپ، دبی مورد نظر قابل تغییر و تثبیت بود. این وسیله به گونه‌ای بود که دور پمپ را در هر دبی با فرکانس‌های مورد نظر تنظیم می‌کرد (شکل ۲).

### مشخصات ذرات رسوبی بستر

مطابق تحقیقات رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)، به منظور جلوگیری از تشکیل ریپل در بستر آبرفتی کانال و نیز حذف تأثیر چسبندگی ذرات رسوبی بر فرایند آبخستگی، اندازه میانه قطر ذرات باید بزرگتر از  $0.7$  میلی‌متر باشد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اگر نسبت قطر پایه به قطر میانه ذرات بستر ( $D/d_{50}$ ) بزرگتر از  $25-20$  باشد، علاوه بر جلوگیری از تشکیل ریپل، اثر رسوبات بر عمق آبخستگی نیز حذف خواهد شد. از طرف دیگر طبق توصیه چپو و ملویل (۱۹۸۷)، برای جلوگیری از اثر جداره کانال بر میزان آبخستگی، بیشینه قطر پایه باید  $10$  درصد عرض کانال باشد.

ایجاد شده در محل پایه‌پل از یک ترازنسج دیجیتالی با دقت  $0.1$  میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۳-ب). عمق حفره آبخستگی در محل پایه‌پل در فواصل زمانی مشخص تا پایان مدت آزمایش اندازه‌گیری شد. با توجه به تغییرات شدید عمق آبخستگی نسبت به زمان در زمان‌های اولیه آزمایش، برداشت‌ها در فواصل زمانی کوتاه ( $2$  دقیقه‌ای،  $5$  دقیقه‌ای،  $10$  دقیقه‌ای) به مدت  $8$  ساعت ثبت شدند. برای تعیین نحوه گسترش طولی و عرضی حفره آبخستگی در اطراف پایه‌پل در انتهای هر آزمایش تمام پروفیل بستر با استفاده از دستگاه ترازنسج دیجیتالی برداشت گردید. در شکل ۳-ج نیز جک هیدرولیکی تنظیم‌کننده شیب طولی فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۳-الف) کانال آزمایشگاهی، ب) عمق‌سنج دیجیتالی و ج) جک هیدرولیکی.

غیریکنواختی دانه‌های رسوب قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد (شفاعی بجستان ۱۳۸۴).

### خواص و ویژگی‌های مواد نانو

نخستین مطالعات در زمینه کاربردهای نانوفناوری در مهندسی عمران به دهه ۱۹۹۰ میلادی باز می‌گردد. نانو ساختار، به هر ماده‌ای که در کمترین حالت یکی از ابعاد آن در مقیاس نانومتری (کوچکتر از  $100$  نانومتر) باشد اطلاق می‌شود (بروک ۱۹۷۷). نانو تکنولوژی در حقیقت توانمندی تولید مواد، ابزارها و سیستم‌های جدید با در نظر گرفتن کنترل در سطح مولکولی و اتمی است. اضافه نمودن پاره‌ای از افزودنی‌ها به خاک، به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود برخی از پارامترهای رفتاری خاک مانند رابطه تنش کرنش- مقاومت، نفوذپذیری و خودترمیمی به‌ویژه در بعضی از سازه-

هم‌چنین بر اساس نظریه رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)، نسبت عرض کانال به قطر پایه باید بزرگتر از  $6/25$  باشد. طبق تحقیقات انجام گرفته در صورتی که نسبت  $(D/d_{50})$  بین  $30$  تا  $70$  باشد، بیشینه آبخستگی به دست می‌آید (بروسرز و همکاران ۱۹۷۷). در این مطالعه با توجه به قطر پایه و دلایل فوق، ماسه با قطر متوسط  $0.9$  میلی‌متر انتخاب گردید. در این حالت، هم بیشینه عمق آبخستگی به دست می‌آید و هم از ایجاد پشته‌های کوچک (ریپل) جلوگیری می‌شود. در صورت تشکیل این پشته‌ها، بستر در بالادست حرکت می‌کند. با ورود رسوب به درون حفره آبخستگی، عمق آبخستگی کم شده و شرایط آبخستگی آب زلال اتفاق نمی‌افتد. مقدار انحراف معیار با استفاده از منحنی دانه‌بندی برابر  $1/45$  به دست آمده است. در چنین حالتی (کمتر از  $1/5$ ) اثر



شکل ۴- نمونه مواد نانو ساختار مورد استفاده در پژوهش حاضر.

#### تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها

چیو (۱۹۹۲) و زراتی و همکاران (۲۰۰۴) زمان تعادل را مدت زمانی تعریف کردند که تغییر در عمق آبخستگی در یک بازه زمانی ۸ ساعته، کمتر از ۱ میلی-متر باشد. میا و ناگو (۲۰۰۳) زمان تعادل را هنگامی دانستند که در طول یک ساعت از فرایند آبخستگی، تغییر عمق آبخستگی به کمتر از یک میلی‌متر برسد. در این پژوهش از معیار چیو استفاده گردید. به منظور تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، آزمایش با پایه استوانه-ای ب مدت ۴۸ ساعت و در شرایط جریان ماندگار و دبی ۱۶ لیتر بر ثانیه و  $v/v_c = 0.94$  انجام شد و در طول آزمایش تغییرات عمق آبخستگی پایه پل برداشت شد. با توجه به داده‌های به دست آمده و این که حدود ۹۰ درصد آبخستگی در حدود ۸ ساعت اول اتفاق افتاد، بقیه آزمایش‌ها به مدت ۸ ساعت انجام شد.

#### نحوه انجام آزمایش‌ها

بعد از قرار دادن پایه پل در محل مورد نظر، مصالح بستر اطراف پایه کاملاً زهکش شده، سپس سطح رسوبات با استفاده از ترازسنج بدون اینکه هیچ گونه فشار و تراکمی بر رسوب وارد شود کاملاً تراز - شد. آزمایش‌ها به دو بخش آزمایش‌های شاهد (رسوب بستر بدون مواد نانو) و آزمایش‌های اصلی (رسوب بستر با مواد نانو) تقسیم شدند. در آزمایش‌های اصلی با استفاده از قالبی که تهیه شده بود، ابتدا لایه‌های نانو در ترازهای مختلف رسوب اطراف پایه ریخته شد، سپس اقدام به تراز سطح رسوبات گردید.

های ژئوتکنیکی نظیر سدهای خاکی، خاکریزهای جاده-ای، شیروانی‌های مصنوعی، مراکز دفن زباله و ... همواره مد نظر بوده است. در کنار آن، نانومواد که حائز ویژگی‌های منحصر به فردی هستند و استفاده از آن‌ها در دیگر شاخه‌های علوم مهندسی منجر به تحولاتی بنیادین شده است، در مهندسی آب کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی، دو خاصیت مهم برای موفقیت نانو رس‌ها در استحکام محسوب می‌شود (غفارپور جهرمی و همکاران ۱۳۹۰). با جداسازی صفحات رس از یکدیگر، نانو رس به وجود می‌آید که دارای سطح ویژه و فعال بسیار بزرگی است. این سطح بزرگ و فعال باعث می‌شود همواره اندرکنش شدیدی بین نانو رس و محیط اطرافش وجود داشته باشد. در این پژوهش از یک نوع نانورس با عنوان تجاری cloisite-15A استفاده شده است که مشخصات آن با توجه به اطلاعات شرکت تولید کننده در جدول ۲ آمده است. تصویری از این مواد که به صورت پودری سفید رنگ است در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات ظاهری ماده نانو رس مورد استفاده در این پژوهش.

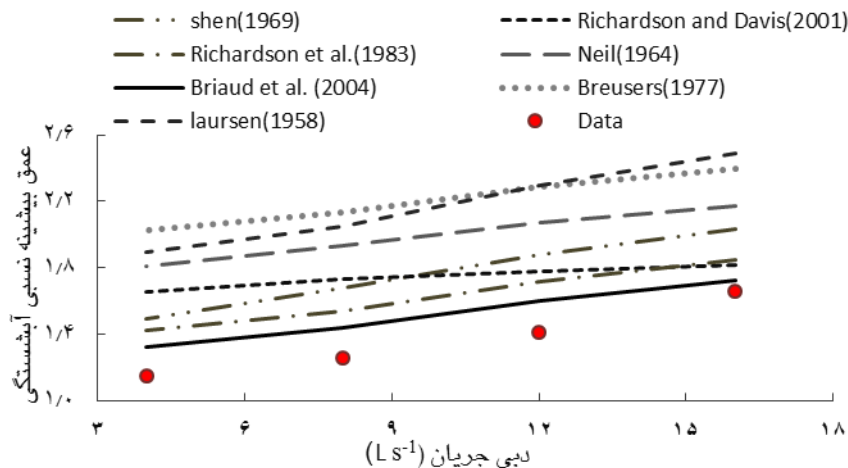
نام	CLOISITE-15A
املاح آلی	MT2EtOH
عنصر	مونت موریونیت
آنیون	کلراید
سطح ویژه	9400m <sup>2</sup> /g
IXRD	d'=31.5Å
محدوده خمیری	۸۸/۲
آب درون بافتی	<۲%
وزن از دست رفته	۳۰%
در اثر سوختن	
۱۰٪	<۲µm
۵۰٪ قطر	<۶µm
۹۰٪	<۱۳µm

## نتایج و بحث

### ارزیابی دقت روابط تخمین عمق بیشینه آبشستگی در آزمایش‌های شاهد

جریان بالا از دقت بسیار مناسب‌تری برخوردار است. با توجه به بحرانی بودن فرآیند آبشستگی پایه‌پل‌ها در شرایط دبی‌های بالا (جریان سیلابی)، دقت مناسب‌تر رابطه بریاد و همکاران (۲۰۰۴) در دبی‌های بالاتر جالب توجه است. از میان روابط مورد بررسی، رابطه لارسن (۱۹۵۸) دارای بیشترین خطا می‌باشد. بر اساس محاسبه شاخص‌های آماری، رابطه بریاد و همکاران (۲۰۰۴) با جذر مربعات خطای حدود ۰/۱۳۵ و میانگین مطلق خطای ۸/۲ درصد، دارای بیشترین دقت است. این در حالی است که مقادیر فوق‌الذکر برای رابطه لارسن به ترتیب حدود ۰/۷۷۸ و ۵۱/۴ درصد می‌باشد.

با توجه به وجود روابط فراوان برای تخمین عمق آبشستگی در محل پایه‌پل، داده‌های آزمایشگاهی عمق نسبی بیشینه آبشستگی در آزمایش‌های شاهد در این پژوهش با نتایج برخی از روابط محققان مقایسه شده است. این نتایج در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج رابطه تجربی بریاد و همکاران (۲۰۰۴) دارای بیشترین مطابقت با داده‌های آزمایشگاهی است. اگرچه خطای این رابطه در دبی‌های جریان کم، حدود ۱۳ درصد است، اما در دبی‌های



شکل ۵- مقایسه روابط تخمین عمق بیشینه نسبی آبشستگی با داده‌های آزمایشگاهی در آزمایش‌های شاهد.

حالت نیز تقریباً مشابه حالت بدون استفاده از مواد نانو ساختار بوده و با افزایش دبی جریان، مقدار بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش یافته است. نکته جالب توجه در این نتایج این است که استفاده از مواد نانورس باعث کنترل مؤثر عمق بیشینه آبشستگی شده است به طوری که در تمامی دبی‌های جریان (به جز در حالت دبی ۴ لیتر بر ثانیه)، عمق نسبی آبشستگی تقریباً ثابت مانده است. این مسأله اثر این مواد را در تقویت مؤثر ساختار مقاومت لایه‌های خاک اطراف پایه‌پل نشان می‌دهد که حتی با افزایش دبی جریان (از ۸ به ۱۶ لیتر بر ثانیه) و افزایش تنش برشی، عمق آبشستگی تغییری نداشته است. این در حالی است که در حالت بدون مواد نانو،

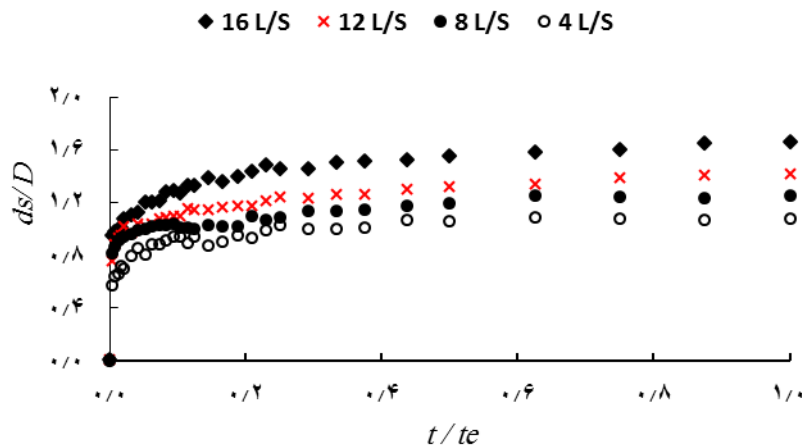
شکل ۶ تغییرات زمانی عمق نسبی آبشستگی در پایه استوانه‌ای در ۴ دبی جریان مختلف را در آزمایش‌های شاهد نشان می‌دهد. در این شکل، محور قائم نسبت بی‌بعد عمق بیشینه آبشستگی به قطر پایه و محور افقی نسبت بی‌بعد زمان موردنظر به زمان کل آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی دبی‌های جریان، نرخ تغییر عمق آبشستگی با افزایش زمان کاهش یافته تا به کمترین میزان در زمان تعادل می‌رسد. همچنین با افزایش میزان دبی جریان، مقدار بیشینه عمق آبشستگی افزایش پیدا نموده است.

همین نتایج برای آزمایش‌های اصلی در شکل ۷ نشان داده شده است. روند تغییرات آبشستگی در این

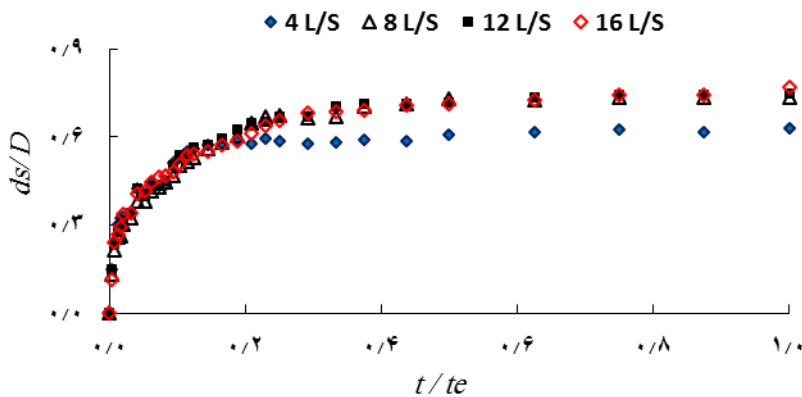


است. به‌طورکلی نتایج بدست آمده حاکی از این است که میزان اثر مواد نانوساختار در دبی‌های جریان مختلف، متفاوت است به‌طوری‌که در محدوده دبی‌های بالای جریان (دبی‌های ۸ تا ۱۶ لیتر بر ثانیه در این آزمایش‌ها) این تأثیر بسیار قابل توجه بوده و برای دبی‌های کم (۴ لیتر بر ثانیه) این تأثیر چندان زیاد نیست.

عمق نسبی آبخستگی آزمایشگاهی در دبی‌های جریان ۸ و ۱۶ لیتر بر ثانیه به‌ترتیب حدود ۱/۲۶ و ۱/۶۶ به-دست آمده است که حدود ۳۲ درصد افزایش عمق نسبی آبخستگی است. همچنین نتایج شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان از ۴ به ۸ لیتر بر ثانیه، عمق نسبی آبخستگی افزایش یافته است که به‌نوعی تأثیر کم مواد نانوساختار بر کاهش عمق آبخستگی



شکل ۶- تغییرات زمانی عمق نسبی آبخستگی در محل پایه در دبی‌های مختلف جریان (آزمایش‌های شاهد).



شکل ۷- تغییرات زمانی عمق نسبی آبخستگی در آزمایش‌های با حضور ماده نانوساختار.

است، درصد کاهش عمق بیشینه آبخستگی ناشی از اختلاط مواد نانورس با مصالح بستر با افزایش دبی جریان، افزایش یافته است.

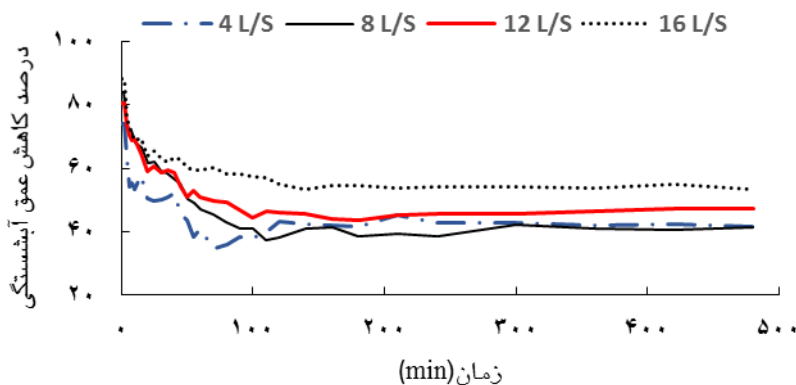
مقادیر عمق بیشینه آبخستگی در حالت شاهد و همچنین در حالت حضور مواد نانورس در جدول ۳ ارائه شده است. درصد کاهش عمق بیشینه آبخستگی هم در این جدول ذکر شده است. همان‌طور که مشخص

جدول ۳- درصد کاهش آبشستگی در محل پایه پیل در حالت استفاده از مواد نانو در دبی‌های مختلف جریان.

دبی جریان ( $Ls^{-1}$ )	عمق بیشینه آبشستگی (mm)		درصد کاهش عمق بیشینه آبشستگی
	حالت شاهد	با حضور مواد نانورس	
۱۶	۵۸/۰۳	۲۷/۰۲	۵۳/۴۷
۱۲	۴۹/۵	۲۶/۰۹	۴۷/۲۹
۸	۴۴/۰۳	۲۵/۷۳	۴۱/۵۶
۴	۳۷/۶	۲۱/۹۸	۴۱/۵۴

درصد در ابتدای آزمایش و کمترین مقدار آن، حدود ۵۳/۵ درصد در انتهای آزمایش (شرایط تعادلی آزمایش) بوده است. کمترین تأثیر کاربرد مواد نانوساختار در کمینه دبی جریان (یعنی ۴ لیتر بر ثانیه) اتفاق افتاده که حدود ۴۱/۶ درصد بوده است. تقریباً همین مقدار کاهش در دبی جریان ۸ لیتر بر ثانیه نیز اتفاق افتاده است.

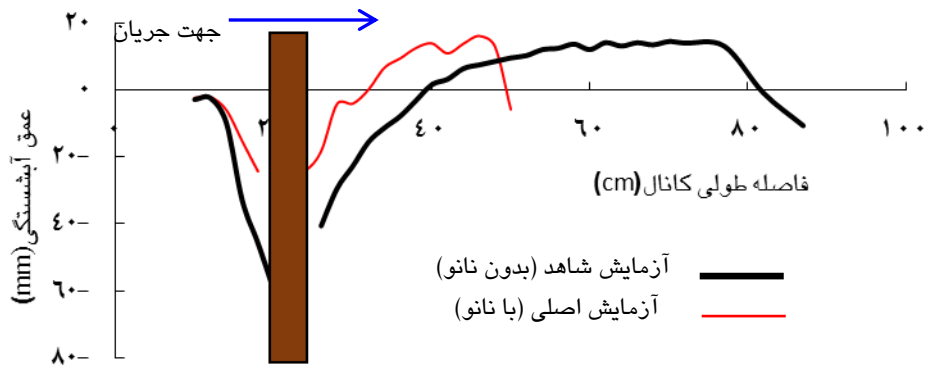
برای تحلیل بهتر نتایج فوق، تغییرات زمانی درصد کاهش عمق آبشستگی ناشی از کاربرد مواد نانوساختار برای تمامی دبی‌های جریان مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۸ نشان داده شده است. این شکل به وضوح نشان می‌دهد که بیشترین درصد کاهش آبشستگی با اختلاف زیاد نسبت به دبی‌های دیگر، در دبی بیشینه جریان (یعنی ۱۶ لیتر بر ثانیه) اتفاق افتاده است. بیشترین کاهش در این دبی جریان، حدود ۸۸



شکل ۸- تغییرات زمانی درصد کاهش عمق آبشستگی ناشی از کاربرد مواد نانورس.

است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این دبی جریان، با کاربرد مواد نانوساختار، عمق آبشستگی از حدود ۶۰ میلی‌متر به حدود ۲۵ میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین طول آبشستگی در پایین دست پایه نیز از حدود ۴۰ سانتی‌متر به ۳۰ سانتی‌متر محدود شده است.

در شکل ۹ وضعیت پروفیل عمق آبشستگی بستر کانال در دو حالت آزمایش شاهد و اصلی برای دبی بیشینه جریان (دبی ۱۶ لیتر بر ثانیه) ارائه شده



شکل ۹- مقایسه پروفیل طولی آبشستگی در آزمایش‌های شاهد و اصلی در دبی جریان ۱۶ لیتر بر ثانیه.

حدود ۲۷ میلی‌متر کاهش یافته است که بیانگر حدود ۵۳/۵ درصد کاهش می‌باشد. همچنین در این دبی جریان، محدوده آبشستگی از حدود ۲۰ سانتی‌متر در پایین‌دست پایه‌پل به حدود ۱۰ سانتی‌متر کاهش یافته است. در دبی کمینه جریان، اثر کاربرد مواد نانورس در کاهش عمق بیشینه آبشستگی حدود ۴۱/۶ درصد به‌دست آمده است. این نتایج می‌تواند بیانگر موفقیت قابل ملاحظه مواد نانو ساختار در کنترل مکانیسم آبشستگی به‌ویژه در دبی‌های سیلابی باشد که بحرانی‌ترین شرایط برای آبشستگی شدید بستر آبراهه در محل پایه پل بوده و احتمال تخریب این سازه بسیار بیشتر است. با توجه به این‌که مواد نانورس از جنس خاک می‌باشد، بنابراین این مواد از نظر زیست‌محیطی قابلیت سازگاری مناسبی با سیستم رودخانه و اکولوژی آن داشته و کاربرد آن قابل توصیه می‌باشد. همچنین انتظار می‌رود با افزایش غلظت مواد نانورس در بستر آبراهه، بتوان کارایی بهتری از این مواد در کاهش عمق بیشینه آبشستگی در محل سازه‌های هیدرولیکی مشاهده نمود. سپاسگزاری: این تحقیق مستخرج از طرح پژوهشی روش‌های کاربردی کاهش رسوب در حوضه‌های آبریز رودخانه‌های استان به شماره ۱-۱۴۴/۳۱۲ شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان است که از حمایت مالی آن شرکت تشکر می‌شود.

در شکل ۱۰ نمایی از وضعیت حفره آبشستگی در شرایط تعادلی آزمایش‌های این پژوهش را نشان می‌دهد. در این شکل، لایه سفیدرنگ مواد نانورس که اطراف پایه‌پل را از آبشستگی محافظت نموده است نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- نمایی از وضعیت حفره آبشستگی محافظت شده با مواد نانورس.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش اثر مواد نانو ساختار در کاهش عمق بیشینه آبشستگی در محل پایه‌پل استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی استفاده از مواد نانو سیلیس با غلظت ۱ درصد و در چهار دبی جریان متفاوت نشان داد که با افزایش دبی جریان، اثر مواد نانورس در کاهش عمق بیشینه آبشستگی افزایش می‌یابد. در دبی جریان بیشینه (دبی ۱۶ لیتر بر ثانیه)، بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به عدم استفاده از مواد نانورس اتفاق افتاده است. در این دبی جریان، عمق بیشینه آبشستگی از حدود ۵۸ میلی‌متر به

## منابع مورد استفاده

- Ghaffarpour Jahromi S, Ahmadi NA, Vossough S and Khodaii A. 2011. Effect of nanoclay and precipitated calcium carbonate to improve rheological properties of bitumen binder. *J Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad* 23(1):15-26.
- Hosseinzadeh dalir A, Fakherifard A, Frsadizadeh D and Arvanaghi H. 2006. Experimental investigation of canal side walls effect on scour depth around bridge piers. *Agricultural science* 2(16):1-11.
- Shafai Bajestan M. 2005. Shafae Bajestan, M. Theoretical and practical principals of sediment hydraulic. Shahid Chamran University of Ahvaz, page 586.
- Alabi PD, 2006. Time development of scour at bridge pier fitted with a collar. M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- Breusers NHC, Nicoolet G and Shen HW, 1977. Local scour around cylindrical piers. *J Hydraul Res* 15(3): 211-252.
- Breusers HNC, 1977. Local scour around cylindrical piers. *J Hydraul Res, IAHR* 15:211-215.
- Breusers NHC and Raudkivi AJ, 1991. Scouring. *Hydraulic Structures Design Manual, IAHR A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.*
- Briaud JL, Chen HC, Li Y, Nurtjahyo P, and Wang J, 2004. The SRICOS-EFA method for complex piers in fine grained soils. *J Geotech Geoenviron* 130(11):1180-1191.
- Brock JR, 1997. Nanoparticle synthesis: a key process in the future of nanotechnology. *Handbook of Nano structured materials: Science and Technology.* Gan-Moog Chow and Nina Ivanovna Noskova (Eds), Kluwer Academic Publisher, Boston.
- Chong KP and Garboczi EJ, 2002. Smart and designer structural material systems. *Progress in Structural Engineering and Materials* 4:417-430.
- Chiew YM and Mellville BW, 1987. Local scour around bridge piers. *J Hydraul Res*, 25(1):15-26.
- Chiew YM, 1992. Scour protection at bridge piers. *J Hydraul Eng* 118(11):1260-1269.
- Ettema R, Kirkil G and Muste M, 2006. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. *J Hydraul Eng* 132(1): 33-40.
- Froehlich DC, 1989. Local scour at bridge abutments. Pp. 13-18. National Conf. on Hydraulic Engineering, New Orleans, 14 August, USA.
- Hancu S, 1971. Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts. Pp. 299-313. 14<sup>th</sup> IAHR Congress, Delft, The Netherlands.
- Kandasamy JK, 1989. Abutment scour. Rep. No. 458, School of Eng., University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Kumar V, 1996. Reduction of scour around bridge piers using protection devices. PhD Dissertation, University of Roorkee, India.
- Kumar V, Ranga Raju KG and Vittal N, 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *J Hydraul Eng* 125(12): 1302-1305.
- Lauchlan GS and Melville BW, 2001. Riprap protection at bridge piers. *J Hydraul Eng* 127(5):412-418.
- Melville BW and Hadfield AC, 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *J Hydraul Eng* 125(11): 1221-1224.
- Mia MF and Nago H, 2003. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier. *J Hydraul Eng* 129(6): 420-427.
- Raudkivi AJ and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *J Hydraul Eng* 109(3): 338-350.
- Raudkivi AJ, 1986. Functional trends of scour at bridge piers. *J Hydraul Eng* 112(1): 1-13.
- Richardson EV and Davis SR, 1995. Evaluating scour at bridges. *J Hydraul Eng Circular No. 18, FHWA-IP-90-017.*
- Richardson EV and Davis SR, 2001. Evaluating scour at bridges (3<sup>rd</sup> ed.). Federal Highway Administration

Hydraulic Engineering Circular No. 18: FHWA-IP-90-017, US Department of Transportation, Washington, D.C.

Worman A, 1989. Riprap protection without filter layers. J Hydraul Eng 115(12):1615-1630.

Zarrati AR, Gholami H and Mashahir MB, 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. J Hydraul Res 42(1): 97-103.