



تأثیر زاویه برخورد جریان در کنترل و کاهش آب‌شستگی پایه‌های مستطیلی پیشانی‌گرد شکاف‌دار پل

مهدی بهرامی کارشناس ارشد گروه آب-دانشکده عمران- دانشگاه صنعتی اصفهان

محمد رضا چمنی استادیار گروه آب- دانشکده عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

منوچهر حیدر پور استادیار گروه آب - دانشکده کشاورزی - دانشگاه صنعتی اصفهان*

* تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۳۴۳۶ ، نمابر: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۲۵۴ ، پست الکترونیکی: Heidar@cc.iut.ac.ir

چکیده

آب‌شستگی در اثر فرسایش بستر رودخانه توسط جریان آب و موادی که توسط آب حمل می‌شوند ایجاد می‌گردد و باعث انهدام پل‌ها می‌شود آب‌شستگی با گذشت زمان، اطراف پایه را خالی می‌نماید و باعث ناپایداری سازه می‌شود. بنابراین، شناخت این پدیده، پیش‌بینی میزان آب‌شستگی و لحاظ کردن آن در طراحی پل‌ها و مهمتر از همه، به کار بردن تمهیدات لازم برای کاهش و کنترل آب‌شستگی بسیار ضروری است. در این تحقیق کارایی شکاف در کاهش آب‌شستگی موضعی در زاویه‌های مختلف برخورد جریان در پایه‌های مستطیلی با استفاده از مدل‌های فیزیکی مطالعه شده است. دلیل اصلی استفاده از مدل فیزیکی، پیچیدگی پدیده آب‌شستگی است. نتایج نشان می‌دهد که با چرخش پایه، گودال اطراف پایه از حالت تقارن خارج می‌شود و شعاع آب‌شستگی در طرف چرخش پایه افزوده می‌شود. همچنین با افزایش زاویه برخورد، زمان تعادل در پایه شکافدار، به زمان تعادل در پایه بدون شکاف میل می‌نماید. با افزایش زاویه برخورد جریان کارایی شکاف کم شده و در طی فرآیند آب‌شستگی با گذشت زمان عملکرد شکاف نیز کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، پایه پل، زاویه برخورد جریان، جریان روبه باین و گرداب نعل اسبی.

۱- مقدمه

پل‌ها سازه‌های ارتباطی رودخانه‌ها می‌باشند و به صورت فراوان از دیرباز مورد استفاده قرار می‌گیرند و همواره در معرض تخریب می‌باشند. یکی از عوامل مهم تخریب پل‌ها آب‌شستگی می‌باشد که بررسی‌های انجام شده نیز مؤید این مطلب است [۲]. تخریب پل‌ها درست در زمانی که نیاز مبرم به آنها می‌باشد، رخ می‌دهد.

بنابراین، لزوم بررسی پدیده آب‌شستگی و محافظت پایه‌ها در مقابل آن به وضوح دیده می‌شود و لازم است مهندسان هیدرولیک با مکانیزم آب‌شستگی آشنایی کامل پیدا کنند.

۱-۲- مکانیزم آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل

با برخورد آب به پایه، جریان روبه پائین و دو نوع سیستم گردابی (گرداب نعل اسبی و گرداب برخاستی) در اطراف پایه بوجود می‌آیند.

الف- جریان روبه پائین و گرداب نعل اسبی

وقتی جریان به پایه پل برخورد می‌کند سرعتش صفر می‌شود و فشار ایستائی بوجود می‌آید. از آنجا که سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب بیشتر می‌شود، فشار بیشتری در ترازهای بالاتر روی پایه ایجاد می‌گردد. به این ترتیب یک گرادیان فشار روی سطوح بالادست پایه از بالا به پائین پدید می‌آید و جریان روبه پائین تشکیل می‌شود. عامل اولیه آب‌شستگی، جریان رو به پائین است که نظیر یک جت عمودی آب عمل می‌کند و مواد کناره‌های پایه را بلند می‌نماید و این مواد توسط جریان آب به پائین دست منتقل می‌شوند. جریان رو به پائین در برخورد به بستر رودخانه ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. با حفر بستر در جلوی پایه، جریان رو به پائین به داخل حفره نفوذ کرده و به طرف بالادست چرخیده و گردابی را بوجود می‌آورد. چرخش جریان در دور پایه باعث افزایش موضعی سرعت و تمرکز تنش در دو طرف پایه می‌شود.

چرخش آب نیز در داخل گودال جلوی پایه به دو طرف توسعه پیدا می‌کند و در مجموع گردابی ایجاد می‌کند، که در پلان به نعل اسب شبیه است و به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند [۳، ۴]. حفر گودال آب‌شستگی توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می‌یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک نماید [۵]. این سیستم‌های گردابی، مکانیزم اصلی آب‌شستگی موضعی به حساب می‌آیند که در دراز مدت باعث ایجاد حفره در محل پایه پل شده و ممکن است موجب ریزش پل شوند.

ب- گرداب برخاستگی

با عبور جریان از کنار پایه پل در پشت پایه گرادیان منفی فشار ایجاد می‌شود. این گرادیان باعث جدایی جریان از پایه شده و تشکیل گرداب‌هایی را می‌دهد. محور این گرداب‌ها عمود بر بستر رودخانه است. محل تشکیل این گرداب‌ها در کناره پائین دست پایه است که به صورت چرخش‌هایی در سطح آب قابل مشاهده می‌باشند و ذرات بستر را مانند گردباد جدا کرده و در معرض جریان قرار می‌دهند.

۳-۱- مطالعات انجام گرفته در رابطه با استفاده از شکاف در کاهش آب‌شستگی

اولین بار تاناکا و یانو (۱۹۶۷) آزمایش‌هایی بر روی پایه‌هایی شکافدار انجام دادند. آنها مشاهده کردند که عمق آب‌شستگی با توجه به موقعیت شکاف نسبت به کف، ۱۵ تا ۳۰ درصد کاهش یافت [۶].

چیو (۱۹۹۲) پارامترهای طول، عرض و موقعیت قرارگیری شکاف بر پایه را در آب‌شستگی بررسی کرد. در این تحقیق، شکاف در دو حالت نزدیک کف و نزدیک سطح آب مطالعه شد، شکل (۲-۸). چیو ماکزیمم کاهش عمق آب‌شستگی در شکاف‌هایی با عرض یک دوم و یک چهارم قطر پایه را به ترتیب ۳۰ و ۲۰ درصد بدست آورد.

کومار و همکاران (۱۹۹۹) با انجام آزمایش‌هایی بر روی پایه‌های استوانه‌ای، تأثیر شکاف را در آب‌شستگی مطالعه کردند [۷]. آنها از دو شکاف با طول‌های y_0 و y_0+d_s استفاده کردند. عرض شکاف‌ها یک چهارم قطر پایه بود. آزمایش‌های آنها نشان داد که با افزایش طول شکاف، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد.

۲- مواد و روش‌ها

تحقیقات آزمایشگاهی در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گردید، شکل ۱. کانال آزمایشگاهی مذکور دارای طول ۱۱ متر، عرض ۴۲ سانتیمتر و عمق ۷۰ سانتیمتر است. دیواره درونی کانال از جنس فولاد و دیواره بیرونی از جنس شیشه سکوریت می‌باشد. کف کانال توسط دو سکوی فلزی در بالادست (با طول ۳ متر) و پائین‌دست (با طول ۱ متر) تا ارتفاع ۲۰ سانتیمتر بالا آمده است. محدوده‌ای به طول ۱/۲ متر و بین دو سکوی بالادست و پائین‌دست، مقطع آزمایش است. آب بوسیله یک پمپ در مدار بسته‌ای جاری می‌شود. دبی جریان بوسیله جریان‌سنج توربینی که در روی خط لوله نصب است، اندازه‌گیری می‌شود.

برای بررسی کارآیی شکاف در زاویه‌های برخورد مختلف از دو مدل (مدل مستطیلی پیشانی‌گرد شکافدار و بدون شکاف) به ابعاد ۳ در ۶ سانتی‌متر استفاده شد. عرض شکاف یک چهارم عرض پایه [۷، ۸ و ۹] برابر با ۷/۵ میلی‌متر و ارتفاع شکاف دو برابر عرض پایه [۸ و ۹] برابر با ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین، موقعیت شکاف در مجاورت بستر قرار گرفته شد، زیرا در این حالت کارآیی شکاف (نسبت به حالتی که شکاف با فاصله‌ای از بستر قرار داشته باشد) بیشتر می‌باشد [۸، ۹ و ۱۰].



شکل ۱- نمایی جانبی از کانال آزمایشگاه

دیواره‌های جانبی کانال بر آب‌شستگی اثر می‌گذارند و مانند دو پایه در کنار پایه اصلی عمل می‌کنند. با تحقیقات رودکیوی و اتما (۱۹۸۳) مشخص شد هنگامی که نسبت عرض پایه به فاصله آن با دیواره کمتر از $1:6/25$ باشد، دیواره‌های جانبی کانال تأثیری بر آب‌شستگی ندارند [۱]. این نسبت در این تحقیق $1:9$ در نظر گرفته شد. اگر عمق نسبی جریان به اندازه کافی بزرگ باشد (بیشتر از ۵) در این صورت گرداب‌های سطحی بر آب‌شستگی اثر نخواهند داشت [۱۱]. عمق نسبی جریان در این تحقیق بیشتر از ۷ می‌باشد، بنابراین این پارامتر اثری بر آب‌شستگی ندارد.

مشابه بودن شکل ذرات استفاده شده در آزمایش‌ها و مصالح موجود در رسوبات رودخانه‌ای شرط لازم و کافی برای ایجاد تشابه هندسی بین مدل و اصل می‌باشند [۵]. d_{50} و σ_p مصالح استفاده شده به ترتیب $0/75$ میلی‌متر و $1/21$ در نظر گرفته شد. بنابراین شرط یکنواخت بودن دانه‌ها ($\sigma_p < 1/3$) ارضا می‌شود [۱۲]. در محاسبه سرعت و عمق جریان در آستانه حرکت ذره از توصیه رودکیوی استفاده شد [۱۲]. وی شرایط آب‌شستگی آب زلال را زمانی درست می‌داند که شرط $0/95uc \leq u$ برقرار باشد. معیار زمانی در تمام آزمایش‌ها یکسان بود و از تعریف ارائه شده توسط ملویل و چپو (۱۹۹۹) استفاده گردید [۱۳]. با توجه به این معیار، زمانی که تغییرات عمق آب‌شستگی در مدت ۲۴ ساعت کمتر از $1/5$ میلیمتر شد در این حالت آزمایش به زمان تعادل خود رسیده و متوقف می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل مشاهدات آزمایشگاهی

مشاهده فرآیند آب شستگی در فهم مکانیزم آب شستگی بسیار مهم می‌باشد. جریان رو به پائین در بالادست پایه‌های شکافدار و بدون شکاف مشاهده شد. جریان در بالادست پایه بصورت یک خط جریان قابل دنبال می‌باشد که با رسیدن به نزدیک پایه تحت تأثیر پایه قرار گرفته و تغییر وضعیت می‌دهد. این جریان به سمت پائین (طرف کف) منحرف خواهد شد و نیروی خود را به کف منتقل می‌نماید. مکانیسم عمل جریان رو به پائین که عامل اصلی آب شستگی در شروع آزمایش است، مانند جت عمودی می‌باشد که ذرات اطراف پایه را بلند می‌نماید و در مسیر جریان آب قرار می‌دهد. قدرت جریان رو به پائین ثابت است و با حفر و توسعه گودال بر قدرت آن افزوده نخواهد شد. پیش‌بینی می‌شود اگر عامل جریان رو به پائین وجود نداشت، حفر گودال آب شستگی بسیار طولانی‌تر از حالت معمولی می‌باشد.

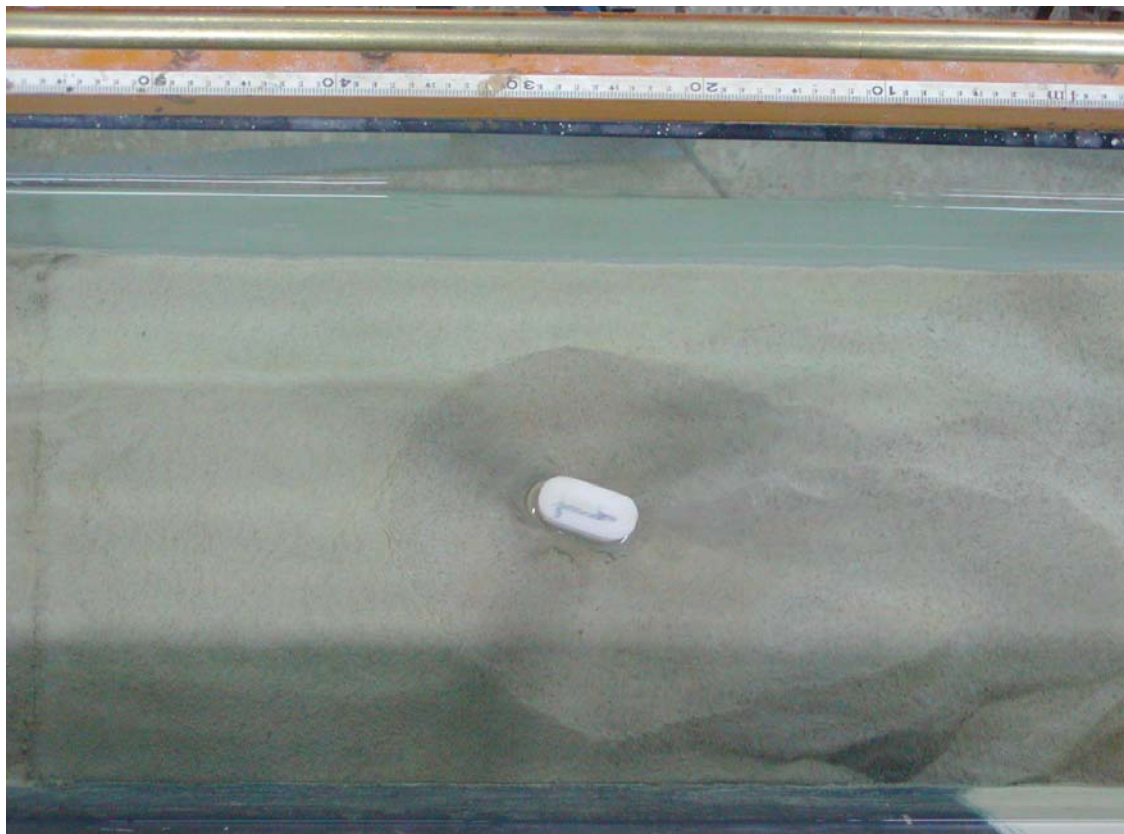
در پایه‌های شکافدار، جریان رو به پائین به محض رسیدن به شکاف با جریان عبوری از شکاف که مانند جت افقی می‌باشد، تداخل می‌کند. در این هنگام انرژی جریان رو به پائین مستهلک می‌گردد و جریان رو به پائین به دو قسمت تقسیم خواهد شد. یک قسمت که ضعیف‌تر از حالت عادی است به کف برخورد می‌کند و باعث تشکیل گرداب‌های نعل اسبی حول پایه می‌شود. قسمت دیگر به داخل شکاف کشیده خواهد شد. ناگفته نماند که در هر دو حالت، گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه تشکیل می‌شوند.

هر چقدر به عمق حفره آب شستگی افزوده می‌شود، گسترش شعاع حفره آب شستگی بیشتر خواهد شد. زمانی که زاویه برخورد جریان با پایه صفر است، گودال تشکیل شده در اطراف پایه تقریباً متقارن می‌باشد. با چرخش پایه، گودال اطراف پایه از حالت تقارن خارج می‌شود و شعاع آب شستگی در طرف چرخش پایه افزوده می‌شود، شکل ۲. در این حالت، فرم بستر تشکیل شده دیگر تقارن نخواهد داشت و فرم بستر ممکن است در پائین دست به جدار کانال برخورد نماید.

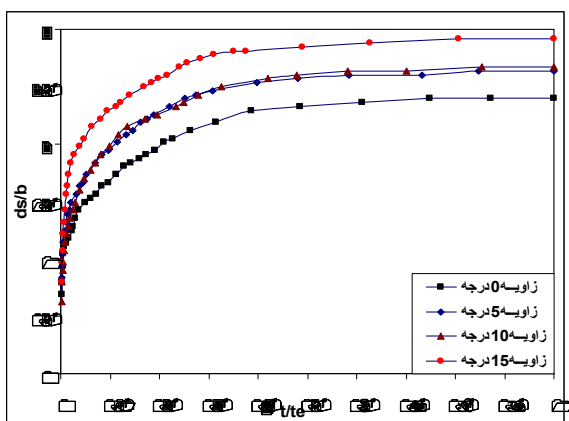
۳-۲- تحلیل برداشت‌های آزمایشگاهی

الف- اثر زاویه برخورد جریان بر روی عمق آب شستگی در پایه‌های بدون شکاف و شکافدار
اشکال ۳ و ۴ تأثیر زاویه برخورد جریان بر روی آب شستگی به ترتیب در پایه‌های بدون شکاف و شکافدار را نشان می‌دهند. تغییر زاویه برخورد جریان از صفر به ۵ و نیز از ۱۰ به ۱۵ درجه تأثیر بالایی بر روی افزایش عمق آب شستگی دارد. در صورتی که تغییر زاویه برخورد جریان از ۵ به ۱۰ اثر کمی بر آب شستگی دارد و

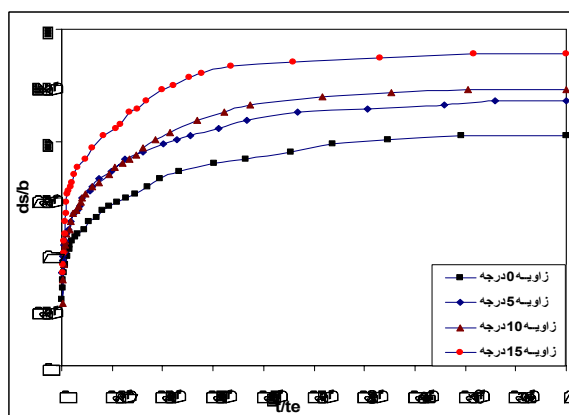
افزایش عمق آب شستگی در این حالت کم می‌باشد. لذا، تغییرات عمق آب شستگی نسبت به زاویه برخورد، در محدوده زاویه‌های ۰-۵ و ۱۰-۱۵ نسبت به محدوده ۵-۱۰ درجه بیشتر است.



شکل ۲- گودال نامتقارن آب شستگی در پایه بدون شکاف با زاویه برخورد ۱۵ درجه.



شکل ۴- عمق آب شستگی در پایه شکافدار با زاویه‌های مختلف برخورد جریان



شکل ۳- عمق آب شستگی در پایه بدون شکاف

با زاویه‌های مختلف برخورد جریان
ب- تاثیر شکاف بر روی زمان تعادل

شکاف، زمان تعادل را افزایش می‌دهد. با چرخش پایه و کاهش کارآیی شکاف، زمان تعادل کم خواهد شد و زمان تعادل در پایه شکافدار با افزایش زاویه برخورد، به زمان تعادل در پایه بدون شکاف میل می‌نماید. در جدول ۱، زمان تعادل در زاویه‌های مختلف برای پایه‌های بدون شکاف و شکافدار آورده شده است. با توجه به جدول مشخص می‌شود که شکاف می‌تواند در به تأخیر انداختن آب شستگی مؤثر باشد.

جدول ۱- اثر شکاف بر روی زمان تعادل در پایه‌های بدون شکاف و شکافدار

زاویه (درجه)	زمان تعادل پایه بدون شکاف (دقیقه)	زمان تعادل پایه شکافدار (دقیقه)	اختلاف در زمان تعادل در پایه شکافدار و بدون شکاف (دقیقه)
۰	۳۹۳۰	۴۸۰۰	۸۷۰
۵	۳۷۵۰	۴۵۹۴	۸۴۴
۱۰	۳۶۷۵	۴۳۵۰	۶۷۵
۱۵	۴۰۴۰	۴۳۱۰	۲۷۰

ج- تاثیر شکاف در کاهش عمق آب شستگی

با افزایش زاویه برخورد جریان کارآیی شکاف کم می‌گردد. با گذشت زمان عملکرد شکاف تغییر خواهد کرد به طوری که با افزایش زمان کارآیی شکاف کم می‌شود. در زمان تعادل، شکاف کمترین کارآیی را در کنترل آب شستگی در زاویه مورد نظر دارد. شکاف از لحظه اولیه آزمایش، شروع به کاهش آب شستگی نمی‌کند. در زاویه‌های ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ شکاف به ترتیب در ۰/۰۱، ۰/۱۸۵، ۰/۰۲۹ و ۰/۰۲۱ زمان تعادل شروع به عمل نموده و بر آب شستگی اثر خواهد گذاشت. در جدول ۲ درصد کاهش آب شستگی در زمان‌های مختلف برای زاویه‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۲- مقایسه درصد کاهش آب شستگی در زاویه‌های مختلف برخورد جریان در پایه شکافدار.

α	۰	۵	۱۰	۱۵
t				
.۲۵te	۱۷/۱	۱۴/۲	۸/۹	۵/۲
.۵te	۱۶/۷	۱۲/۴	۸/۴	۴/۹
.۷۵te	۱۶/۳	۱۰/۸	۷/۲	۵/۲
te	۱۴/۵	۱۰/۳	۷/۹	۴/۸

۴- نتیجه گیری

با چرخش پایه پل، گودال اطراف پایه از حالت تقارن خارج می‌شود و شعاع آب‌شستگی در طرف چرخش پایه افزوده می‌شود. با چرخش پایه و کاهش کارآیی شکاف، زمان تعادل کم خواهد شد و زمان تعادل در پایه شکافدار با افزایش زاویه برخورد، به زمان تعادل در پایه بدون شکاف میل می‌نماید. با افزایش زاویه برخورد جریان کارآیی شکاف کم شده و در طی فرآیند آب‌شستگی با گذشت زمان عملکرد شکاف نیز کاهش می‌یابد.

۵- فهرست مراجع:

- [1] Ettema, R., and Raudkivi, A. J. (1983). "Clear water scour at cylindrical piers." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 109(3), 338-349.
- [2] Shirolc, A. M., and Holt, R. C. (1991). "Planning for a comprehensive bridge safety assurance program." *Transport Res. Rec.*, (1290), 39-50.
- [۳] شفاعی بجستان، م، ۱۳۷۳. "هیدرولیک رسوب." انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [4] Raudkivi, A. J. (1998). "Loose Boundary Hydraulics." A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [۵] زراتی، الف، عزیزی، م، ۱۳۷۶ "بررسی روش‌های کنترل و کاهش آب‌شستگی پایه‌های پل." اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، ص ۱۸۲-۱۹۴.
- [6] Tanaka, S. and Yano, M. (1967). "Local scour around a circular cylinder." *J. Hydr. Res., IAHR*, 16(3), 193-201.
- [7] Kumar, V., Ranga Raju, G., and Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collar." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125 (12), 1302-1305.
- [8] Chiew, Y. M. (1992). "Scour protection at bridge piers." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 118(11), 1260-1269.
- [۹] نادری، م. "کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی در پایه‌های پل با استفاده از شکاف." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۰.
- [10] Babar, R., Setia, S., and Setia, B. (2000). "Scour protection by slot through a model bridge pier." Proceedings, Indian Institute of Technology Kanpur, India.
- [11] Melville, B. W., and Sutherlands, A. J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 114(10), 1210-1226.
- [12] Raudkivi, A. J. (1998). "Loose Boundary Hydraulics." A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [13] Melville, B. W., and Chiew Y. M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125(1), 59-65.