

عملکرد فواصل عناصر زبری در کاهش عمق آبشستگی و تأثیر آن‌ها روی پروفیل‌های سرعت قائم اطراف تکیه‌گاه پل

حامد شهسواری^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۲، اسماعیل لندی^۳، احمد رحیمی نیا^۱

تاریخ پذیرش: تاریخ دریافت:

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- مربی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hshahsavary@yahoo.com

چکیده

در مورد تخریب پل‌ها، سیلی که منتج به آبشستگی می‌شود اصلی‌ترین عامل شکست پل‌ها شناخته شده است. از این رو یافتن راه‌کاری برای کاهش عمق آبشستگی حیاتی می‌باشد. در این تحقیق اثرات زبری‌های موضعی با فواصل متفاوت، برای تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای تحت شرایط آبشستگی آب‌زال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود زبری باعث کاهش در روند آبشستگی و کاهش ۴۷٪ درصدی عمق نهایی آبشستگی می‌شود. ارتباط معناداری بین عملکرد زبری‌ها و فاصله بین آن‌ها وجود داشت. به طوری که وجود یک مقدار بهینه برای فاصله بین زبری‌ها، عملکرد زبری را افزایش و روند آبشستگی را کاهش داد. بعلاوه، بررسی پروفیل‌های سرعت قائم نشان داد که، وجود سرعت‌های قائم مثبت در درون حفره در بالادست تکیه‌گاه و همچنین سرعت‌های منفی در اعماق بالاتر نشان دهنده وجود جریان‌های رو به پایین است. در نتیجه، این جریان‌های رو به پایین منجر به ایجاد ورتکس‌های قوی در درون حفره آبشستگی و در جلوی تکیه‌گاه می‌شوند. مقایسه پروفیل جریان در اطراف تکیه‌گاه حاوی زبری با تکیه‌گاه شاهد نشان داد که سرعت جریان رو به پایین برای تکیه‌گاه زبری‌دار به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، به دلیل اثر زبری بر روی پروفیل‌های سرعت قائم در پایین‌دست تکیه‌گاه، عمق گودال آبشستگی در پشت تکیه‌گاه نیز کاهش یافت. به طوری که میزان کاهش سرعت جریان قائم در جلو و پشت تکیه‌گاه زبری‌دار به ترتیب $0.13U$ و $0.4U$ (سرعت جریان نزدیک شونده) بود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، پروفیل‌های سرعت قائم، تکیه‌گاه پل، زبری‌های موضعی

Performance of the Roughness Elements Distances to Reduce Scour and Their Impact on Vertical Velocity Profiles around Bridge Abutment

H Shahsavari^{1*}, M Heidarpour², E Landi³, A Rahiminia¹

¹ M.Sc. Department of Water Engineering, Agricultural College, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

² Prof. Department of Water Engineering, Agricultural College, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

³Instructor Water Engineering Department, Agricultural College, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* Corresponding Author, Email: hshahsavary@yahoo.com

Abstract

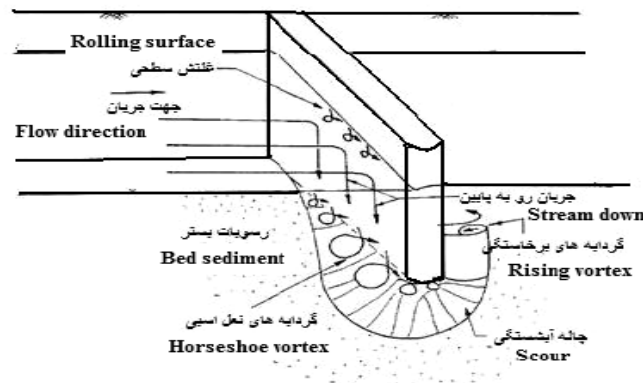
Among the issues related to bridges distraction, a flood which causes scouring has been known as the main reason of bridges destruction. Therefore, finding an effective solution is vital for decreasing scouring depth. In this study, the effects of local roughness elements with different distance were investigated for a semicircular abutment under clear water scouring condition. Results showed that existence of roughness reduced the scouring process and reduced the final scour depth by 47%. There was a significant relationship between roughnesses function and the distance between them. So that the existence of an optimal value for the distance between the roughnesses increased the roughness function and decreased the scouring process. In addition, the study of vertical velocity profiles revealed that existence of positive vertical velocity in the hole located at upstream of the abutment and also negative velocities at higher depths were the indicator of downflows. As a result, these downflows lead to the formation of powerful vortexes inside the scouring hole and in front of the abutment. Comparison of the flow profile around the roughened abutment with the control abutment showed that velocity of downflow is significantly reduced for abutment with roughness. Moreover, the depth of scouring hole was reduced at behind of the abutment, due to the impact of roughness on vertical velocity profiles at downstream of abutment. So that, the velocity reduction of the vertical flow in the front and behind of the roughened abutment was to 0.13 U and 0.4 U (U approaching flow velocity), respectively.

Keywords: Abutment, Local Scouring, Local Roughness, Vertical velocity profiles

مقدمه

مکانیسم آبشستگی پتانسیل زیادی برای تهدید کردن پل‌ها و سایر سازه‌های هیدرولیکی دارد و منجر به تخریب پی و فونداسیون سازه‌ها از زیر شده و منجر به خرابی پل‌ها می‌شود. بر اساس مطالعات ملویل ۱۰۸ شکست پل در فاصله سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۸۴ در نیوزیلند رخ داده که ۲۹ مورد آن ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است، وی همچنین خاطر نشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌ها روی شکست پل در نیوزیلند ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است (ملویل ۱۹۹۲). شکل ۱، میدان جریان در اطراف تکیه‌گاه پل را نشان می‌دهد.

رودخانه‌ها به عنوان مجراهای طبیعی از دیرباز تاکنون عمل جمع‌آوری و انتقال بارش‌های جوی را انجام داده‌اند و به عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع تأمین آب مورد توجه قرار گرفته‌اند. شناخت رفتار رودخانه‌ها تحت تأثیر سازه‌های هیدرولیکی مستقر در مسیر آن‌ها می‌تواند نقش بسزایی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و در نتیجه تغییرات به وجود آمده در حوضه آبریز داشته باشد. یکی از سازه‌هایی که می‌تواند باعث تغییر الگوی جریان در رودخانه شود احداث پل بر روی آن است.



شکل ۱- میدان جریان در اطراف تکیه‌گاه پل.

تکیه‌گاه و نیز در تراز بستر مختلف و در شرایط آبشستگی آب‌زالان انجام گرفت و نتایج حاصله باهم مقایسه شد. بر طبق نتایج ارائه شده از این آزمایش، وجود طوق باعث کاهش میزان آبشستگی به مقدار قابل توجهی می‌شود. در این بین طوق با اندازه ۲ برابر شعاع پایه عملکرد بهتری نسبت به طوق کوچک‌تر با اندازه ۱/۵ برابر شعاع پایه دارد. همچنین بهترین عمق قرارگیری طوق در فاصله ۰/۲ شعاع پایه در زیر سطح بستر اولیه قبل از شروع آبشستگی است. این عمل ضمن کاهش ۶۰ درصدی آبشستگی نهایی، باعث ایجاد تأخیر در روند آبشستگی نیز می‌شود.

علیزاده و همکاران (۲۰۱۲) شش زاویه (صفر، ۲۲، ۳۰، ۳۷/۵، ۴۵ و ۹۰ درجه) قرار گیری پره مدفون را در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پره‌های مدفون قادرند عمق آبشستگی را از ۳۰ الی ۶۰ درصد کاهش دهند که بیشترین مقدار مربوط به زاویه ۳۷/۵ درجه با ۶۰٪ کاهش و کمترین آن صفر درجه با ۳۰٪ کاهش می‌باشد.

تحقیقات در زمینه‌ی مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها نشان داده است که جریان پایین‌رونده و گرداب اصلی در گوشه بالادست تکیه‌گاه پل، همواره با گرداب‌های ثانویه و گرداب‌های برخاستگی در قسمت میانی و گوشه‌ی انتهایی تکیه‌گاه پل باعث ایجاد فعل و انفعالات

جریان یافتن آب در مجاورت تکیه‌گاه و کف‌کنی و عمیق‌تر شدن بستر رودخانه در مواقع سیلابی، از عوامل اساسی تخریب و آبشستگی پل‌ها می‌باشد. تماس مستقیم جریان آب با دیواره‌های جانبی پل منجر به افزایش شیب طولی در اثر شسته‌شدن کف بستر و عمیق شدن آن می‌گردد. لذا بستر آبرفتی رودخانه‌ها در دماغه تکیه‌گاه پل‌ها وقتی در مقابل جریان قرار می‌گیرند، اختلاف بار آبی در بالادست و پایین‌دست دیواره جانبی، یکی از عوامل تولید جریان آشفته چرخشی و گردابی در پیرامون آن خواهد بود که اثرات به صورت فرسایش حفره‌ای و عمیق به خصوص در انتهای دماغه دیواره جانبی بالادست آن ظاهر خواهد شد.

تخریب پل‌ها در نتیجه آبشستگی پی یا تکیه‌گاه پل‌ها موجب ترغیب روزافزون پژوهشگران برای مطالعه و بررسی پدیده آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل و ارائه روش‌های کنترل و کاهش آبشستگی شده است در چندین دهه گذشته مطالعات بسیاری جهت شناخت مکانیسم، توسعه آبشستگی و پدیده آبشستگی اطراف تکیه‌گاه، انجام شده است. شهسواری و حیدرپور (۱۳۹۳) به مطالعه اثر طوق بر تکیه‌گاه نیم‌دایروی پرداختند. در این تحقیق، آزمایش‌ها بر روی تکیه‌گاه بدون طوق و با طوق در اندازه‌های ۲ و ۱/۵ برابر شعاع

کانال ساده) به ۰/۰۳۲ متر کاهش قابل ملاحظه دهد. سویانگ و همکاران (۲۰۱۵) خطوط کنتور دقیق و شکل سه بعدی سرعت‌ها و مقادیر آشفتگی را با سرعت‌سنج صوتی (ADV) اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که جریان منقبض شده در اطراف یک تکیه‌گاه و ساختارهای آشفته محلی در نزدیکی وجه پایین‌دست پل از ویژگی‌های مهم میدان جریان هستند که موجب ایجاد حداکثر عمق آبشستگی در نزدیکی تکیه‌گاه شده‌اند.

کوکن و جورج (۲۰۱۴) بر روی اثر درجه شیب طرف بالادست تکیه‌گاه بر الگوی جریان و تلاطم آن بحث کردند، بر اساس مقایسه نتایج به دست آمده برای تکیه‌گاه با دیواره‌های شیب‌دار با نتایج کسانی که برای تکیه‌گاه با دیوار قائم با طول مشابه به دست آورده بودن، این نوع تکیه‌گاه مشخص کرد با جریان روبه-پایین قوی‌تر، و تشکیل یک سیستم گردابه‌ای نعل‌اسبی منسجم‌تر، باعث شکل‌گیری گودال آبشستگی عمیق‌تر می‌شود. در برخی از مطالعات نیز معادلاتی را برای تخمین میزان و روند آبشستگی انجام دادند مانند کرمی و همکاران (۲۰۱۲) که معادله ۱ را برای محاسبه روند آبشستگی در تکیه‌گاه ارائه داده‌اند:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{T}\right)^{0.16} \left(\frac{v}{v_c}\right)^{-0.14} \quad [1]$$

d_s عمق آبشستگی در هر لحظه، d_{se} عمق آبشستگی نهایی، v_c سرعت بحرانی، v سرعت متوسط، t زمان، T زمان تعادل.

هدف از مطالعه حاضر ارائه روشی کارآمد در کنترل و کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل و بررسی عوامل مؤثر در این روش می‌باشد. یکی از راه‌حل‌های کنترل و کاهش آبشستگی موضعی که کمتر مورد توجه بوده است ایجاد زبری به صورت حلقه‌ای بر روی تکیه‌گاه پل است که این زبری‌ها از جنس خود تکیه‌گاه، در هنگام بتن‌ریزی اجرا می‌شوند. در این مطالعه با استفاده از زبری‌های ایجاد شده روی تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای شکل،

پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که دلیل اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها است. باربویا و دی (۲۰۰۳) سه نوع تکیه‌گاه با شکل‌های مستطیل، دوزنقه و نیم‌دایره را مورد استفاده قرار دادند و نتایج آزمایش آن‌ها نشان می‌دهد که در بالادست تکیه‌گاه در تمامی مقاطع وجود جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل‌اسبی محسوس است. در پایین‌دست تکیه‌گاه اساساً میدان جریان به خاطر جدایی جریان معکوس می‌شود. محققین پروسه آبشستگی برای تکیه‌گاه‌ها با مقاطع مختلف مورد مطالعه قرار دادند و با استفاده از ADV سرعت را در راستای (z,y,x) اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که ورتکس‌های اولیه در بالادست جریان در تکیه‌گاه از شدت بالاتری برخوردار بوده ولی در کناره‌های تکیه‌گاه کاهش می‌یابند که دلیل آن ایجاد آشفتگی در بالادست تکیه‌گاه‌ها ناشی از جریان در راستای اصلی (x) در کانال می‌باشد که باعث ایجاد ورتکس‌های قوی می‌گردد (باربویا و دی ۲۰۰۴).

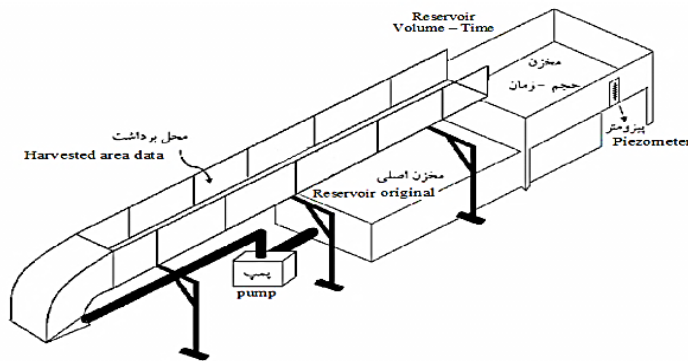
شهرسواری و همکاران (۱۳۹۴) نیم‌رخ‌های سرعت در سه راستا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد در بالادست تکیه‌گاه، تغییرات سرعت طولی در نزدیکی بستر و منفی شدن آن در حفره آبشستگی موجب شکل‌گیری ورتکس‌های اولیه در کف گودال می‌شود، این ورتکس‌ها هرچه به تکیه‌گاه نزدیک شوند دارای قدرت بیشتری می‌باشند. همچنین در پایین‌دست تکیه‌گاه نیز کاهش شدید سرعت طولی در سطح آب و سرعت‌های قائم مثبت نشان از وجود گردابه‌های برخاستگی قوی در این قسمت می‌باشد. افضل‌مهر و همکاران (۲۰۱۴) مشاهده کردند که در اطراف تکیه‌گاه، وجود پوشش گیاهی، نقش مهمی در کاهش تنش رینولدز در نزدیکی بستر دارد و باعث از بین بردن مقادیر منفی در توزیع تنش با تضعیف گرادیان فشار نامطلوب و جریان روبه پایین در بالادست تکیه‌گاه می‌شود. در نتیجه کانال دارای دیواره پوشش گیاهی می‌تواند ماکزیمم عمق آبشستگی را از ۰/۰۸۴ متر (برای

صنعتی اصفهان انجام گرفته است. یک پمپ وظیفه‌ی انتقال آب از مخزن اصلی به کانال را عهده‌دار است که حداکثر دبی آن ۱۱ لیتر بر ثانیه است. کانال به یک مخزن حجم-زمان مجهز است که به کمک آن می‌توان دبی را اندازه‌گیری کرد. در تمام آزمایش‌ها از دبی حداکثر استفاده شده است. یک سرریز قابل تنظیم در پایین‌دست، عمق آب در کانال را تنظیم می‌نماید (شکل ۲).

به بررسی تأثیر فاصله بین این زبری‌ها که نقش بسزایی بر عملکرد زبری‌ها دارد پرداخته شد و همچنین عملکرد زبری‌ها روی پروفیل‌های سرعت قائم در اطراف تکیه‌گاه آورده شد تا تغییرات آن نسبت به تکیه‌گاه بدون زبری، اثر این زبری‌ها را بر روی عوامل هیدرولیکی مؤثر بر آبستگي مشخص کند.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۷ متر، عرض ۰/۳۲ متر و ارتفاع ۰/۳۶ متر واقع در دانشگاه

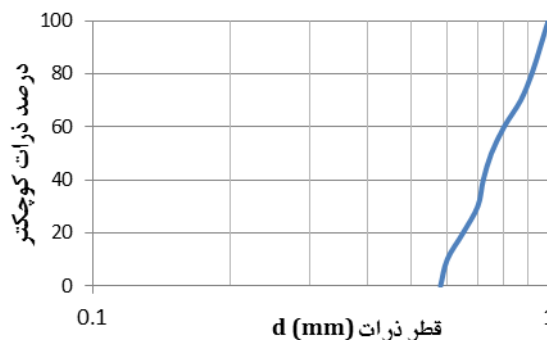


شکل ۲- نمایی از کانال آزمایشگاهی.

زدگی تکیه‌گاه در مقابل جریان ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای جلوگیری از تشکیل رپل^۱ در طول آزمایش باید قطر متوسط ذرات بیش از ۰/۷ میلی‌متر باشد (رادکیوی و اتما ۱۹۸۳). زمانیکه انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از ۱/۳ می‌باشد می‌توان از تأثیر غیریکنواختی ذرات بر عمق آبستگي صرف‌نظر کرد (ملویل ۱۹۹۲). بنابراین طبق معیارهای فوق فاصله بین سکوها به وسیله رسوبات غیرچسبنده و با قطر متوسط ۰/۷۵ میلی‌متر که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۳ آمده است انتخاب شد، وزن مخصوص ذرات برابر ۲/۶۵ و انحراف معیار هندسی ۱/۲ بود.

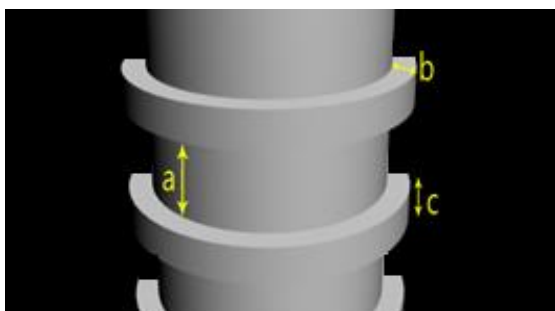
منطقه انجام آزمایش‌ها در کانال، دارای طول ۱ متر و ارتفاع بستر ۱۲ سانتی‌متر است که از ابتدای کانال ۴ متر فاصله دارد. مسئله‌ی مهم در طراحی ابعاد تکیه‌گاه‌ها، انتخاب طول مناسب برای آن‌هاست. طول تکیه‌گاه (L) باید طوری باشد تا دیواره‌های کانال تأثیری بر روی آبستگي اطراف آن نداشته باشد. برای عدم تأثیر دیواره کانال روی آبستگي طبق نظر چپو و ملویل (۱۹۸۷) قطر پایه و یا طول تکیه‌گاه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد. و یا نسبت فاصله دیوار کناری از مرکز کانال به عرض پایه از نظر محققینی نظیر رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) معادل ۶/۲۵ است، که این معیارها توسط پرچمی و همکاران (۱۳۹۶) نیز استفاده شده است. بنابراین طول تکیه‌گاه یا بیرون-

¹Ripple



شکل ۳- منحنی رسوبات انتخاب شده برای آزمایش.

است. فاصله بین زبری‌ها با حرف (a)، بیرون‌زدگی زبری‌ها با حرف (b) و ارتفاع زبری‌ها با حرف (c) نشان داده شده است.



شکل ۴- طرح شماتیک زبری‌های ایجاد شده پیرامون تکیه‌گاه.

در تحقیق حاضر بیرون‌زدگی بین زبری‌ها (b) و ارتفاع زبری‌ها (c) ثابت و به ترتیب برابر $0.1L$ و $0.05L$ در نظر گرفته شد. فاصله زبری‌ها در پنج اندازه مشخص انتخاب شد که بر حسب طول تکیه‌گاه (L) به ترتیب برابر با $0.075L$ ، $0.16L$ ، $0.45L$ ، $0.30L$ و $0.15L$ می‌باشند.

از آنجا که هدف این تحقیق مقایسه توسعه‌ی زمانی گودال آبشستگی تکیه‌گاه شاهد با تکیه‌گاه‌های زبری‌دار و همچنین بررسی مکانیزم جریان حول تکیه‌گاه‌ها بوده است لذا معیار کومار برای زمان تعادل نسبی انتخاب گردید. با توجه به آزمایش‌های کومار و همکاران

از آنجا که حداکثر عمق آبشستگی در شرایط جریان آب‌زال^۱ و آستانه حرکت ذرات^۲ رخ می‌دهد، آزمایش‌ها در چنین شرایطی انجام گردید. به گفته چام‌پور و کاشفی‌پور (۱۳۹۵) شرایط آب‌زال به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن شرایط جریان در فلوام کمتر از شرایط آستانه حرکت رسوبات باشد و لذا حرکت رسوب از بالادست محل آبشستگی وجود ندارد. بنابراین به‌منظور جلوگیری از فرسایش و انتقال رسوبات در بالادست تکیه‌گاه، سرعت متوسط جریان باید کمتر از سرعت بحرانی ($V < V_c$) باشد. که در این تحقیق با توجه به نکات بالا و با استفاده از نمودار اصلاح شده شیلدز توسط هندرسون و همچنین با استفاده از رابطه‌ی رادکیوی و ساترلند (۱۹۸۸) رابطه ۲، $V/V_c = 0.95$ و عمق جریان ۱۲ سانتی‌متر بدست آمد.

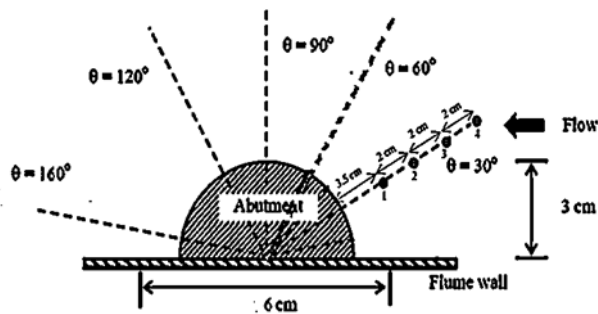
$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \log \frac{u_{*c} z_c}{\nu} + 5.5 \quad [2]$$

که در اینجا u_{*c} سرعت برشی بحرانی و z_c عمق بحرانی و ν لزجت سینماتیکی می‌باشد. تکیه‌گاه زبری‌دار استفاده شده به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌کنید ابعاد و پارامترهای مربوط به زبری‌ها به کمک حروف نمایان

¹Clear water

²Incipient motion

تکیه‌گاه می‌باشد برای این منظور شبکه‌ای مشخص در اطراف تکیه‌گاه در نظر گرفته شد (شکل ۶).



شکل ۶- برداشت پروفیل‌های سرعت در اطراف تکیه‌گاه.

تحلیل ابعادی: قبل از انجام آزمایش‌ها ابتدا به واسطه تحلیل ابعادی، پارامترهای مهم در پدیده ابشستگی در اطراف دماغه تکیه‌گاه بررسی شد. عوامل مورد استفاده در تحلیل ابعادی عبارتند از:

- عوامل مربوط به هندسه کانال: عرض کانال در مقطع قبل از تکیه‌گاه (B_1)، عرض کانال در مقطع تنگ شده (B_2) و شیب کانال (S).

- پارامترهای مربوط به هندسه تکیه‌گاه: طول یا بیرون‌زدگی تکیه‌گاه در مقابل جریان (L)، فاصله‌ی زبری‌ها (a)، بیرون‌زدگی یا عمق زبری (b) و ضخامت یا ارتفاع زبری (c).

- عوامل مربوط به هیدرولیک جریان: سرعت متوسط جریان در مقطع قبل از تکیه‌گاه (V)، عمق جریان (Y)، بیشینه عمق ابشستگی دماغه تکیه‌گاه (h_s)، شتاب ثقل (g).

- عوامل مربوط به اندازه رسوبات بستر: قطر متوسط ذرات (D_{50})، چگالی رسوبات بستر (G_s) و سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر (V_c).

- عوامل مربوط به خواص سیال: جرم مخصوص سیال (ρ) و لزوجت دینامیکی (μ).

(۱۹۹۹)، زمانی به عنوان زمان تعادل نسبی ابشستگی انتخاب شد که سه ساعت پس از آن، عمق ابشستگی کمتر از یک میلی‌متر تغییر کند. بنابراین با توجه به اهمیت مسئله زمان در آزمایش‌ها ابتدا آزمایش‌هایی جهت تعیین زمان تعادل نسبی ابشستگی به مدت ۲۴ ساعت انجام گردید و با توجه به توسعه ابشستگی و تغییرات زمانی، با در نظر گرفتن ۹۰ درصد عمق ابشستگی ماکزیمم کناره تکیه‌گاه، زمان تعادل نسبی یا زمان توقف آزمایش‌ها ۸ ساعت بدست آمده است. سپس این گودال ابشستگی با سیمان تثبیت گردید و داده‌برداری توسط دستگاه سرعت‌سنج ADV^۱ که نحوه‌ی قرارگیری آن در شکل ۵ آمده، انجام گرفت.



شکل ۵- نمایی از دستگاه ADV و برداشت پروفیل سرعت در اطراف تکیه‌گاه.

در تحقیق حاضر اندازه‌گیری‌ها با فرکانس ۲۰۰ هرتز و در زمان دو دقیقه برداشت شد، صحت و کیفیت داده‌های برداشت شده به وسیله دستگاه ADV با کنترل دو پارامتر همبستگی^۲ و نسبت سیگنال به نویز^۳ که در حین آزمایش به وسیله دستگاه قابل اندازه‌گیری است انجام شد، که بر این اساس پارامتر همبستگی بزرگ‌تر از ۷۰ و نسبت سیگنال به نویز بزرگ‌تر از ۱۵ در نظر گرفته شده است.

پس از تثبیت بستر، به منظور بررسی پروفیل‌های سرعت نیاز به اندازه‌گیری و داده‌برداری در اطراف

¹Acoustic doppler velocimetry

²Correlation

³Signal to Noise Ratio

گذاشته شدند. همچنين چون عمق نهايى گودال آبشستگى در اين مقاله مد نظر است، در نهايت رابطه به صورت زير خلاصه شد:

$$\frac{h_s}{y} = f\left(\frac{a}{L}\right) \quad [4]$$

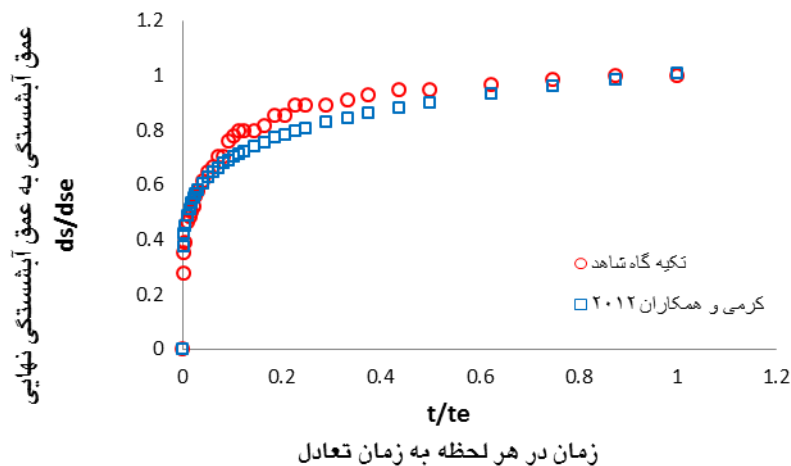
نتايج و بحث

در شكل ۷ توسعه زمانى عمق آبشستگى بى بعد در براى تكيه گاه پل با نتايج كرمى و همكاران (۲۰۱۲) در شرايط آبشستگى آب زلال مقايسه شده است. مقايسه ها نشان از تطابق خوب روند آبشستگى تحقيق حاضر با معادله ۱ را دارد. همان طور كه از شكل پيداى آبشستگى در اوایل زمان با سرعت بيشترى گسترش مى يابد و با گذشت زمان به يك تعادل نسبي دست پيدا مى كند.

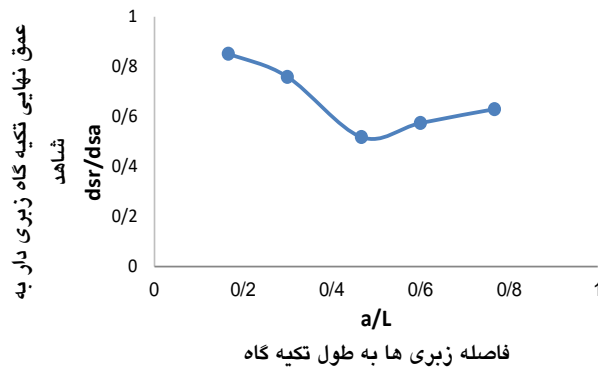
با در نظر گرفتن جرم مخصوص سيال (ρ)، عمق جريان (y) و سرعت متوسط جريان (v) به عنوان پارامترهاى تكرارى و با استفاده از روش باكينگهام مى توان پارامترهاى بدون بعد مهم را به صورت زير بدست آورد:

$$\frac{h_s}{y} = f\left(\frac{b}{c}, \frac{a}{L}, \frac{B_1}{B_2}, \frac{v}{v_c}, Re, Fr, s\right) \quad [3]$$

با توجه به اين كه قطر متوسط مصالح در تمام آزمایشها برابر مى باشد و اثر پارامتر سرعت در عدد فرود جريان لحاظ شده است و عدد فرود در آزمایشها ثابت مى باشد، در نتيجه از پارامترهاى مربوطه صرف نظر شده است. به علاوه به علت اينكه محدوده عدد رينولدز براى اين آزمایشها نزديك ۲۰۰۰۰ مى باشد و جريان آشفته است، از پارامتر Re صرف نظر شد. پارامترهاى $\frac{B_1}{B_2}, \frac{b}{c}$ و S نيز به دليل ثابت بودن کنار



شكل ۷- مقايسه نمودار توسعه زمانى آبشستگى در تكيه گاه شاهد و كرمى و همكاران (۲۰۱۲).



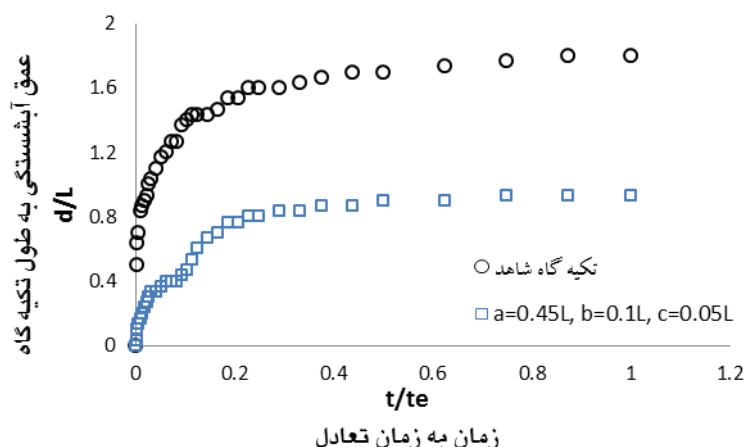
شکل ۸- تأثیر فاصله زبری‌ها در کاهش آبشستگی.

باعث مستهلک شدن آن شده که این امر سبب می‌گردد که با افزایش فاصله‌ی میان زبری‌ها نسبت به کمترین حالت، کاهش عمق نهایی آبشستگی مشاهده گردد. اما این افزایش فاصله دارای یک مقدار ماکزیمم است و بعد از این مقدار، افزایش فاصله بین زبری‌ها موجب افزایش دوباره عمق آبشستگی خواهد شد. به نظر می‌رسد زیاد بودن فاصله بین زبری‌ها موجب کاهش سطح مؤثر موجود در مسیر جریان رو به پایین و کمبود تعداد زبری می‌شود، که در نهایت به دلیل قدرتمندتر شدن جریان روبه‌پایین افزایش دوباره عمق آبشستگی را در پی خواهد داشت. بنابراین وجود یک مقدار بهینه برای فاصله بین زبری‌ها سبب افزایش عملکرد زبری و کاهش مقدار آبشستگی می‌گردد.

با توجه به شکل بالا تکیه‌گاه دارای فاصله بین زبری‌ها ($a = 0.45L$) بیشترین عملکرد را در کاهش عمق آبشستگی دارد. شکل ۹ مقایسه روند آبشستگی این تکیه‌گاه را با تکیه‌گاه شاهد نشان می‌دهد.

شکل ۸ میزان تأثیرگذاری فاصله زبری‌ها بر روی عمق نهایی آبشستگی در ارتفاع و بیرون‌زدگی ثابت زبری را نشان می‌دهد. محور عمودی نمودار، نسبت عمق نهایی آبشستگی تکیه‌گاه‌های زبری‌دار به عمق نهایی آبشستگی تکیه‌گاه شاهد می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها مشاهده شد که نزدیکی بیش از حد زبری‌ها به هم موجب کاهش فضای مناسب بین زبری‌ها و افزایش طول مؤثر تکیه‌گاه ($L+b$) در مقابل جریان می‌شود که موجب کاهش کمتر آبشستگی نسبت به فواصل دیگر شده است. با افزایش فاصله‌ی بین زبری‌ها از میزان حداقلی که برای فاصله بین زبری‌ها در نظر گرفته شده است، روند و عمق آبشستگی نهایی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد دلیل کاهش این باشد که با افزایش فاصله‌ی بین زبری‌ها و در نتیجه کاهش طول مؤثر تکیه‌گاه، ما بین این فاصله‌ها فضای بیشتری برای به وجود آمدن جریان روبه‌پایین و افزایش سرعت این جریان وجود داشته باشد. هنگامی که این جریان با سرعت بیشتری با زبری برخورد کند،



شکل ۹- مقایسه نمودار توسعه زمانی آبشستگی در تکیه‌گاه شاهد با تکیه‌گاه زبری‌دار.

شدت و روند آبشستگی و همچنین عمق نهایی آبشستگی کاسته می‌شود. در شکل ۱۰ تصاویر گودال نهایی آبشستگی در تکیه‌گاه شاهد و نیز در تکیه‌گاه با بهترین عملکرد زبری آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود وجود زبری-ها از قدرت جریان روبه پایین می‌کاهد و از آن‌جا که گردابه‌های اولیه (نعل اسبی) در اثر جریان روبه پایین به وجود می‌آیند، گردابه‌های اولیه ضعیف‌تر شده و از

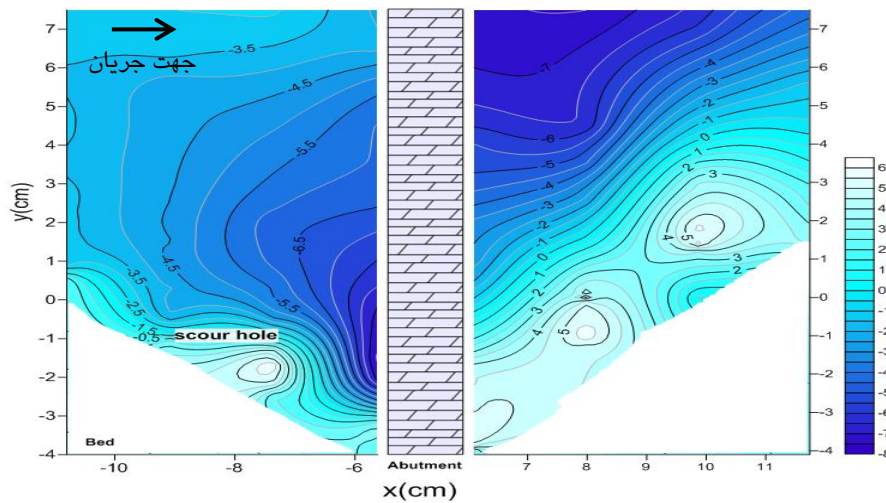


شکل ۱۰- مقایسه تصاویر پدیده آبشستگی در تکیه‌گاه شاهد و تکیه‌گاه زبری‌دار $a=0.45L$.

در درون گودال و نزدیک بستر مقادیر سرعت کوچک شده و سرعت مقادیر مثبت به خود می‌گیرد که به معنای برخورد جریان به بستر و حرکت آن رو به بالا است که سپس با هم سو شدن جریان موجب تشکیل گردابه‌های اولیه می‌گردد. همچنین در پشت تکیه‌گاه در نزدیکی بستر و درون گودال آبشستگی مقادیر مثبت سرعت قائم و گردابه‌های موجود نشان از گردابه‌های برخاستگی در نواحی پشت تکیه‌گاه می‌باشد که ذرات رسوب را از بستر بلند کرده و در جهت جریان به پایین‌دست منتقل می‌کند.

با توجه به این که تکیه‌گاه دارای فاصله بین زبری‌ها $(a=0.45L)$ از عملکرد بالاتری برخوردار بود برای بررسی پروفیل جریان و مقایسه آن با تکیه‌گاه شاهد، مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل ۱۱ خطوط هم سرعت قائم جریان در اطراف تکیه‌گاه شاهد آورده شده است تا تغییرات به وجود آمده در اطراف تکیه‌گاه مشخص شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود در جلو تکیه‌گاه سرعت در خارج از گودال دارای مقادیر منفی می‌باشد که نشان از جریان رو به پایین به دلیل برخورد آن با تکیه‌گاه دارد.



شکل ۱۱- خطوط هم سرعت قائم (W) در اطراف تکیه‌گاه شاهد.

دی و ریکار (۲۰۰۷) این مقدار را $0.6U$ در درون حفره و به فاصله حدود 0.4 برابر عمق آبشستگی موضعی از سطح اولیه بستر بیان کردند. هر چند این محققین بیان نموده‌اند که این مقدار با نزدیک شدن به پایه (امکان اندازه‌گیری توسط ADV وجود ندارد) بیشتر هم می‌تواند باشد. نتایج ساکر (۱۹۹۸) حداکثر مقدار جریان رو به پایین را برابر با $0.78U$ نشان می‌دهد. دی و باربویا (۲۰۰۵a) نشان دادند تغییرات w به صورت غیر خطی است به طوری که در نزدیک بستر و در درون گودال جریان آن رو به بالاست. آن‌ها حداکثر مقدار جریان رو به پایین $0.55U$ بیان کردند. در این تحقیق حداکثر سرعت رو به پایین $0.32U$ و در فاصله $2/L$ و در درون حفره آبشستگی رخ داد. جدول ۱ نتایج حاصل از حداکثر سرعت قائم (رو به پایین) در اطراف تکیه‌گاه شاهد و بهترین عملکرد زبری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ آورده شده است مقادیر سرعت رو به پایین قابل توجه و اکثراً در نزدیکی تکیه‌گاه رخ داده‌اند. اما برای تکیه‌گاه زبری‌دار این مقادیر نسبت به تکیه‌گاه شاهد با کاهش روبرو بوده است به طوری که برای زاویه 30° و 160° درجه بترتیب به میزان $0.13U$ و $0.4U$ کاسته شده است.

شکل ۱۲ پروفیل‌های سرعت قائم در اطراف تکیه‌گاه زبری‌دار ($a = 0.45L$) و تکیه‌گاه شاهد برای نقطه $1/5$ سانتی‌متری از لبه تکیه‌گاه و زوایای مشخص شده را نشان می‌دهد. در پروفیل‌های تکیه‌گاه شاهد و در زوایای 30° ، 60° و 90° درجه سرعت در نزدیکی کف گودال مثبت شده است و همچنین افزایش قابل توجه قدرمطلق سرعت‌های منفی در اعماق بالا نمایان می‌گردد، به طوری که در پروفیل 1 زاویه 30° درجه مقدار سرعت در راستای عمودی برابر $9/2$ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. با نزدیک شدن به سطح آب سرعت‌های قائم کوچک‌تر شده ولی هنوز منفی بوده و به سمت پایین می‌باشند. بنابراین وجود سرعت‌های منفی در اعماق بالا، نشان از وجود جریان‌های رو به پایین به سمت بستر است که در نتیجه‌ی گرادیان فشار به وجود آمده و موجب ایجاد گرداب‌های اولیه (نعل اسبی) در جلوی تکیه‌گاه (در شروع آبشستگی) و درون گودال (پس از آبشستگی و ایجاد گودال) شده است.

گراف و ایستیار تو (۲۰۰۲) حداکثر مقدار سرعت قائم رو به پایین را در درون حفره در جلو پایه و در حدود $0.44U$ (سرعت نزدیک شونده یا سرعت متوسط جریان در مرکز کانال بالاتر از تکیه‌گاه) گزارش داده‌اند.

جدول ۱- نتایج حاصل از بیشینه سرعت قائم (رو به پایین) در اطراف تکیه‌گاه شاهد و زبری‌دار.

زوایا (degree)	مقدار بیشینه سرعت قائم تکیه‌گاه شاهد(-)	فاصله بیشینه سرعت قائم از مرکز تکیه‌گاه شاهد(-)	مقدار بیشینه سرعت قائم تکیه‌گاه زبری‌دار(-)	فاصله بیشینه سرعت قائم از مرکز تکیه‌گاه زبری‌دار(-)
۳۰	۰/۳۲U	۲/۲L- درون حفره	۰/۱۹U	۲/۲L- درون حفره
۶۰	۰/۳۱U	۲/۲L- درون حفره	۰/۱۷U	۲/۲L- درون حفره
۹۰	۰/۱۹U	۲/۲L- درون حفره	۰/۱۵U	۲/۲L- خارج حفره
۱۲۰	۰/۳۱U	۲/۲L- خارج حفره	۰/۱۷U	۲/۲L- خارج حفره
۱۶۰	۰/۳۶U	۲/۸L- خارج حفره	۰/۲۲U	۲/۲L- خارج حفره

با توجه به شکل ۱۲ در پایین دست گودال و در زوایای ۱۲۰ و ۱۶۰ درجه سرعت‌های عمودی مجدداً افزایش زیادی را نشان می‌دهند. در این ناحیه سرعت‌های مثبت از ۲۰ تا ۲۵ درصد عمق به طرف کف شروع و تا فاصله ۹/۵ سانتی‌متر از تکیه‌گاه در هر دو زاویه ۱۲۰ و ۱۶۰ مفروض است که نشان از وجود ورتکس‌های برخاستگی در پشت تکیه‌گاه می‌باشد. دی و باربویا (۲۰۰۵a و ۲۰۰۵b) و باربویا و دی (۲۰۰۳ و ۲۰۰۴) سرعت‌های عمودی مثبت و بزرگ در ناحیه‌ی پایین دست تکیه‌گاه‌ها را گزارش کرده‌اند آن‌ها علت این پدیده را مکش‌هایی می‌دانند که در این ناحیه به علت گرداب‌های برخاستگی رخ می‌دهد.

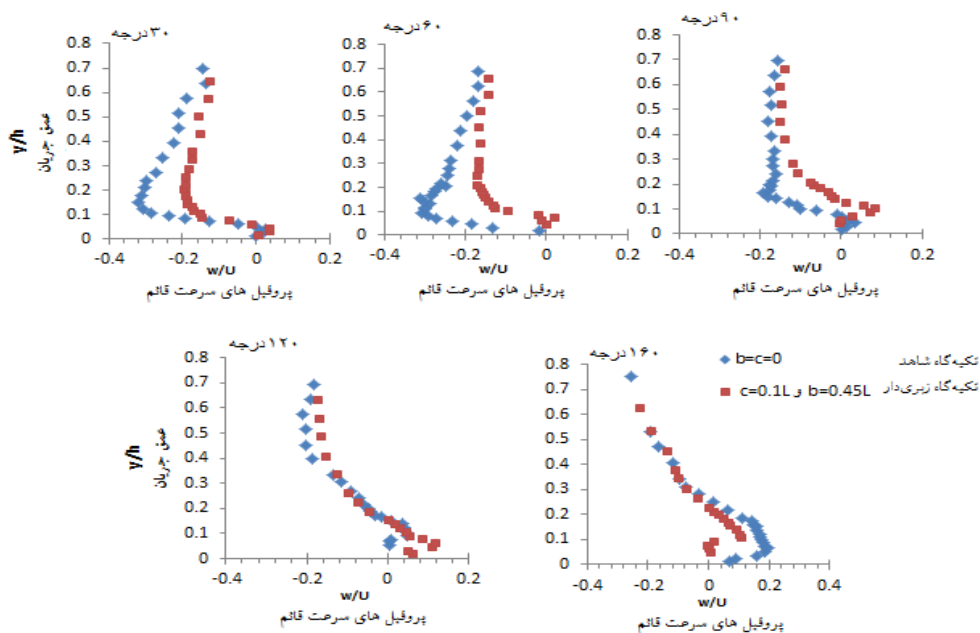
بیشینه سرعت رو به بالا در پایین دست تکیه‌گاه توسط ساکر (۱۹۹۸) $0/66U$ و توسط گراف و ایستیار تو (۲۰۰۲) حدود $0/40U$ بیان گردید. در این تحقیق نیز حداکثر سرعت رو به بالا برابر $0/21U$ و در فاصله $3/5L$ از مرکز تکیه‌گاه رخ داد. جدول ۲ نتایج حاصل از بیشینه سرعت قائم (رو به بالا) در اطراف تکیه‌گاه شاهد را با تکیه‌گاه زبری‌دار نشان می‌دهد. برای تکیه‌گاه زبری‌دار این مقادیر نسبت به تکیه‌گاه شاهد با کاهش روبرو بوده است و همچنین باعث جابجایی مکانی در موقعیت سرعت بیشینه روبه بالا شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از بیشینه سرعت قائم (رو به بالا) در اطراف تکیه‌گاه شاهد.

زوایا (درجه)	مقدار بیشینه سرعت قائم تکیه‌گاه شاهد(-)	فاصله بیشینه سرعت قائم از مرکز تکیه‌گاه شاهد(-)	مقدار بیشینه سرعت قائم تکیه‌گاه زبری‌دار(-)	فاصله بیشینه سرعت قائم از مرکز تکیه‌گاه زبری‌دار(-)
۳۰	۰/۱۲U	۲/۸L- درون حفره	۰/۰۳۶U	۲/۲L- درون حفره
۶۰	۰/۰۳۱U	۲/۸L- درون حفره	۰/۰۲U	۲/۲L- درون حفره
۹۰	۰/۱۲U	۲/۸L- درون حفره	۰/۰۸۶U	۲/۲L- درون حفره
۱۲۰	۰/۱۵U	۳/۵L- درون حفره	۰/۱۲U	۲/۲L- درون حفره
۱۶۰	۰/۲۱U	۳/۵L- درون حفره	۰/۱۰U	۲/۲L- درون حفره

روند جریان قائم در محور ۱۲۰ و ۱۶۰ درجه در هر دو تکیه‌گاه تا حدودی یکسان است همچنین مقادیر سرعت‌ها تقریباً باهم برابرند به ویژه در سطح آب ولی در حفره و نزدیک بستر کمی اختلاف دارند که به دلیل کوچک شدن گودال و تأثیرات زبری بر روی گرداب‌های برخاستگی می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۲ در محور ۳۰ و ۶۰ درجه سرعت جریان رو به پایین نسبت به تکیه‌گاه شاهد به طور مشخص کاهش پیدا کرده است که به دلیل وجود زبری و ایجاد مانع در برابر این نوع جریان می‌باشد که سبب کاهش قدرت گرداب‌های اولیه و کاهش عمق نهایی آبشستگی و شدت روند آن در طی آزمایش شده است. در محور ۹۰ درجه نیز سرعت جریان رو به پایین نسبت به جریان در تکیه‌گاه شاهد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- مقایسه پروفیل‌های سرعت قائم در دو حالت تکیه‌گاه با زبری و بدون زبری در فاصله ثابت ۳/۵ سانتی‌متر از تکیه‌گاه و در زوایای ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ درجه.

رابطه معناداری بین عملکرد زبری‌ها و فاصله بین آن‌ها وجود دارد. کم بودن فاصله بین زبری‌ها که موجب کاهش فضای مناسب بین زبری‌ها و افزایش طول تکیه‌گاه می‌شود. همچنین زیاد بودن فاصله بین زبری‌ها موجب کاهش سطح مؤثر موجود در مسیر جریان رو به پایین و کمبود تعداد زبری می‌گردد، بنابراین وجود یک مقدار بهینه برای فاصله بین زبری‌ها سبب افزایش عملکرد زبری و کاهش مقدار آبشستگی شده است.

همچنین وجود سرعت‌های قائم مثبت درون حفره در بالادست تکیه‌گاه و سرعت‌های منفی در اعماق بالاتر،

نتیجه‌گیری کلی

وجود زبری روی تکیه‌گاه و ایجاد مانع در برابر جریان رو به پایین به عنوان عامل اصلی کاهش عوامل آبشستگی مطرح است. زبری‌ها با کم کردن سرعت جریان روبه‌پایین، قدرت گرداب‌های اولیه و برخاستگی را تضعیف کرده، به طوری که در بهترین حالت (فاصله بین زبری‌ها $a=0.45L$ و $b=0.1L$ ، ارتفاع زبری $c=0.05L$) علاوه بر کاهش شدت در روند آبشستگی موجب کاهش ۴۷٪ درصدی عمق نهایی آبشستگی شده است.

کاهش پیدا کرده و به دلیل تأثیرات زبری بر روی پروفیل‌های سرعت قائم در پشت تکیه‌گاه روند و گودال آبشستگی کاهش یافته است. بنابراین می‌توان از زبری-های موضعی به عنوان یک روش عملی در هنگام بتن-ریزی و کم هزینه و کارآمد در کنترل و کاهش آبشستگی استفاده کرد.

نشان از وجود جریان‌های رو به پایین به سمت بستر است که در نتیجه‌ی گرادیان‌های فشار به وجود آمده‌اند و همچنین موجب ایجاد ورتکس‌های قوی در درون حفره و در جلوی تکیه‌گاه شده‌اند. با توجه به نتایج این تحقیق و با نگاهی به پروفیل‌های سرعت در راستای قائم می‌توان اظهار داشت، مقدار سرعت جریان رو به پایین برای تکیه‌گاه زبری‌دار به مقدار قابل توجهی

منابع مورد استفاده

- Afzalimehr H, Bakhshi S, Gallichand J and Sui J, 2014. Effect of vegetated-banks on local scour around a wing-wall abutment with circular edges. *Journal of Hydrodynamics* 26(3): 447-457.
- Alizadeh VN, Saneie M, and Azhdary Moghaddam, M, 2012. Experimental investigations on effect of buried vane' angels to control scour at vertical wall abutments and spur dykes. 9th International Congress on civil engineering. Isfahan.
- Barbhuiya AK and Dey S, 2004. Velocity and turbulence at a wing-wall abutment. *Sadhana, Academy Proceedings in Engineering Sciences* 29(1): 35-56.
- Barbhuiya AK and Dey S, 2003. Vortex flow field in a scour hole around abutments. *Sediment Research* 18(4): 310-325.
- Champour M and Kashefipour S, 2016. Laboratory investigation on the effect of permeable spur dike length on scour hole dimensions in a mild 90 degrees bend under non-submerged conditions. *Water and Soil Science - University of Tabriz* 26(2-2): 163-175. (In Farsi)
- Dey S and Barbhuiya AK, 2005b. Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment. *Canadian Journal of Civil Engineering* 32(1): 213-232.
- Dey S and Barbhuiya AK., 2005a. Flow field at a vertical-wall abutment. *Journal of Hydraulic Engineering* 131(12):1126-1135.
- Dey S and Raikar RV, 2007. Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(4): 399-413.
- Graf WH and Istiarto I, 2002. Flow pattern in the scour hole around a cylinder. *Journal of Hydraulic Research* 40(1): 13-20.
- Hong SH, Sturm TW and Stoesser T, 2015. Clear water abutment scour in a compound channel for extreme hydrologic events. *Journal of Hydraulic Engineering* 141(6): 04015005.
- Karami H, Ardeshir A, Saneie M and Salamatian SA, 2012. Prediction of time variation of scour depth around spur dikes using neural networks. *Journal of Hydroinformatics* 14(1):180-191.
- Koken M, and Constantinescu G, 2014. Flow and turbulence structure around abutments with sloped sidewalls. *Journal of Hydraulic Engineering* 140(7): 04014031.
- Kumar V, Raju KGR and Vittal N, 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(12): 1302-1305.
- Melville B, 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering* 118: 615-631.
- Parchami L, Asghari Pari S and Shafai Bajestan M, 2017. experimental investigation of submerged vanes shape effect on bridge pier scouring. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 27(1): 29-41. (In Farsi)
- Raudkivi AJ and R Ettema, 1983. clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(3): 338-350.
- Saker MA, 1998. Flow measurement around scored bridge piers using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). *Flow Measurement and Instrumentation* 9:217-227.
- Shahsavari H, Heidarpour M and Rahiminia A, 2015. Investigation velocity profiles in three directions x, y, z around a semi-circular abutment. 13th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman, Shahid Bahonar University of Kerman. (In Farsi)

Shahsavari H and Heidarpour M, 2014. Investigation the effects of the size and the level of collar on semi-circular abutment scouring. National Conference on Civil Engineering, Urban Development and Sustainable Development, Tehran, Center for Sustainable Development of Science and Technology Farzin, Shahid Beheshti University. (In Farsi)