

بررسی تأثیر تجمع اجسام شناور چوبی در آبشستگی جلوی پایه دایره‌ای شکل دارای سیستم صفحه شمع

سید میثم مشعشی^۱، مهدی اسدی آقبلاغی^{۲*}، حسین صمدی بروجنی^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۴/۱۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mahdi.asadi.a@gmail.com

چکیده

اجسام شناور چوبی بزرگ توسط سیل حمل و در جلوی پایه‌ها جمع می‌شوند و باعث افزایش آبشستگی در اطراف پایه گردیده و ممکن است باعث خرابی پل‌ها شوند. در این تحقیق اثر تجمع اجسام شناور چوبی بر روی آبشستگی اطراف پایه دایره‌ای مستقرشده بر روی یک صفحه شمع‌دار در یک مطالعه آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال برای دو دبی ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه در دو حالت با و بدون تجمع اجسام شناور در جلوی پایه و برای ابعاد مختلف اجسام شناور انجام گرفت. نتایج نشان داد در حالتی که اجسام شناور وجود ندارند، میزان آبشستگی اطراف پایه دایره‌ای مستقر بر صفحه شمع‌دار نسبت به حالت بدون صفحه شمع‌دار، ۸۰ درصد کمتر است. همچنین وجود اجسام شناور در جلوی پایه دایره‌ای با صفحه شمع‌دار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش عمق، عرض و طول گودال آبشستگی دارد. به طوری که تجمع این اجسام می‌تواند عمق آبشستگی را ۱۲ تا ۱۴ برابر نسبت به حالت بدون اجسام شناور افزایش دهد. به علاوه با استفاده از تحلیل ابعادی معادله جدیدی برای پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی با وجود تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه دایره‌ای مستقر بر صفحه شمع‌دار ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: آب زلال، آبشستگی موضعی، اجسام شناور چوبی، پایه پل، تحلیل داده‌ها

Effect of Woody Debris Accumulation on the Scour in Front of a Circular Shaped Pier with Plate Pile System

SM Moshashaie¹, M Asadi Aghbolaghi^{2*}, H Samadi Brojeni³

Received: 12 January 2014 Accepted: 3 July 2013

¹ M.Sc. Student, Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Shahrekord, Iran

² Assist. Prof., Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Shahrekord, Iran

³ Assoc. Prof., Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Shahrekord, Iran

*Corresponding Author, Email: mahdi.asadi.a@gmail.com

Abstract

Large woody debris is transported and accumulated in front of piers by floods which increases the scour around the bridge piers and it may cause the bridge failure. In this study, the effect of woody debris accumulation on the scour around a circular pier installed on the pile cap was experimentally investigated. The experiments were performed under clear water condition with two discharges of 30 and 40 L s⁻¹ with and without debris accumulation in front of the pier for different sizes of the woody debris. The results showed that in the case of no debris accumulation, the scour around the circular pier with pile cap was 80% less than that around the pier without pile cap. The existence of the debris in front of a pier with pile cap significantly increased the depth, width and length of the scour hole. The accumulation of this debris could increase the scour depth 12-14 times as compared with the case of no debris. In addition, a new equation was presented using dimensional analysis for prediction of the maximum scour depth in the existence of debris accumulation in front of a circular pier.

Keywords: Bridge pier, Clear water, Data analysis, Local scour, Woody debris

مقدمه

یکی از مهمترین عوامل آسیب و خرابی سازه‌های هیدرولیکی، آبشستگی است. آبشستگی را می‌توان به انواع مختلف تقسیم کرد که شامل آبشستگی موضعی، عمومی و آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع می‌باشد. هرگاه تنش برشی جریان از تنش برشی بستر در هر مقطع از رودخانه بزرگتر گردد کفکنی رخ خواهد داد که به آن آبشستگی عمومی می‌گویند. هرگاه مقطعی از رودخانه در اثر عوامل طبیعی یا مصنوعی تنگ گردد در این مقطع آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی اتفاق می‌افتد. آبشستگی موضعی نیز در اطراف تکیه‌گاه و پایه پل‌ها اتفاق می‌افتد که از نظر وضعیت حمل

رسوب، شامل آبشستگی در شرایط آب زلال و آبشستگی در شرایط آب حاوی رسوب می‌باشد (لاگاس و همکاران ۲۰۱۰). با شناخت الگوی جریان در اطراف اشکال هندسی پایه‌ها می‌توان صدمات ناشی از تخریب پایه پل‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش داد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای در ایجاد حفره آبشستگی اطراف پایه پل دارند (بروزرز و رادکیوی ۱۹۹۱). درگاهی (۱۹۹۰)، آغاز آبشستگی در کناره‌های پایه را ناشی از افزایش سرعت جریان دانست. به نظر ایشان بیشینه عمق آبشستگی، در اثر جریان پایین‌دست و گرداب‌های نعل اسبی شکل‌گرفته در بالادست اتفاق می‌افتد. ملویل و

شناور می‌توان قطر پایه را افزایش داد و رابطه زیر را برای قطر پایه معادل پیشنهاد کردند:

$$D_e = \frac{[0.52Td_d + (h - 0.52T)D]}{h} \quad [1]$$

که در این رابطه؛ D_e قطر پایه معادل یا هم ارز است، h و D به ترتیب عمق آب و قطر پایه پل، T و d_d هم به ترتیب ضخامت (ارتفاع) و عرض اجسام شناور هستند. شکل ۱، تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه پل‌های، مربعی با دماغه تیز و دایره‌ای واقع در استان چهارمحال و بختیاری را نشان می‌دهد که در این تصویر اجسام شناور چوبی به شکل مستطیل در جلو پایه انباشته شده‌اند و در مواقع سیلابی این انباشتگی چندین برابر می‌شود که این تجمع افزایش آبخستگی و حتی می‌تواند تخریب پل را نیز به همراه داشته باشد. از این رو گروهی از محققان راهکارهایی مانند استفاده از روبنده‌های اجسام شناور^۱ را برای جلوگیری از تجمع اجسام شناور پیشنهاد کردند (برادریک و همکاران ۲۰۰۱). این روبنده به طور مستقیم در بالادست پایه به صورت عمودی در جلو پایه نصب و با سرعت جریان آب، پرها به چرخش درمی‌آیند و این چرخش مانع از جلوگیری تجمع اجسام شناور می‌شود.

اگرچه در مورد بررسی تأثیر اجسام شناور چوبی بر عمق آبخستگی موضعی بر پایه دایره‌ای شکل کارهای تحقیقاتی انجام شده ولی برای حالتی که پایه دایره‌ای شکل بر روی صفحه شمع‌دار نصب شده باشد، مطالعاتی انجام نگرفته است. لذا در این مقاله عمق آبخستگی موضعی در حضور اجسام شناور در اطراف یک پایه دایره‌ای با شمع مطالعه می‌شود. نتایج به صورت نمودار و جدول ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین یک معادله برای پیشینه عمق آبخستگی، در اثر تجمع اجسام شناور چوبی مستطیلی در جلو پایه دایره‌ای با صفحه شمع‌دار با استفاده از تحلیل ابعادی ارائه شد.

چیو (۱۹۹۹) به بررسی طبقه‌بندی آبخستگی در شرایط آب زلال و بستر زنده بر اساس سرعت جریان و عمق حفره آبخستگی پرداختند. از نظر ایشان هرگاه سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی U_C ، بیشتر از سرعت متوسط جریان U باشد آبخستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد ($U > 0.3U_C$)، در غیر این صورت شرایط با بستر زنده یا متحرک را ایجاد می‌کند.

تجمع اجسام شناور چوبی و کنده درختان در اطراف پایه‌های پل بیشتر از تجمع در اطراف یک پایه باعث انسداد جریان آب رودخانه می‌شود. افزایش آبخستگی باعث افزایش سرعت در زیر این اجسام و در نتیجه آبخستگی‌های بیشتر و رسوب‌زدایی و کف‌کنی بیشتری در مقایسه با عدم تجمع اجسام شناور می‌باشد (لارسن و توچ ۱۹۵۶، دیهل ۱۹۹۷). افزایش آبخستگی در جلوی پایه پل باعث از بین رفتن تکیه‌گاه‌های پل و در نهایت منجر به خرابی غیرمنتظره پل‌ها می‌شود. به عنوان مثال، در اثر تجمع اجسام شناور چوبی و تشدید آبخستگی، پل فوقانی رودخانه می‌سی‌سی‌پی در سال ۱۹۹۳ (هاگرتی و همکاران ۱۹۹۵) و پل پرکینس در ایالت تنسی در سال ۱۹۹۸ (لاگاس و همکاران ۲۰۱۰) تخریب گردیدند.

در تحقیقات تجربی و میدانی، کمتر به بررسی تأثیرات تجمع اجسام شناور چوبی بر آبخستگی پایه پل‌ها پرداخته شده است (ملویل و دانگول ۱۹۹۲، دیهل ۱۹۹۷، کاتل و اریکسون ۱۹۹۸، بردلی و همکاران ۲۰۰۵، زونبرگ و همکاران ۲۰۰۶، پاگلیارا و کارناسینا ۲۰۱۰، لاگاس و همکاران ۲۰۱۰، پاگلیارا و کارناسینا ۲۰۱۱، لیوت و همکاران ۲۰۱۲). تنها برخی از این تحقیقات روش‌هایی برای ارزیابی تأثیرات تجمع اجسام شناور چوبی بر آبخستگی پایه پل‌ها پیشنهاد کرده‌اند (ملویل و دانگول ۱۹۹۲، پاگلیارا و کارناسینا ۲۰۱۰، لاگاس و همکاران ۲۰۱۰، پاگلیارا و کارناسینا ۲۰۱۱). ملویل و دانگول (۱۹۹۲) در مطالعه آزمایشگاهی، اجسام شناور چوبی را در جلوی پایه استوانه‌ای شکل قرار دادند و اثر آن‌ها را بر آبخستگی پایه پل بررسی کردند. آن‌ها عنوان کردند برای در نظر گرفتن اثر تجمع اجسام

^۱- Debris sweepers



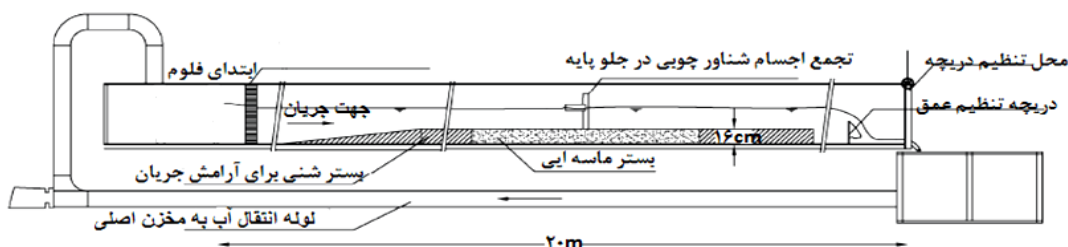
شکل ۱- تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه پل.

مواد و روش‌ها

مشخصات مجرای آب

آزمایش‌ها با دبی‌های ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام شد، در این آزمایش‌ها از یک پایه دایره‌ای به قطر ۶ سانتی‌متر استفاده شد، این پایه بر روی صفحه‌ای به ضخامت ۱ و ابعاد ۲۰*۱۵ سانتی‌متر قرار گرفته و این صفحه بر روی ۴ شمع به طول ۱۵ سانتی‌متر و قطر ۱۲ میلی‌متر قرار گرفته است. آزمایش‌ها برای اجسام شناور مستطیلی با چهار اندازه متفاوت (از نظر طول و عرض، و ارتفاع ثابت) که در جلوی پایه قرار گرفت، انجام شد. عمق آبشستگی در دو حالت با اجسام شناور و بدون اجسام شناور با استفاده از نقطه سنج (کولیس) اندازه‌گیری و با هم مقایسه شد. شکل ۲ نمایی از فلوم آزمایشگاهی و نحوه قرارگیری پایه و اجسام شناور را نمایش می‌دهد.

آزمایش‌ها در مرکز آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد انجام شد. این کانال شامل یک مجرای افقی با دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر است. یک پمپ گریز از مرکز در کانال نصب شده است که بیشترین توان تخلیه آن ۷۰ لیتر بر ثانیه است. همه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال با بستر ماسه‌ای به ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر انجام گرفت. انحراف معیار هندسی $\sigma = 1/1$ و اندازه متوسط دانه‌های ماسه $d_{50} = 0.78$ میلی‌متر می‌باشد. در همه آزمایش‌ها شیب فلوم 0.1 درصد به‌طور ثابت، و عمق جریان در بالای سطح بستر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و نحوه قرارگیری پایه و اجسام شناور چوبی.

$$U_c = \frac{k_s^{0.5} (S_s - 1)^{0.5} d_{50}^{0.5} \gamma^{0.167}}{n} \quad [2]$$

در رابطه فوق U_c سرعت آستانه حرکت رسوبات رسوبات ($m s^{-1}$)، k_s پارامتر بی‌بعد شیلدن، S_s وزن مخصوص ذرات (که مقدار آن ۲/۶۵ و به‌صورت بی‌بعد می‌باشد)، d_{50} قطر متوسط ذرات (m)، γ عمق جریان برحسب (m) و n ضریب زبری مانینگ می‌باشد که از رابطه استریکلر به‌دست می‌آید (چاو ۱۹۵۹). با محاسبه

تعیین سرعت متوسط و سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات به‌منظور اجرای آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با بستر ثابت که در آن به‌جز آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل هیچ‌گونه حرکت رسوبی وجود نداشته باشد تعیین آستانه حرکت رسوبات لازم می‌باشد. بدین منظور سرعت آستانه حرکت ذرات بستر، U_c بر اساس فرمول ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱) تخمین زده شد و به‌صورت زیر می‌باشد:

طراحی اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل در داخل قفسه‌های توری با فاصله عرضی ۱/۲ سانتی‌متر قرار گرفته‌اند، جریان آب به راحتی از این توری‌ها عبور می‌کند (شکل ۳). این قفسه‌ها به شکل مستطیلی و در این اندازه‌های متفاوت مطابق با جدول ۲ می‌باشند. در این جدول، T بیانگر ارتفاع اجسام شناور، d_d عرض اجسام شناور، L_d طول اجسام شناور، D قطر پایه و b نیز بیانگر عرض کانال می‌باشد. این اجسام در سه حالت نسبت به سطح آب جلوی پایه قرار گرفتند؛ هم سطح آب، زیر سطح آب (متوسط عمق) و بالای سطح آب (روی سطح آب).

مقدار عددی 0.31 برای پارامتر شیلدنز $(\frac{d_s}{D} \sqrt{0.1(S_s - 1)gd_s})$ ، سرعت بحرانی در عمق 20 سانتی‌متری که برای تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده برابر با 0.388 متر بر ثانیه محاسبه شد. جدول ۱ محاسبه سرعت متوسط جریان و سرعت بحرانی (سرعت آستانه حرکت رسوبات) در عمق 20 سانتی‌متری را نشان می‌دهد.

جدول ۱: محاسبه سرعت و سرعت آستانه حرکت در عمق 20 سانتی‌متری.

| $h(\text{cm})$ | $U (\text{m s}^{-1})$ | $U_c (\text{m s}^{-1})$ | U/U_c | $Q(\text{L s}^{-1})$ |
|----------------|-----------------------|-------------------------|---------|----------------------|
| ۲۰ | ۰/۲۵۰ | ۰/۳۸۸ | ۰/۶۴۴ | ۳۰ |
| ۲۰ | ۰/۳۳۴ | ۰/۳۸۸ | ۰/۸۶۰ | ۴۰ |

جدول ۲- مشخصات اجسام شناور چوبی به کاررفته در آزمایش.

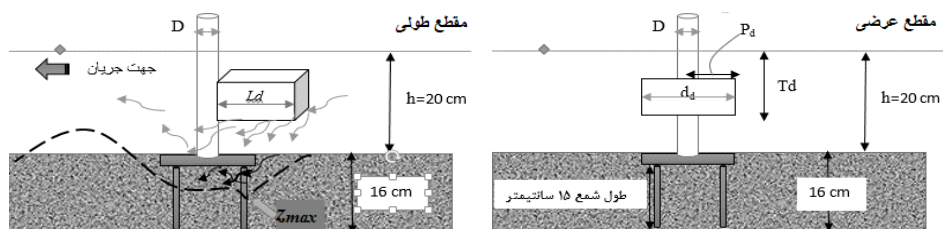
| P_d/L_d | d_d/b | L_d/D | T (cm) | d_d (cm) | L_d (cm) | شکل اجسام شناور چوبی |
|-----------|---------|---------|-------------|---------------|---------------|-------------------------|
| ۰/۶۶ | ۰/۳۳۴ | ۲/۵۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۱۵ | مستطیلی |
| ۱/۰۴ | ۰/۴۱۶ | ۲/۰۰ | ۱۰ | ۲۵ | ۱۲ | مستطیلی |
| ۰/۷۵ | ۰/۵۰۰ | ۳/۳۳ | ۱۰ | ۳۰ | ۲۰ | مستطیلی |
| ۰/۹۰ | ۰/۷۵۰ | ۴/۱۶ | ۱۰ | ۴۵ | ۲۵ | مستطیلی |



شکل ۳- طراحی اجسام شناور چوبی مستطیلی.

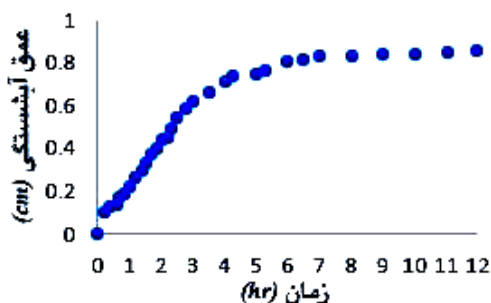
فاصله عرضی از ابتدای اجسام شناور تا مرکز می‌باشد (برابر با نصف عرض پایه) و T_d نیز فاصله سطح آب تا کف اجسام شناور می‌باشد مقدار آن برای حالت‌های مختلف قرارگیری اجسام شناور عبارتند از؛ بالای سطح آب 5 سانتی‌متر، هم سطح آب 10 سانتی‌متر و زیر سطح آب 15 سانتی‌متر.

شکل ۴ به صورت نمادین، نحوه قرارگیری اجسام شناور و ایجاد گودال آبشستگی در این مطالعه را نشان می‌دهد که در آن اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل در جلو پایه در حالت زیر سطح آب قرار دارد. که در آن بیشترین عمق آبشستگی در اطراف پایه می‌باشد. در مقطع طولی، فرورفتگی و بالا آمدگی در سطح بستر در اثر آبشستگی نشان داده شده است. در این شکل P_d



شکل ۴- مشخصات اجسام شناور چوبی در جلو پایه.

شده بود که از این نتایج برای انجام مقایسه استفاده شد.



شکل ۵- نمودار توسعه زمانی آبشستگی برای پایه دایره-ای با صفحه شمع دار.

تحلیل ابعادی

بیشترین عمق آبشستگی در محاسبات اطراف پایه‌های پل (Z)، تابعی از شکل هندسی پل (f_{bg})، جریان آب یا سیل (f_f)، رسوبات (f_{st})، و زمان (f_t)، در نظر گرفته شده است:

$$Z_{Debris} = f \left[f_{bg} \left(D, S_{hd}, A_{lp}, b \right), f_f \left(q, h, v, \rho, g \right), f_{st} \left(d_{50}, \sigma, \rho' \right), f_t \left(t \right) \right] \quad [3]$$

در این رابطه؛ S_{hp} شکل پایه پل، A_{lp} عامل هم‌ترازی یا یکنواختی رسوبات (در اینجا نادیده در نظر گرفته شد)، t زمان، q دبی در واحد عرض، b عرض کانال، v ویسکوزیته سینماتیکی، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، d_{50} متوسط اندازه رسوبات، σ انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی، و $\rho'_s = (\rho_s - \rho) / \rho$ چگالی نسبی رسوبات، که ρ_s چگالی رسوبات می‌باشد. وجود تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه، تأثیر جدیدی در محاسبات عمق آبشستگی می‌گذارد و از این رو پارامترهای هندسی f_d مشخصات اجسام شناور، را

اجرای آزمایش

برای هریک از آزمایش‌ها، بستر در فلوم آزمایشگاهی در اطراف پایه پل با دقت تراز شد و اجسام شناور چوبی در فواصل مختلف از بستر (هم سطح آب، زیر سطح آب و بالای سطح آب) در داخل آبراهه در جلو پایه قرار داده شد. پس از آنکه اجسام شناور چوبی در جلو پایه نصب شد، کانال در یک دبی کم ($Q \approx 0.001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) کاملاً انباشته از آب شد تا زمانی که عمق آب در آبراهه به ۲۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح بستر برسد (برای جلوگیری از آبشستگی اولیه در جلو پایه). سپس با افزایش دبی، Q ، موردنظر برای آزمایش تنظیم شد، ضمن این‌که سطح آب طوری تنظیم شده بود که عمق جریان در ۲۰ سانتی‌متری ثابت بماند (با استفاده از دریچه تنظیم عمق در انتهای فلوم). از یک نقطه‌سنج (کولیس) با دقت ۰/۱ mm برای اندازه‌گیری عمق آبشستگی استفاده شد. میزان آبشستگی در دقایق ۱، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ... و ۴۲۰ اندازه‌گیری شد و هر آزمایش به‌طورکلی به مدت ۴۲۰ دقیقه انجام شد. این زمان بر اساس تحقیقات، قربانی و کلز (۲۰۰۸) و همچنین با انجام یک آزمایش ۱۲ ساعته مشخص شد، به‌طوری‌که بیشینه آبشستگی موضعی در کنار پایه پل‌ها در ۷ ساعت اول آزمایش انجام گرفت. شکل ۵، نمودار توسعه زمانی آبشستگی پایه شاهد (دایره‌ای با صفحه شمع‌دار) را با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طوری که شکل نشان می‌دهد عمق آبشستگی در ۳ ساعت اول آزمایش افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن به‌صورت تدریجی در زمان ۴۲۰ دقیقه ثابت می‌گردد. همچنین در فلوم مورد استفاده در این تحقیق، آزمایش‌های آبشستگی جلوی پایه دایره‌ای شکل بدون تجمع اجسام شناور توسط رضاپوریان (۱۳۸۸) انجام

پل انجام می‌شود، شایان‌ذکر است برای نمونه شاهد $\Delta A\% = 0$ و $T_d = 0$ می‌باشد (چون اجسام شناور چوبی در جلو پایه قرار ندارد).



شکل ۶- منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی.

نتایج و بحث

مقایسه آبخستگی پایه دایره‌ای شمع‌دار در حالت‌های با و بدون اجسام شناور

برای پایه دایره‌ای با صفحه شمع‌دار در حالتی که اجسام شناور در جلو پایه قرار نگرفته باشد (آزمایش شاهد)، و با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، عمق آبخستگی بیشینه برابر با ۰/۲۵ سانتی‌متر مشاهده شد. درحالی‌که برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه مقدار آبخستگی مشاهده‌شده به ۰/۸۳ سانتی‌متر رسید (وجود صفحه فولادی، باعث عدم افزایش آبخستگی شد).

با قرار دادن اجسام شناور چوبی متفاوت در جلو پایه دایره‌ای با صفحه شمع‌دار در حالت‌های ذکر شده (بالای سطح، هم‌سطح و زیر سطح آب) عمق گودال آبخستگی تغییر می‌کند. به‌گونه‌ای که با برخورد جریان به اجسام شناور یک جریان روبه پایین ایجاد می‌شود که باعث به حرکت درآوردن مواد بستر در زیر اجسام شناور و کف‌کنی مواد بستر در زیر صفحه‌ی شمع‌دار می‌شود. درنتیجه وجود اجسام شناور باعث افزایش طول و عرض گودال در جلو پایه می‌شود.

شایان‌ذکر است که وقتی مواد بستر در زیر صفحه شمع‌دار خالی می‌شود، این صفحه خود همانند یک جسم شناور عمل می‌کند که با برخورد جریان به زیر صفحه جریان‌های گردابی ایجاد می‌شود و باعث کف‌کنی بیشتر در زیر صفحه می‌شود. همچنین طول و عرض اجسام شناور و حالت‌های قرارگیری آن در جلو

هم باید بدان اضافه کرد، لذا رابطه ۳ به شکل زیر درمی‌آید:

$$Z_{Debris} = f \left[f_{bg} \left(D, S_{hd}, A, b \right), f \left(q, h, v, \rho, g \right), f \left(d_{st}, \sigma, \rho', s \right), f(t), f \left(d_d, T_d, L_d, P_d, S_{hd}, n_d \right) \right] \quad [4]$$

در این رابطه n_d تخلخل یا زبری اجسام شناور چوبی است که براساس مطالعه پاگلیارا و کارناسینا (۲۰۱۰) تعریف شده است و بر این اساس تأثیر اندکی بر سیر تکاملی آبخستگی دارد. S_{hd} بیان‌گر شکل اجسام شناور چوبی، d_d عرض اجسام شناور چوبی، و f یک نماد عملکردی است. همچنین تأثیر لزوجت جریان و تأثیر رسوبات نیز نادیده گرفته شده است زیرا عدد رینولدز بزرگ ($Re = 4uh/v > 2 \times 10^5$) می‌باشد و مواد بستر در این آزمایش تقریباً یکنواخت بودند. غیریکنواختی رسوبات باعث کاهش آبخستگی موضعی می‌شود، لذا در صورتی‌که انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از ۱/۳ باشد $(1.3 < \sigma = \sqrt{D_{84} \div D_{16}})$ شرط یکنواختی ذرات برقرار، و اثر غیریکنواختی رسوبات بر آبخستگی موضعی از بین می‌رود (شفاعی بجزستان ۱۳۷۳). شکل ۶، نمودار دانه‌بندی مواد بستر مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین لایه جوشنی (رسوبات درشت‌دانه به‌عنوان محافظ بر روی رسوبات ریز قرار می‌گیرند) در آزمایش‌ها ظاهر نشد. با استفاده از قضیه Π و با توجه به آبخستگی در اثر تجمع اجسام شناور چوبی و عمق جریان، رابطه ۴ به صورت زیر درخواهد آمد:

$$K_d = \frac{Z_{Debris}}{h} = \Pi \left[\frac{D}{d_{50}}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{U}{U_c}, \Delta A\%, \frac{d_d}{b}, \frac{L_d}{D}, \frac{P_d}{L_d} \right] \quad [5]$$

در این رابطه $\Delta A\% = [(d_d - D) \cdot T_d / (b \cdot h)] \cdot 100$ ضریب انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور مستطیلی، u/u_c نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی، و Π یک نماد عملکردی است. اجسام مستطیلی شکل چوبی، نفوذپذیر و زیر در جلو پایه مورد آزمایش قرار گرفته است. لازم به ذکر است که آزمایش شاهد (بدون تجمع اجسام شناور)، در همان شرایط آزمایشی، یعنی شدت جریان، زبری سطح، عمق آب و آبخستگی اطراف پایه

پایه (بالای سطح، هم‌سطح و زیر سطح آب) تأثیر زیادی بر افزایش عمق گودال آبشستگی دارد به طوری که هرچه عرض و طول اجسام شناور قرار گرفته در جلو پایه پل بیشتر باشد عمق کف‌کنی در زیر اجسام شناور بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر عمق گودال آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. برای اجسام شناور چوبی در حالت زیر سطح آب بیشترین عمق آبشستگی مشاهده شد. برای تمام بازه‌های آزمایش شده رفتار مشابهی مشاهده شد. شکل ۷ قرارگیری اجسام شناور چوبی با عرض، طول و ارتفاع به ترتیب (۳۰-۲۰-۱۰) سانتی‌متر و گودال آبشستگی ایجاد شده با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه در حالت

زیر سطح آب در زمان ۴۲۰ دقیقه (بعد از اتمام آزمایش) را نشان می‌دهد. شکل ۸ نیز اجسام شناور چوبی با عرض، طول و ارتفاع به ترتیب (۲۵-۱۰-۱۰) سانتی‌متر و گودال آبشستگی ایجاد شده با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه در حالت



شکل ۷- نمایی از آبشستگی (در حالت زیر سطح آب) و تپه‌های ماسه‌ای در زمان ۴۲۰ دقیقه.

$$\left(\frac{d_d}{b} = 0.5, \frac{l_d}{D} = 3.334, \frac{P_d}{l_d} = 0.75, \frac{h}{D} = 3.33, \frac{U}{U_c} = 0.86, \Delta A\%, 30 \right)$$

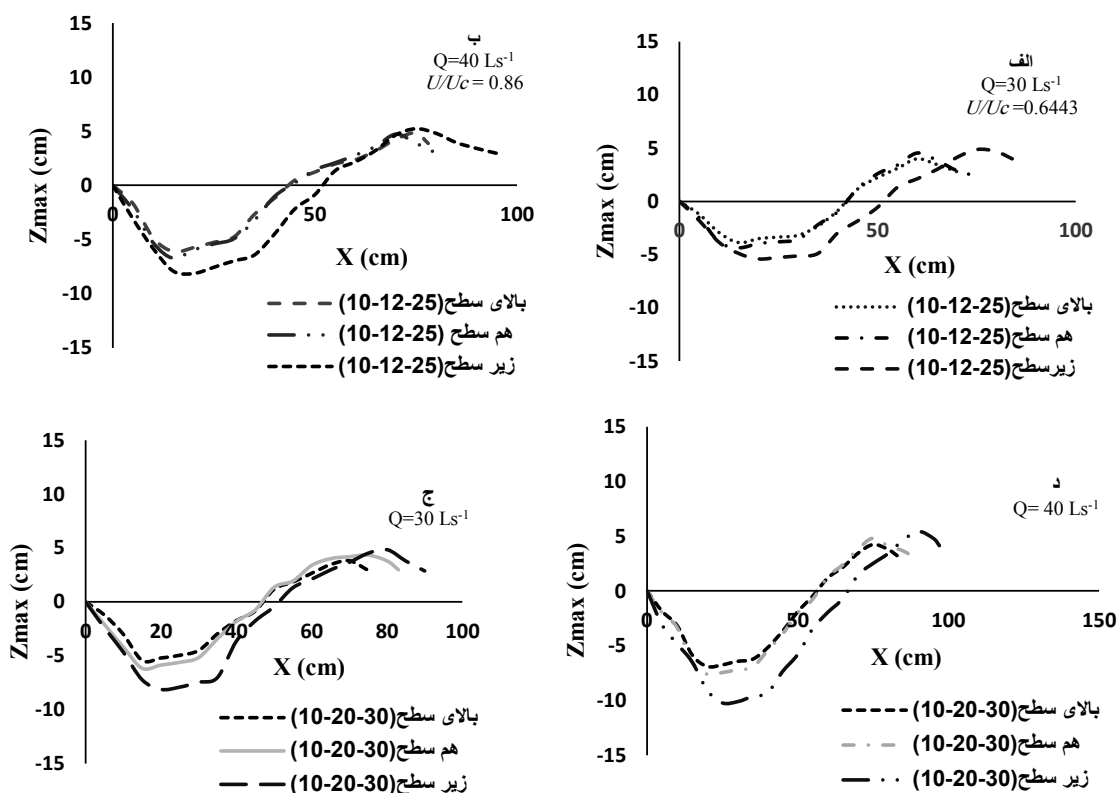


شکل ۸- نمایی از آبشستگی (در حالت بالای سطح آب) و تپه‌های ماسه‌ای در زمان ۴۲۰ دقیقه.

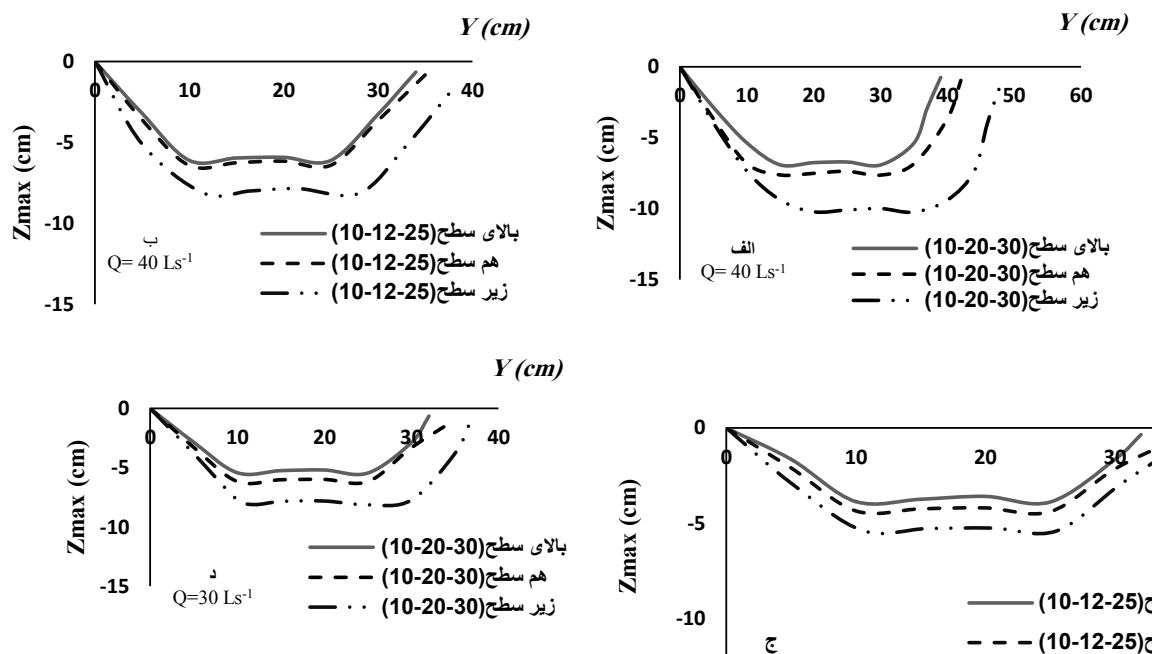
$$\left(\frac{d_d}{b} = 0.41667, \frac{l_d}{D} = 2, \frac{P_d}{l_d} = 1.04167, \frac{h}{D} = 3.33, \frac{U}{U_c} = 0.86, \Delta A\%, 7.91667 \right)$$

پروفیل طولی و عرضی آن آورده نشده است. پروفیل گودال آبشستگی در حضور اجسام شناور چوبی با عرض، طول و ارتفاع (۳۰-۲۰-۱۰) سانتی‌متر و (۲۵-۱۰-۱۰) سانتی‌متر در سه حالت ذکر شده در جلو پایه در اینجا نمایش داده شده است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ (الف، ب، ج و د) به مقایسه پروفیل طولی و عرضی، تأثیر تجمع اجسام شناور چوبی بر روی عمق آبشستگی در دبی‌های ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه می‌پردازند. از آنجایی که مقدار آبشستگی نمونه شاهد به دلیل وجود صفحه فولادی ناچیز است



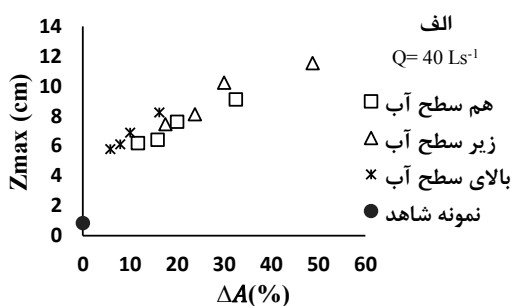
شکل ۹- پروفیل طولی عمق گودال آبشستگی برای دبی‌های مختلف و ابعاد مختلف اجسام شناور.



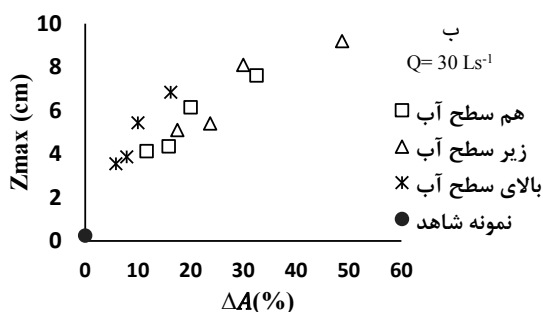
شکل ۱۰- پروفیل عرضی عمق گودال آبشستگی برای دبی‌های مختلف و ابعاد مختلف اجسام شناور.

عمق آبشستگی بیشتر می‌شود). علاوه بر این هر چه حجم قسمتی از اجسام شناور که در داخل آب قرار گرفته است بیشتر باشد حجم گودال آبشستگی نیز بزرگتر خواهد بود (هرچه درصد انسداد در جلو پایه بیشتر باشد کف‌کنی و عمق آبشستگی در جلو پایه بیشتر می‌شود).

شکل ۱۱ بیشینه عمق آبشستگی را در مقابل درصد انسداد اجسام شناور قرار گرفته شده در جلو پایه در سه حالت ذکر شده در دبی‌های ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد هر چه درصد انسداد اجسام شناور بیشتر باشد عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. بیشترین عمق آبشستگی مربوط به حالتی است که اجسام شناور چوبی در زیر سطح آب در جلو پایه با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و ضریب انسداد، $\Delta A = 48.75(\%)$ می‌باشد، که در این حالت $d_d / b = 0.75$ می‌باشد.



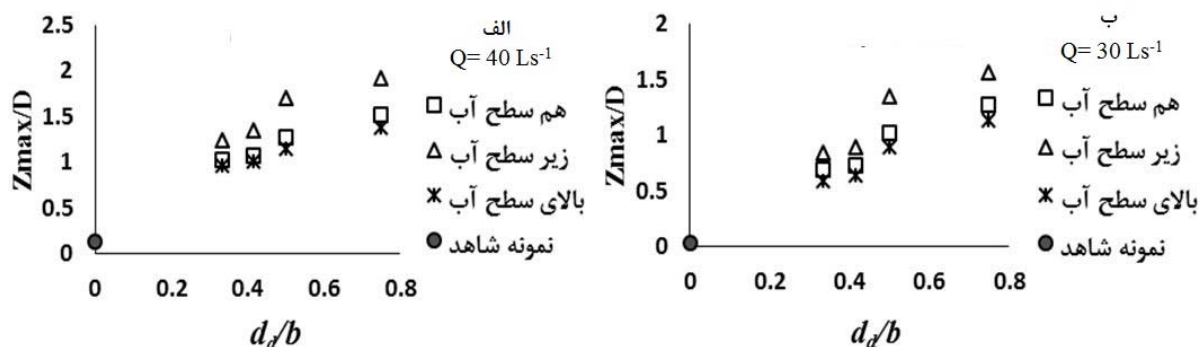
در شکل‌های فوق؛ Z_{max} نشان‌دهنده تراز گودال آبشستگی نسبت به کف آبراهه می‌باشد. X فاصله طولی گودال آبشستگی ایجاد شده در جلو و پشت پایه و Y فاصله عرضی از مرکز پایه پل در جلو شمع‌ها که بیشینه عمق آبشستگی در آنجا رخ می‌دهد می‌باشد. همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهند، اجسام شناور چوبی باعث افزایش طول، عرض و عمق گودال آبشستگی شده‌اند. از طرفی دیگر، محل قرارگیری اجسام شناور چوبی (بالای سطح، هم‌سطح و زیر سطح آب) در جلو پایه پل تأثیر به‌سزایی بر روی عمق، عرض و طول گودال آبشستگی دارد. به‌طوری‌که هر چه اجسام شناور به کف بستر نزدیک‌تر باشند، عمق، عرض و طول گودال بیشتر افزایش پیدا می‌کند. اگر اجسام شناور چوبی در زیر سطح آب قرار گیرند بیشینه عمق آبشستگی رخ می‌دهد و باعث افزایش طول و عرض گودال می‌شود (حدوداً ۱۲ برابر نمونه شاهد



شکل ۱۱- بیشینه عمق آبشستگی در برابر درصد انسداد اجسام شناور قرار داده شده در جلو پایه برای الف) $Q=40 \text{ lit s}^{-1}$ و ب) $Q=30 \text{ lit s}^{-1}$

میزان نسبت عرض اجسام شناور به عرض کانال افزایش یابد عمق آبشستگی در جلو پایه بیشتر می‌شود، برای حالتی که اجسام شناور در زیر سطح آب قرار گرفته باشند با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.

شکل ۱۲ بیشینه عمق آبشستگی را به‌ازای نسبت عرض اجسام شناور چوبی به عرض کانال در سه حالت بالای سطح، هم‌سطح و زیر سطح آب در دبی‌های ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که علاوه بر نحوه قرارگیری اجسام در جلو پایه، هرچه



شکل ۱۲- بیشینه عمق آبشستگی در مقابل نسبت عرض اجسام شناور چوبی به عرض کانال برای الف) $Q=40 L s^{-1}$ و ب) $Q=30 L s^{-1}$.

$$\frac{Z_{debris}}{h} = 1.8745 \left(\frac{U}{U_c}\right)^{1.09631} (\Delta A)^{0.28758} \quad [A]$$

$$\left(\frac{d_d}{b}\right)^{0.07122} \left(\frac{L_d}{D}\right)^{0.29885}$$

میانگین مجموع خطای پیش‌بینی شده مدل از فرمول زیر حساب می‌شود:

$$MFE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad [9]$$

در رابطه فوق؛ MFE میانگین مجموع خطا پیش‌بینی شده، y_i بیشینه عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده و \hat{y}_i بیشینه عمق آبشستگی برآورد شده توسط مدل و n نیز تعداد مشاهدات می‌باشد. مقدار ایده‌آل برای MFE صفر می‌باشد که نشان‌دهنده مدلی بدون خطا است و هرچه به صفر نزدیک‌تر شود نشان‌دهنده دقت مدل است. برای مدل فوق مقدار $MFE=0.016$ به دست آمد، که این مقدار به صفر بسیار نزدیک است و نشان‌دهنده دقت بالای مدل می‌باشد.

شکل ۱۳ عمق آبشستگی محاسبه شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد، همان‌طور که شکل نشان می‌دهد داده‌ها در اطراف خطی با شیب ۴۵ درجه پراکنده شده‌اند. هرچقدر داده‌ها به خط ۴۵ درجه نزدیک‌تر باشند، بیانگر این است که رابطه پیش‌بینی عمق آبشستگی به‌درستی برای تخمین عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور به‌کاررفته است و هرچقدر داده‌ها نسبت

رابطه عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور برای یافتن رابطه مناسب برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در جلوی پایه دایره‌ای با صفحه شمع‌دار از نتایج تحلیل ابعادی استفاده می‌گردد. بدین ترتیب رابطه عمق آبشستگی به صورت نمایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{Z_{debris}}{h} = \left[\alpha \left(\frac{U}{U_c}\right)^{a_1} (\Delta A\%)^{a_2} \left(\frac{d}{b}\right)^{a_3} \left(\frac{L}{D}\right)^{a_4} \right] \quad [6]$$

با \ln گرفتن از طرفین رابطه ۶ داریم:

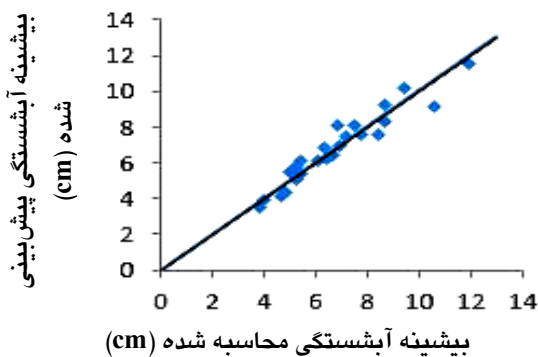
$$\ln\left(\frac{Z_{Debris}}{h}\right) = \left[\ln \alpha + a_1 \ln\left(\frac{U}{U_c}\right) + a_2 \ln(\Delta A\%) + a_3 \ln\left(\frac{d}{b}\right) + a_4 \ln\left(\frac{L}{D}\right) \right] \quad [7]$$

سپس با استفاده از نرم‌افزار SPSS و رگرسیون خطی مقادیر a_1 تا a_4 و $\ln \alpha$ به دست آورده شد. مقدار R^2 برابر با ۰/۹۳ می‌باشد که در سطح معنی‌داری ۹۹٪، معنی‌دار بوده و نشان می‌دهد ۹۳ درصد از تغییرات آبشستگی توسط پارامترهای موردبررسی، توجیه می‌شود. همچنین مقدار F (آزمون کارآیی مدل) برای مدل فوق ۶۱/۹ محاسبه شده که در سطح معنی‌داری ۹۹٪، معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده کارآیی قابل‌قبول مدل است. معادله بیشینه عمق آبشستگی در اثر تجمع اجسام شناور در جلو پایه دایره‌ای با صفحه شمع‌دار به صورت رابطه ۸ ارائه می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق اثر اجسام شناور بر روی آبشستگی یک پایه دایره‌ای شکل واقع بر چهار شمع بررسی شد. تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه باعث افزایش عمق آبشستگی نسبت به نمونه شاهد شد (حدوداً ۱۲ تا ۱۴ برابر). برخورد جریان با اجسام شناور چوبی انباشته‌شده در جلو پایه، علاوه بر افزایش عمق آبشستگی باعث کف‌کنی در زیر اجسام و به وجود آوردن چاله در جلو پایه می‌شود. علاوه بر این، اگر اجسام شناور در زیر سطح آب در جلو پایه قرار گیرند بیشترین آبشستگی و کف‌کنی در زیر این اجسام رخ می‌دهد. با خالی شدن مواد بستر در زیر صفحه فولادی در اثر برخورد جریان به اجسام شناور و تشدید سرعت جریان، خود صفحه نیز همانند یک جسم شناور در مقابل شمع‌ها عمل می‌کند و باعث کف‌کنی بیشتر و ایجاد گرداب می‌شود. نتایج نشان داد در حالت استفاده از صفحه شمع‌دار در زیر پایه دایره‌ای، میزان آبشستگی نسبت به حالت بدون صفحه شمع‌دار، ۸۰ درصد کمتر می‌شود (بدون تجمع اجسام شناور). همچنین رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور در جلوی پایه دایره‌ای شکل واقع بر شمع ارائه گردید.

به خط ۴۵ درجه پراکنده‌تر و دورتر باشد عدم تخمین صحیح مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- مقایسه پیشینه عمق آبشستگی محاسبه‌شده و پیش‌بینی‌شده حاصل از آزمایش.

مقایسه آبشستگی پایه دایره‌ای شمع‌دار با پایه دایره‌ای بدون صفحه شمع‌دار همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد در کانال با مشخصات ذکرشده، رضاپوریان (۱۳۸۸) آزمایش‌هایی بر روی پیشینه عمق آبشستگی در جلو پایه دایره‌ای بدون صفحه شمع‌دار با قطر ۹ سانتی‌متر با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام داد. همچنین پاگلیارا و کارناسینا (۲۰۱۰)، نیز آزمایش‌هایی بر روی پایه دایره‌ای بدون صفحه شمع‌دار با قطرهای متفاوت ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر با دبی‌های متفاوت انجام دادند. نتایج نشان داد که عمق آبشستگی در پایه بدون صفحه حدوداً ۷۰ تا ۸۰ درصد نسبت به پایه دایره‌ای با پی یا صفحه شمع‌دار که در این مقاله مورد آزمایش قرار گرفته بیشتر شده است.

منابع مورد استفاده

- رضا پوریان س، ۱۳۸۸. بررسی تأثیر موقعیت سری پره‌های مستغرق بر روی آبشستگی کنار پایه استوانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.
- شفاعی بستان م، ۱۳۷۳. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- Bradley JB, Richards DL and Bahner CD, 2005. Debris Control Structures – Evaluation and Countermeasures. Report No. FHWA-IF-04-016, Hydraulic Engineering No. 9 (3th edition), Federal Highway Administration, Washington DC.
- Braudrick CA and Grant GE, 2001. Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology*. 41: 263–283.
- Breusers HN and Raudkivi AJ, 1991. Scouring Hydraulic Structures Design Manual. No. 2, IAHR, Balkema, 143P.
- Chow VT, 1959. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company, NY.
- Dargahi B, 1990. Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(10): 1197-1214.
- Diehl TH, 1997. Potential Drift Accumulation at Bridges. Report No. FHWA-RD-97-028, Hydraulic Engineering No. 9, Federal Highway administration, Washington DC.

- Elliot RC, Froehlich DC and MacArthur RC, 2012. Calculating the potential effects of large woody debris accumulations on backwater, scour, and hydrodynamic loads. Pp. 1213-1222. World Environmental and Water Resources Congress 2012. Crossing Boundaries ASCE.
- Ghorbani B and Kells JA, 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research* 46(5): 610-619.
- Hagerty DJ, Parola AC and Fenske TE, 1995. Impacts of 1993 Upper Mississippi River Basin Floods on Highway. Systems. Report No. 1483, Transportation Research, Record, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Kattell J and Eriksson M, 1998. Bridge Scour Evaluation: Screening, Analysis and Countermeasures. General Technical Report 9877 1207-SDTDC, U.S. Department of Agriculture, Forest San Dimas, CA.
- Lagasse PF, Clopper PE, Zevenbergen PE, Spitz WJ and Girard LG, 2010. Effects of Debris on Bridge Pier Scour. Transportation Research Board, Washington DC USA. 117P.
- Laursen EM and Toch A, 1956. Scour Around Bridge Piers and Abutments. Bulletin No. 4, Iowa Highways ResearchBoard, Ames, Iowa.
- Melville BW and Dongol DM, 1992. Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 118(9): 1306-1310.
- Mellvil BW and Chiew YM, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(1): 59-65.
- Pagliara S and Carnacina I, 2010. Scour and dune morphology in presence of large wood debris accumulation at bridge pier. *River Flow* 48(1): 1223-1230.
- Pagliara S and Carnacina I, 2011. Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers. *International Journal of Sediment Research* 26(2): 121-136.
- Richardson EV and Davis SR, 2001. Evaluating Scour at Bridges. Fourth Edition, Federal Highway Administration, Washington, DC. 378P.
- Zevenbergen LW, Lagasse PF, Clopper PE and Spitz WJ, 2006. Effect of debris on bridge pier scour. International Conference on Scour Erosion, Amsterdam, The Netherlands.