

«یادداشت تحقیقاتی»

اثر تنگ‌شدگی بر آب‌شستگی تکیه‌گاه پل و کاربرد صفحات مستغرق برای جلوگیری و کنترل آن

بهزاد قربانی^{1*}، مرجان پارس مهر²

1- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
2- دانشجوی سابق ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* behzad.ghorbani55@gmail.com

چکیده - وجود پایه و تکیه‌گاه یک پل در بستر یک آبراهه موجب کاهش سطح مقطع و انقباض جریان می‌شود. در چنین شرایطی علاوه بر آب‌شستگی موضعی کنار پایه و تکیه‌گاه سازه، زمینه لازم برای وقوع پدیده آب‌شستگی انقباضی نیز فراهم می‌شود. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر تنگ‌شدگی بر آب‌شستگی تکیه‌گاه پل و تأثیر کاربرد صفحات مستغرق برای جلوگیری و کنترل آن انجام شد. برای این منظور، چهار تنگ‌شدگی با نسبت‌های 0/333، 0/500، 0/667 و 0/833 در یک فلوم آزمایشگاهی با بستر رسوبات غیرچسبنده به قطر متوسط 0/78 میلی‌متر ایجاد شد. آنگاه از سه جفت صفحه مستغرق با سه زاویه حمله 10، 20 و 30 درجه در بستر فلوم برای محافظت تکیه‌گاه‌ها استفاده شد و آزمایش‌ها با سه دبی نسبی 0/5، 0/75 و 1 دنبال شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که با کاهش عرض جریان عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد و کاربرد صفحات مستغرق موجب کاهش آب‌شستگی کنار تکیه‌گاه به میزان حداکثر 75 درصد می‌شود.

کلیدواژگان: آب‌شستگی، تکیه‌گاه، تنگ‌شدگی، زاویه حمله، صفحات مستغرق.

1- مقدمه

موجود فراهم می‌شود. از جمله سازه‌هایی که می‌توانند این تنگ‌شدگی را در مقطع رودخانه ایجاد کنند، پایه‌های پل، تکیه‌گاه‌ها یا خاکریزهای تقرب پل (جهت کاهش دهانه پل)، سازه‌های حفاظتی نظیر آبشکن‌ها در مجاری روباز برای حفاظت دیواره‌ها در مقابل فرسایش و خاکریزهای سیل‌بند می‌باشند.

(Molinas and Kheireldin 1998) آزمایش‌هایی روی تکیه‌گاه‌های عمودی برای اعداد فرود جریان در محدوده 0/3 تا 0/9 و برای نسبت‌های انقباض 0/1، 0/2 و 0/3 (نسبت عرض تکیه‌گاه عمود بر جریان به عرض کلی کانال) انجام دادند. طبق گزارش آن‌ها، تنش برشی و

وقتی سازه‌ای در بستر رودخانه یا در طرفین یک آبراهه قرار می‌گیرد، مقطع جریان کاهش یافته و یک تنگ‌شدگی در مسیر جریان ایجاد می‌شود، که موجب تغییر شرایط هیدرولیکی آبراهه، به ویژه در مواقع سیلابی می‌شود. محدود کردن مسیر سیلابی منجر به افزایش سرعت و تنش برشی جریان و در نتیجه بالا رفتن انرژی فرسایشی و ظرفیت حمل مواد جامد بستر و افزایش ضریب انتقال رسوب در سیال می‌شود. در چنین شرایطی زمینه لازم برای وقوع پدیده آب‌شستگی انقباضی در مسیر جریان و آب‌شستگی موضعی در کنار موانع و سازه‌های هیدرولیکی

تنگ‌شدگی مقطع آبراهه می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول 20 متر، عرض و ارتفاع 60 سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام گرفت. دبی آب ورودی به فلوم با یک دبی سنج حجمی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عمق آب از یک عمق سنج استفاده شد. برای اندازه‌گیری تغییرات سرعت در بالادست تکیه‌گاه قبل از تنگ‌شدگی و همچنین در محل تکیه‌گاه از لوله پیتوت استفاده شد. زاویه مقطع انتقالی هم‌گرا در بالا دست و اگر در پایین دست منطقه تنگ‌شدگی 55 درجه در نظر گرفته شد (USBR, 1977). طبق معیار ارایه شده توسط Raudkivi and Ettma (1983) برای جلوگیری از تشکیل تلماسه توسط رسوبات غیرچسبیده که باعث کاهش بیشینه عمق آب‌شستگی می‌گردد، قطر متوسط ذرات 0/78 میلی‌متر انتخاب گردید. ضخامت مواد بستر فلوم با توجه به تحقیقات (Ghorbani and Kells (2008)، 160 میلی‌متر در نظر گرفته شد. سایر خصوصیات مواد بستر در جدول 1 قابل ملاحظه است. علاوه بر این، با توجه به اینکه غیریکنواختی رسوبات باعث کاهش آب‌شستگی موضعی می‌شود، لذا برای حذف این عامل در صورتی که انحراف معیار هندسی ذرات $(\sigma_g = (D_{84.1}/D_{15.9})^{0.5})$ کمتر از 1/5 باشد، شرط یکنواختی ذرات برقرار می‌شود. در رابطه فوق، $D_{84.1}$ و $D_{15.9}$ قطر رسوبات بستر هستند که به ترتیب 84/1 و 15/9 درصد ذرات از آن‌ها کوچک‌تر هستند (شفاعی بجستان، 1373).

تعداد شش عدد صفحه به طول 90، ضخامت 10 و ارتفاع 160 میلی‌متر برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت (شکل 1). زمان انجام آزمایش‌ها طبق نظر (Lauchlan (1999) و (Ghorbani and Kells (2008)، 7 ساعت در نظر گرفته شد. در این تحقیق تعداد 48 آزمایش انجام شد که از این تعداد 12 آزمایش بدون حضور صفحات مستغرق به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. تمام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام گرفت.

سرعت در تکیه‌گاه تا 10 برابر تنش برشی بستر و سرعت در بالادست افزایش می‌یابد. در اینجا تنش برشی تابعی از نسبت بازشدگی، عدد فرود جریان و طول برآمدگی است. (Chang and Davis (1998) مطالعاتی بر روی آب‌شستگی انقباضی ناشی از وجود پل در رودخانه تحت شرایط آب-شستگی بستر زنده انجام دادند که طبق گزارش آنها بیشترین آب‌شستگی زمانی اتفاق افتاد که سرعت بحرانی جریان برای ذرات بستر برابر با بیشتر از سرعت متوسط جریان بوده است. (Liu et al. (1961)، (Laursen (1963) و (Komura (1966) چندین رابطه تجربی برای آب‌شستگی ناشی از تنگ‌شدگی آبراهه ارایه دادند.

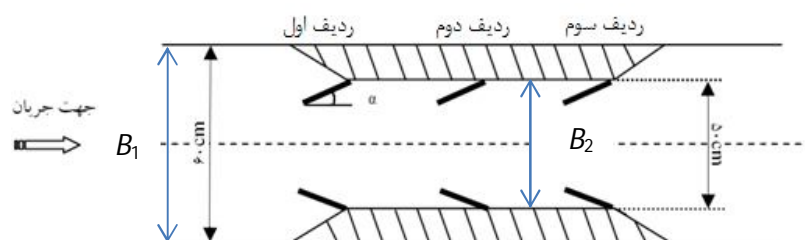
(Lauchlan (1999) آزمایش‌هایی روی دو صفحه مستغرق کنار پایه‌های پل در شرایط آب‌شستگی آب زلال و بستر زنده انجام داد. طبق تحقیقات وی عمق آب‌شستگی بین 10/1 تا 28/2 درصد برای انواع صفحه و شرایط مختلف کاهش نشان داد. (Johnson et al. (2001) نشان دادند که عملکرد صفحات مستغرق در تغییر مکان آب‌شستگی موضعی از تکیه‌گاه پل به مرکز کانال فوق‌العاده مؤثر می‌باشند. (Ghorbani and Kells (2008) در تحقیقات خود تأثیر صفحات مستغرق را در کاهش آب‌شستگی موضعی در کنار پایه استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که برای صفحات دوگانه نیز یک کاهش 87/7 درصدی در عمق آب‌شستگی با زاویه حمله 18/5 درجه و تراز صفر صفحه‌ها از بستر صورت گرفت. رضاپوریان و همکاران (1388)، آزمایش‌هایی را به منظور بررسی عملکرد صفحات مستغرق در کاهش آب‌شستگی موضعی پایه پل انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که هر چه صفحات به پایه نزدیک‌تر باشند، عملکرد آن‌ها نیز بیشتر است، به طوری که اگر صفحات به صورت چسبیده به پایه پل تحت زاویه 30 درجه قرار گیرند، میزان آب-شستگی 73/9 درصد کاهش می‌یابد.

تاکنون مطالعات و تحقیقات قابل توجهی برای بررسی تأثیر صفحات مستغرق بر کاهش عمق آب‌شستگی کنار تکیه‌گاه پل ناشی از تنگ‌شدگی انجام نشده است. لذا هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر سری صفحات مستغرق در زوایای مختلف بر کاهش آب‌شستگی در محل تکیه‌گاه و

جدول 1 خصوصیات رسوبات بستر در فلوم آزمایشگاهی

انحراف معیار هندسی، σ_g	**ضریب یکنواختی C_u	زاویه ایستایی φ (deg)	تخلخل η (%)	چگالی ذرات G_s (gr/cm ³)	قطر متوسط D_{50} (mm)
0/8	1/5	30/5	51/85	2/7	0/78

* انحراف معیار هندسی $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ ** ضریب یکنواختی $C_u = (d_{60}/d_{10})^{1/2}$



شکل 1 پلان موقعیت قرارگیری سری صفحات مستغرق

جدول 2 مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌ها برای عرض تنگ‌شدگی 20، 30، 40 و 50 سانتی‌متری و زوایای حمله 10، 20 و 30 درجه

دبی (lit/s)	عمق جریان (cm)	زاویه حمله (درجه)	عرض مقطع (cm)		سطح مقطع (m ²)	
			بالادست	محل تنگ‌شدگی	محل تنگ‌شدگی	بالادست
20	30	شاهد	60	---	---	0/18
30	30	شاهد	60	---	---	0/18
40	30	شاهد	60	---	---	0/18
20	30	10، 20 و 30	60	20	0/06	0/18
30	30	10، 20 و 30	60	20	0/06	0/18
40	30	10، 20 و 30	60	20	0/06	0/18
20	30	10، 20 و 30	60	30	0/09	0/18
30	30	10، 20 و 30	60	30	0/09	0/18
40	30	10، 20 و 30	60	30	0/09	0/18
20	30	10، 20 و 30	60	40	0/12	0/18
30	30	10، 20 و 30	60	40	0/12	0/18
40	30	10، 20 و 30	60	40	0/12	0/18
20	30	10، 20 و 30	60	50	0/15	0/18
30	30	10، 20 و 30	60	50	0/15	0/18
40	30	10، 20 و 30	60	50	0/15	0/18

بر ثانیه برای چهار تنگ‌شدگی به عرض‌های 20، 30، 40 و 50 سانتی‌متر تکرار (با نسبت‌های 0/333، 0/500، 0/667 و 0/833) شدند (جدول 2). شکل 1 پلان موقعیت قرارگیری سری صفحات مستغرق را نشان می‌دهد. حداقل عرض تنگ‌شدگی به گونه ای انتخاب شد که انسدادی

چینش صفحات به صورت چسبیده به دیواره و از ابتدای تنگ‌شدگی با فواصل 50 سانتی‌متر از هم و هم‌تراز با سطح بستر در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها برای سه زاویه حمله 10، 20 و 30 درجه صفحات نسبت به جهت جریان انجام شدند. این آزمایش‌ها با سه دبی 20، 30 و 40 لیتر

مرحله بعد با حذف عوامل بی اهمیت نظیر گرانروی دینامیکی μ و پارامترهای ثابت نظیر $L, y_1, d_{50}/y_1$ و ρ/ρ_0 و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر مهم بر آب‌شستگی انقباضی نظیر میزان تنگ‌شدگی، عدد فرود و تنش برشی بر عمق آب‌شستگی و در نظر گرفتن تعداد متغیرهای تکراری می‌توان رابطه (2) را به صورت رابطه (3) بیان نمود.

$$\frac{d_s}{y_1} = C \left(\frac{B_2}{B_1}\right)^a \left(\frac{Fr_2}{Fr_1}\right)^b \left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^c \quad (3)$$

که در آن a, b, c و C ضرایب معادله هستند.

4- نتایج و بحث

در این تحقیق، تعداد 48 آزمایش انجام شد. آزمایش‌ها در چهار گروه با عرض‌های تنگ‌شدگی 20، 30، 40 و 50 سانتی‌متری (با نسبت‌های 0/333، 0/500، 0/667 و 0/833) تقسیم شدند. علاوه بر آن، آزمایش‌ها در دو سری، یکی بدون حضور صفحات مستغرق، به عنوان شاهد به منظور تعیین حداکثر عمق آب‌شستگی و بررسی تغییرات زمانی آب‌شستگی در ابتدای محل تنگ‌شدگی و دیگری با حضور صفحات مستغرق در موقعیت‌ها و زوایای حمله متفاوت به منظور بررسی تأثیر صفحات مستغرق در روند کاهش یا افزایش آب‌شستگی انجام شدند. انجام آزمایش‌های شاهد به منظور بررسی روند عمق آب‌شستگی بدون حضور صفحات مستغرق امری اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا 11 آزمایش شاهد در دوره‌های زمانی ثابت هفت ساعته با سه دبی متفاوت 20، 30 و 40 لیتر بر ثانیه برای تنگ‌شدگی مورد نظر صورت گرفت. عمق آب‌شستگی در محل تکیه‌گاه نسبت به زمان مطابق با آزمایش‌های قبل اندازه‌گیری و در پایان نیز حداکثر عمق آب‌شستگی ثبت گردید. به عنوان نمونه، نکته قابل توجه این‌که حداکثر عمق آب‌شستگی در آزمایش شاهد در مجاورت تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد، ولی با حضور صفحات مستغرق حداکثر آب‌شستگی با کاهش قابل توجهی به نوک صفحات منتقل می‌شود.

شکل 2 تغییرات عمق آب‌شستگی برای دبی 30 لیتر در ثانیه و زوایای حمله متفاوت برای نسبت عرض تنگ‌شدگی 0/333 و مقایسه آن با شاهد را نشان می‌دهد.

برای جریان ایجاد نشود. زیرا حداقل تنگ‌شدگی برای جلوگیری از انسداد جریان 7 سانتی است که از معادله انرژی ویژه به دست آمد.

در تمام آزمایش‌ها عمق‌های آب‌شستگی نسبت به زمان در بازه‌های مشخص ثبت و نمودار تغییرات آن‌ها نسبت به زمان رسم و در انتها حداکثر عمق‌های آب‌شستگی برای مقایسه کارایی زاویه‌های حمله متفاوت ثبت شدند. برای تحقق شرط آب زلال، حرکت ذرات به صورت چشمی تحت نظر قرار گرفت. علاوه بر آن، با استفاده از منحنی شیلدز تنش برش بحرانی برابر $0/82 \text{ N/m}^2$ به دست آمد. تنش برشی برای کلیه آزمایش‌ها کم‌تر از این مقدار به دست آمد ($\tau_0 < \tau_c = 0.82 \text{ N/m}^2$). برای محاسبه ضریب زبری بستر از رابطه استریکلر استفاده شد که در مجموع مقدار آن 0/025 بر آورد شد.

3- آنالیز ابعادی

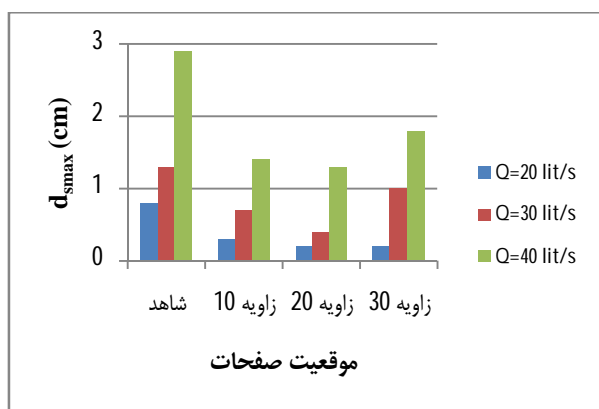
یکی از سازه‌هایی که باعث ایجاد تنگ‌شدگی در مقطع آبراهه می‌شوند، تکیه‌گاه‌ها هستند. آب‌شستگی در این نوع سازه‌ها مشابه پایه پل‌ها تابع اندازه و شکل تکیه‌گاه، زاویه قرارگیری تکیه‌گاه با جهت جریان، عمق و سرعت جریان و خصوصیات مصالح بستر است (Dey and Barbhuiya, 2004). بر این اساس آب‌شستگی کنار تکیه‌گاه را می‌توان به صورت تابعی از این عوامل طبق رابطه (1) نوشت.

$$d_s = f(y_1, y_2, d_{50}, \rho, \rho_0, \mu, Q, g, B_1, B_2, L, \tau_1, \tau_2, \varepsilon_a, \varepsilon_n) \quad (1)$$

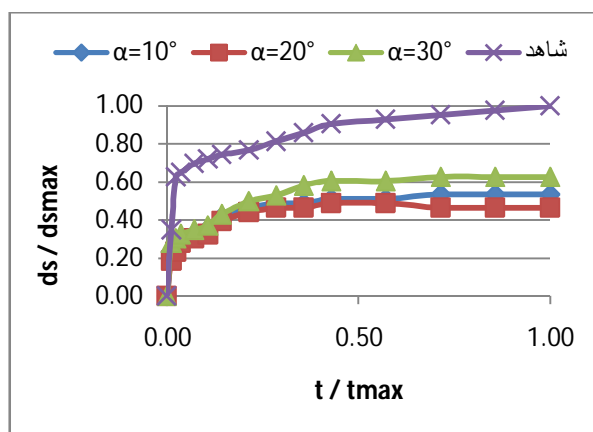
با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه (1) به صورت رابطه بی بعد (2) تبدیل می‌شود:

$$\frac{d_s}{y_1} = f\left(\frac{d_{50}}{y_1}, \frac{\rho}{\rho_0}, \frac{B_2}{B_1}, \frac{L}{y_1}, Fr_1, Fr_2, \frac{\tau_2}{\tau_1}, \varepsilon_a, \varepsilon_n\right) \quad (2)$$

که در آن d_s عمق آب‌شستگی، y_1 و y_2 عمق جریان در بالادست و محل تنگ‌شدگی، d_{50} قطر متوسط ذرات بستر، ρ چگالی آب ρ_0 چگالی ذرات بستر، g شتاب ثقل، μ لزجت دینامیکی آب، Q دبی جریان، B_2 عرض تنگ‌شدگی، B_1 عرض کانال اصلی، L طول تنگ‌شدگی، Fr عدد فرود، τ_1 و τ_2 تنش برشی به ترتیب در بالادست و در محل تنگ‌شدگی، ε_a ضریب تأثیر زاویه تنگ‌شدگی و ε_n ضریب تأثیر زبری دیوارهای تنگ‌شدگی می‌باشد. در



شکل 3 نمودار حداکثر عمق آبشستگی در سه زاویه حمله و سه دبی در نسبت تنگ‌شدگی 0/833



شکل 2 تغییرات زمانی آبشستگی در دبی 30 لیتر بر ثانیه در نسبت تنگ‌شدگی 0/333

مستغرق برای یک بازشدگی ثابت، با افزایش دبی عمق آبشستگی افزایش می‌یابد و این روند برای تمام بازشدگی‌ها صادق است. اما کاهش درصد عمق آبشستگی که همان نرخ تغییرات کاهش عمق آبشستگی یا شیب منحنی تغییرات عمق آبشستگی نسبت به دبی است، ابتدا تند شده و سپس کاهش می‌یابد، لذا ممکن است روند مشخصی را دنبال نکند. از طرفی در این جدول ملاحظه می‌شود، از میان زوایای حمله متفاوت، زاویه حمله قرارگیری 20 درجه بهترین عملکرد را در هر چهار عرض تنگ‌شدگی و برای هر سه دبی آزمایش شده در کاهش میزان آبشستگی نشان می‌دهد.

با استفاده از رابطه (3)، داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزار SPSS رابطه (4) با ضریب همبستگی بالا بین عوامل اصلی مؤثر آب شستگی نظیر تنگ‌شدگی، عدد فرود و تنش برشی برای دبی‌های مختلف به دست آمد.

$$\frac{d_s}{y} = 10.3 \times 10^{-5} \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^{2.1} \left(\frac{Fr_2}{Fr_1} \right)^{4.603} \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1.0} \quad (4)$$

شکل 4 نشان می‌دهد با افزایش عرض تنگ‌شدگی و یا کاهش پیش‌آمدگی تکیه‌گاه، نسبت عمق آب شستگی کاهش می‌یابد. در این شکل ضریب همبستگی $(R^2 = 0.984)$ مربوط به عمق آب شستگی نسبتی (d_s/y_1) در برابر تنگ‌شدگی نسبتی (B_2/B_1) قابل توجه است و خطای استاندارد آن $(SEE = 0.0001)$ در مقایسه با عدد فرود و تنش برشی کوچکتر است، و این حاکی از حساسیت بالای عمق آب شستگی با نسبت تنگی شدگی است.

در این شکل d_s و d_{max} به ترتیب عمق آبشستگی و حد اکثر آن در شرایط بدون صفحات مستغرق و t و t_{max} به ترتیب زمان در هر لحظه و حداکثر زمان آزمایش، یعنی 7 ساعت است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، بیشینه عمق آبشستگی بعد از شاهد مربوط به زاویه حمله 30° و کمینه آن در زاویه حمله 20 درجه با دبی 30 لیتر بر ثانیه رخ داده است. در پژوهشی که رضاپوریان و همکاران (1388) در کاربرد صفحات مستغرق در کاهش عمق آبشستگی در کنار پایه‌های استوانه‌ای انجام داده‌اند، وقوع کمینه آبشستگی را تحت زاویه حمله 20 درجه تأیید مورد قرار داده‌اند.

شکل 3 حداکثر عمق آبشستگی در دبی 30 لیتر بر ثانیه، نسبت تنگ‌شدگی 0/333 و زاویه حمله 10 درجه را نشان می‌دهد. همچنین شکل 3 عمق آبشستگی را برای موقعیت‌های مختلف سری صفحات مستغرق برای تنگ‌شدگی 50 سانتی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، بیشترین عمق آبشستگی در قرارگیری صفحات در زاویه 30° در دبی 40 لیتر بر ثانیه و کم‌ترین آن در زاویه 20° در دبی 20 لیتر بر ثانیه رخ داده است. همین روند برای تنگ‌شدگی 20، 30 و 40 سانتی‌متری نیز مشاهده شد.

جدول 3 خلاصه نتایج بررسی تأثیر صفحات مستغرق در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، با حضور یا عدم حضور صفحات

جدول 3 خلاصه نتایج بررسی تأثیر صفحات مستغرق در شرایط مختلف (تنگ‌شدگی و دبی) بر آب‌شستگی

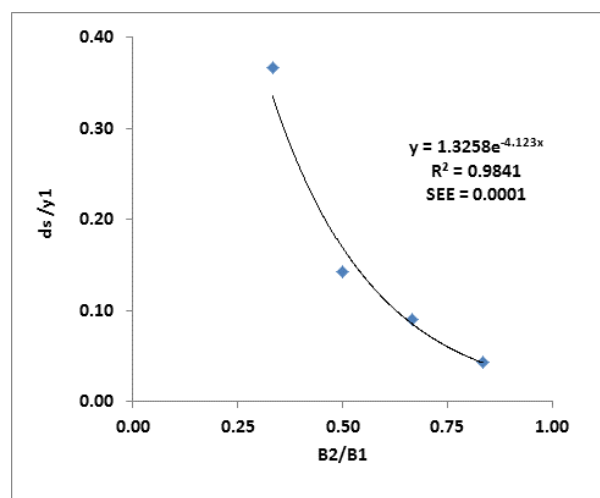
عمق آب‌شستگی						نسبت دبی	نسبت تنگ‌شدگی
با حضور صفحه زاویه حمله (درجه)			بدون حضور صفحه (cm)				
30	20	10	30	20	10		
عمق (cm)	عمق (cm)	کاهش (%)	عمق (cm)	عمق (cm)	کاهش (%)		
75	0/2	75	0/2	62/50	0/3	0/8	0/50
23/08	1	69/23	0/4	46/15	0/7	1/3	0/75
37/93	1/8	55/17	1/3	51/72	1/4	2/9	1
33/33	1	66/67	0/5	60	0/6	1/5	0/50
25/93	2	42/96	1	48/15	1/4	2/7	0/75
37/93	3/7	57/14	1/8	52/38	2	4/2	1
42/31	1/5	61/54	1	53/85	1/2	2/6	0/5
37/21	2/7	53/49	2	46/51	2/3	4/3	0/75
18/18	7/2	61/36	3/4	59/09	3/6	8/8	1
35/71	2/7	52/38	2	48/18	2/3	4/2	0/50
6/36	10/3	51/82	5/3	45/24	5/7	11	0/75

در سیال می‌باشد. در چنین شرایطی زمینه لازم برای وقوع پدیده آب‌شستگی انقباضی در مسیر جریان و آب-شستگی موضعی در کنار پایه‌های پل و تکیه‌گاه پل فراهم می‌شود.

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش تنش برشی نسبی، عمق آب‌شستگی نسبی با ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0.976$) و خطای استاندارد پایین ($SEE = 0.015$) افزایش می‌یابد. افزایش تنش برشی مثل سرعت جریان موجب بالا رفتن انرژی فرسایشی و ظرفیت حمل مواد جامد و افزایش ضریب انتقال رسوب در سیال می‌شود. در چنین شرایطی زمینه لازم برای وقوع پدیده آب‌شستگی انقباضی در مسیر جریان و آب شستگی موضعی در کنار پایه‌های پل و تکیه‌گاه پل فراهم می‌شود.

5- نتیجه‌گیری

این تحقیق که به‌منظور بررسی اثر صفحات مستغرق بر کاهش میزان آب‌شستگی در محل تنگ‌شدگی و تکیه‌گاه انجام شد، دارای نتایج زیر است: میزان عمق آب‌شستگی با عدد فرود و تنش برشی رابطه مستقیم دارد، ولی با نسبت



شکل 4 تغییرات بی‌بعد آب‌شستگی با نسبت تنگ‌شدگی و دبی 30 لیتر در ثانیه

نتایج این تحقیق نشان داد که عمق آب‌شستگی نسبی به صورت خطی برای کلیه داده‌ها با ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0.988$) و خطای استاندارد پایین ($SEE = 0.0156$) نسبت به عدد فرود افزایش می‌یابد. افزایش عدد فرود به معنای افزایش سرعت جریان و بالا رفتن انرژی فرسایشی و ظرفیت حمل مواد جامد و افزایش ضریب انتقال رسوب

τ_2	تنش برشی در محل تنگ‌شدگی
τ_c	تنش برشی بحرانی
φ	زاویه ایستایی
V	لزجت سینماتیکی آب
$\eta(\%)$	تخلخل

7- منابع

رضاپوریان س.، قربانی ب. و صمدی بروجنی ح. (1388). "مقایسه آزمایشگاهی تأثیر قرارگیری سری صفحه‌های مستغرق در بالادست و پایین دست پایه استوانه‌ای در کنترل آب‌شستگی موضعی، هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه"، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص.ص. 221-230.

شفاعی بجستان، م.، (1373). هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز.

Chang F. and Davis S. (1998). "Maryland SHA procedure for estimating scour at bridge abutments". ASCE. Copenidium of Conference Scour Paper. pp. 412-416.

Dey s. and Barbhuiya A. K. (2004). "Clear-water scour at abutments in thinly eroded beds". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE.130. pp. 622-634.

Ghorbani B. and Kells J. A. (2008). "Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier". Journal of Hydraulic Engineering. 46 (4). pp.123-134.

Johnson P. A. Hey R. D. Tessier M. and Rosgen D. L. (2001). "Use of vanes for control of scour at vertical wall abutment". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 127(9). pp. 772-779.

Komura, S. (1966). "Equilibrium depth of scour in long constrictions". Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 92, No. HY5, pp. 17-37.

Laursen, E.M. (1963). "Scour at bridge crossings". Trans. ASCE, Vol. 127, part 1, p. 166.

Laursen, E.M. (1963). "An analysis of relief bridge scour". Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. ASCE, Vol. 89, No. HY3, pp. 106-109.

Lauchlan C. S. (1999). "Pier scour countermeasures". PhD Thesis, University of Auckland, New Zealand, pp. 299- 316.

Liu H.K. Chang F.M. and Skinner M.M. (1961). "Effect of bridge construction on scour and backwater". CER 60 HKL 22. Colorado State University. Civil Engineering Section. Fort Collins, Colorado.

تنگ‌شدگی رابطه عکس دارد. به عبارتی هر چه مقدار دو عامل اول افزایش می‌یابد، میزان آبشستگی نیز افزایش می‌یابد، ولی هرچه نسبت تنگ‌شدگی کاهش می‌یابد، عمق آب شستگی افزایش می‌یابد. آبشستگی در تمامی تنگ‌شدگی‌ها در مجاورت تکیه‌گاه رخ می‌دهد. این پدیده از ابتدای محدوده تنگ‌شدگی آغاز و در تنگ‌شدگی‌های بیشتر تا اواسط محدوده تنگ‌شدگی ادامه می‌یابد. حساسیت عمق آب‌شستگی نسبت به تنگی‌شدگی کم، ولی نسبت به عدد فرود و تنش برشی زیاد است. حضور سری صفحات مستغرق در کلیه موقعیت‌های قرارگیری با سه زاویه حمله متفاوت، حاکی از تأثیر صفحات بر کاهش عمق آب‌شستگی در محدوده تنگ‌شدگی است. بهترین عمل کرد صفحات در تمام آزمایش‌ها هنگامی است که صفحات مستغرق زاویه 20 درجه با جهت جریان ایجاد کنند. بیشترین میزان کاهش آب‌شستگی در شرایط اخیر و در نسبت تنگ‌شدگی 0/83 برابر 75 درصد می‌باشد.

6- فهرست علائم

B_1	عرض کانال اصلی
B_2	عرض تنگ‌شدگی
C_u	ضریب یکنواختی
d_{50}	قطر متوسط
Fr	عدد فرود
G	وزن مخصوص آب
G_s	وزن مخصوص رسوب
g	شتاب ثقل
k_θ	ضریب تأثیر زاویه انقباضی
k_L	ضریب تأثیر طولی
L	طول تنگ‌شدگی
n	ضریب مانینگ
V_2	سرعت در مقطع انقباضی
y_1	عمق جریان
Z_{max}	حداکثر آبشستگی انقباضی
ε_α	ضریب تأثیر زاویه تنگ‌شدگی
ε_n	ضریب تأثیر زبری دیوارهای تنگ‌شدگی
ρ	چگالی آب
ρ_s	چگالی ذرات بستر
τ_1	تنش برشی در بالادست محل تنگ‌شدگی

Hydraulic Engineering. ASCE. 109 (3). pp. 338-350.

USBR, (1977), *Design of small dams*, United States Government Printing Office, p. 816.

Molinas A. and Kheireldin K. (1998). "Shear stress around vertical wall abutments". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 124: 822-830.

Raudkivi A.J. and Ettma R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical piers". Journal of