

پیش‌بینی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در کانال‌ها با مقطع مرکب

یوسف رضانی^{۱*}، مهدی قمشی^۲ و سید حبیب موسوی جهرمی^۳

چکیده

شکست پل‌ها ناشی از آب‌شستگی در تکیه‌گاه آن‌ها اهمیت مطالعه در مورد پیش‌بینی عمق آب‌شستگی را روشن می‌کند. بیشتر تکیه‌گاه پل‌ها در دشت سیلابی هستند. همچنین، یکی از موارد متداول در یک دشت سیلابی وجود پوشش گیاهی است. در مقطع‌های مرکب توزیع سرعت و تنش برشی غیریکنواخت است و نمی‌توان نتایج حاصل از کانال‌های مستطیلی را برای آن‌ها به کار برد. در این پژوهش، براساس داده‌های آزمایشگاهی، آنالیز ابعادی و رگرسیون غیرخطی چندمتغیره، یک رابطه بدون بعد برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی واقع در دشت سیلابی دارای پوشش گیاهی با مقطع مرکب ارائه شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد توافق خوبی بین عمق آب‌شستگی مشاهده شده و عمق آب‌شستگی پیش‌بینی شده با رابطه پیشنهادی وجود دارد. برای رابطه ارائه شده، ضریب همبستگی ۰/۹۴ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۷۹ سانتی‌متر است.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، آب زلال، پوشش گیاهی، تکیه‌گاه پل، دشت سیلابی.

ارجاع: رضانی ی.، قمشی م. و موسوی جهرمی س. ح. ۱۳۹۳. پیش‌بینی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در کانال‌ها با مقطع مرکب. مجله پژوهش آب ایران. ۱۱۷-۱۰۹: (۱۴)۸.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: v.ramezani@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۵/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۱۸

مقدمه

شکست پل ناشی از آب‌شستگی کلی در فونداسیون (شامل پایه^۱ و تکیه‌گاه^۲)، ضرورت مطالعه در مورد پیش‌بینی آب‌شستگی و راه‌های محافظت در برابر آن را به طور کامل روشن می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهند که مشکل آب‌شستگی در تکیه‌گاه پل‌ها مهم است. بر طبق مطالعات ملویل (۱۹۹۲)، از ۱۰۸ شکست پل که در فاصله سال‌های ۱۹۸۴-۱۹۶۰ در نیوزیلند رخ داد، ۲۹ مورد آن مربوط به آب‌شستگی تکیه‌گاه پل بود. ملویل همچنین می‌گوید که ۷۰ درصد هزینه‌ها روی شکست پل در نیوزیلند ناشی از آب‌شستگی تکیه‌گاه پل بوده است.

ملویل (۱۹۹۲) داده‌های آب‌شستگی تکیه‌گاه پل‌ها در کانال مستطیلی توسط ژیل (۱۹۷۲)، وانگ (۱۹۸۲)، تی (۱۹۸۴)، کوان (۱۹۸۸ و ۱۹۸۴) و کانداسمی (۱۹۸۹) را ترسیم کرد. او d_s/y را در برابر L/y و d_s/L را در برابر y/L ترسیم کرد. d_s عمق آب‌شستگی، L طول تکیه‌گاه (عمود بر جهت جریان) و y عمق جریان است. معادلات زیر به ترتیب برای تکیه‌گاه‌های متوسط، کوتاه و بلند اطلاق می‌شود. معیار طبقه‌بندی ملویل براساس نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان (L/y) است.

$$d_s = 2K_s^* K_\theta^* \sqrt{Ly} \quad 1 \leq L/y \leq 25 \quad (1)$$

$$d_s = 2K_s L \quad L/y < 1 \quad (2)$$

$$d_s = 10K_\theta y \quad L/y > 25 \quad (3)$$

در معادله‌های بالا، K_s فاکتور شکل تکیه‌گاه^۳، K_θ فاکتور جهت تکیه‌گاه^۴، K_s^* فاکتور شکل تعدیل شده و K_θ^* فاکتور جهت تعدیل شده هستند. برای تکیه‌گاه‌های بلند اثر شکل تکیه‌گاه کم بوده، در حالیکه برای تکیه‌گاه‌های کوتاه اثر جهت تکیه‌گاه کم است. برای تکیه‌گاه‌های متوسط فاکتور شکل تعدیل شده K_s^* و فاکتور جهت تعدیل شده K_θ^* استفاده می‌شود.

معادله زیر برای تعیین عمق آب‌شستگی در تکیه‌گاه پل‌ها توسط ملویل (۱۹۹۵) برای آسان بودن طراحی پیشنهاد شد.

$$d_s = K_y K_l K_t K_d K_s K_\theta K_G \quad (4)$$

که در آن K_y فاکتور اثر عمق جریان، K_l فاکتور اثر طول تکیه‌گاه، K_t فاکتور اثر شدت جریان^۵، K_d فاکتور اثر اندازه رسوب‌ها، K_s فاکتور اثر شکل تکیه‌گاه، K_θ فاکتور اثر چولگی^۶ تکیه‌گاه و K_G فاکتور اثر هندسه آبراهه است. مثال‌های طراحی در ملویل (۱۹۹۷) آمده است.

استارم و کریسچویدس (۱۹۹۸) به صورت آزمایشگاهی به بررسی آب‌شستگی پیرامون تکیه‌گاه پل در شرایط آب زلال^۷ و در طول‌های مختلف در مقطع مرکب پرداختند. میزان عقب نشینی دماغه تکیه‌گاه نسبت به مقطع اصلی از صفر تا یک مقدار بزرگ متغیر بوده است. آن‌ها دریافتند که داده‌های آب‌شستگی را می‌توان بر حسب نسبت بدون بعد $[q_{fl}/(M^* q_{f0c})]$ بیان کرد. که در آن M نسبت دبی انقباض است که به صورت نسبت دبی در مقطع جریان نزدیک شونده^۸ با عرضی معادل عرض بازشدگی به دبی کل جریان نزدیک شونده، q_{fl} دبی در واحد عرض در شروع آب‌شستگی در مقطع نزدیک شونده دشت سیلابی، q_{f0c} دبی در واحد عرض بحرانی در سیلاب‌دشت برای شرایط بدون سازه تکیه‌گاه است.

استارم (۱۹۹۹) برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی معادله‌ای وابسته به مقادیر موضعی متغیرهای هیدرولیکی در نزدیکی دماغه تکیه‌گاه به فرم زیر ارائه کرد:

$$\frac{d_s}{y_{f0}} = f\left(\frac{U_{ab}}{U_c} - 1, \frac{y_{ab}}{y_{f0}}\right) \quad (5)$$

که در آن U_{ab} ماکزیمم سرعت در گوشه بالادست دماغه تکیه‌گاه، y_{ab} عمق جریان در سیلاب‌دشت در محل وقوع سرعت U_{ab} در مقطع تنگ شده و U_c سرعت بحرانی است. استارم (۲۰۰۶) آزمایش‌های خود را برای انواع مختلف هندسه مقطع مرکب انجام داد و توزیع جریان بین مجرای اصلی و دشت سیلابی را در مقطع تنگ شده نیز در نظر گرفت. همچنین اندازه رسوب‌ها، پس‌زدگی آب ناشی از انسداد ایجاد شده با تکیه‌گاه، شکل تکیه‌گاه، سرعت جریان نزدیک شونده و عمق جریان را در رابطه پیشنهادی عمق آب‌شستگی در نظر گرفت. او در آزمایش‌های خود هم از تکیه‌گاه‌هایی استفاده کرد که به طور کامل در دشت سیلابی قرار گرفته بودند و هم تکیه‌گاه‌هایی که در ساحل مجرای اصلی تمام می‌شدند. او از ۳ نوع رسوب با اندازه‌های

5- Flow intensity
6- Skewness
7- Clear water
8- Approach section

1- Pier
2- Abutment
3- Abutment shape factor
4- Abutment orientation factor

برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی در دشت سیلابی از موانع استوانه‌ای استفاده شده است. پژوهشگران بسیاری برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی از موانع استوانه‌ای استفاده کرده‌اند.

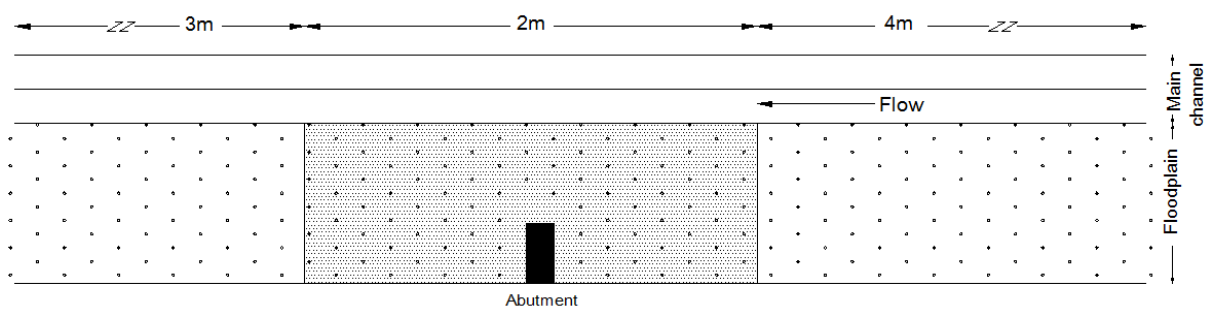
مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در فلومی به طول ۹ متر، عرض ۱ متر و شیب صفر انجام شد. عرض فلوم (دشت سیلابی) ۷۰ سانتی‌متر و عرض آبراهه اصلی ۳۰ سانتی‌متر و اختلاف ارتفاع کف آبراهه اصلی و کف دشت سیلابی ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (شکل‌های ۱ و ۲). تکیه‌گاه در یک بستر رسوبی به طول ۲ متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر در دشت سیلابی قرار گرفت. دبی ورودی با شیر ورودی تنظیم و با یک سرریز V شکل کالیبره شده اندازه‌گیری می‌شد. عمق جریان نیز با استفاده از دریچه انتهایی تنظیم می‌شد. چند آرام کننده جریان در ابتدای فلوم برای کاهش تلاطم‌های ناخواسته آب نصب شد.

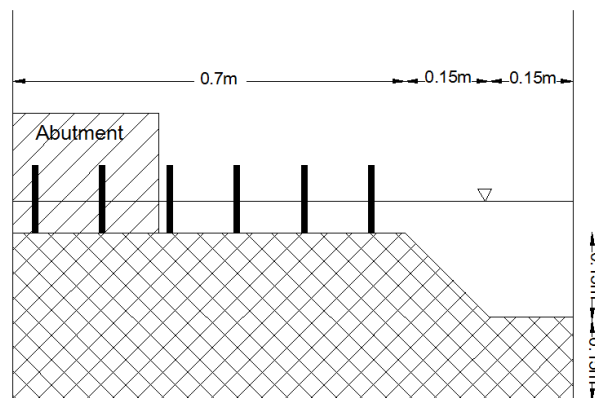
۱/۱، ۲/۷ و ۳/۳ میلی‌متر استفاده کرد.

استون و شن (۲۰۰۲) به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان در یک کانال روباز با موانع استوانه‌ای پرداختند. مطالعه آزمایشگاهی شامل تعداد زیادی آزمایش با موانع استوانه‌ای مستغرق و غیرمستغرق در ابعاد و تراکم‌های مختلف بود. نتایج نشان داد مقاومت جریان با عمق جریان، تراکم پایه‌ها، ارتفاع پایه‌ها و قطر پایه‌ها تغییر می‌کند. بانگ و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی الگوی جریان در مقطع مرکب با سیلاب‌دشت‌هایی که دارای پوشش گیاهی هستند، پرداختند. آن‌ها ۳ پوشش گیاهی علف، بوته و درخت را آزمایش کردند. در مورد پوشش گیاهی درخت در دشت سیلابی، از موانع استوانه‌ای استفاده شد.

بیشتر تکیه‌گاه پل‌ها در دشت سیلابی هستند و قرار گرفتن تکیه‌گاه در مجرای اصلی کمتر رایج است (استارم، ۲۰۰۶). یکی از موارد متداول در دشت سیلابی وجود پوشش گیاهی است. هدف این پژوهش ارائه یک رابطه برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل واقع در دشت سیلابی دارای پوشش گیاهی است. در این پژوهش

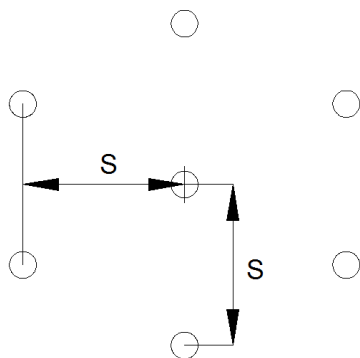


شکل ۱- پلان کانال آزمایشگاهی مورد مطالعه



شکل ۲- مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی مورد مطالعه

تراکم با $S=16$ ، $S=12$ ، $S=8$ و حالتی که پوشش گیاهی نداشته باشیم در نظر گرفته شد.



شکل ۳- آرایش و فواصل موانع استوانه‌ای

در ابتدای آزمایش‌ها، برای جلوگیری از آب‌شستگی ناخواسته ناشی از عمق کم جریان، فلوم به وسیله یک لوله با نرخ کم پر شده و سپس دبی و عمق مورد نظر تنظیم می‌شد.

مدت آزمایش‌ها تا زمانی بود که حفره آب‌شستگی ایجاد شده به طور تقریبی به حالت تعادل رسیده باشد. در اینجا با توجه به مشاهدات و امکانات آزمایشگاهی موجود، این زمان ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. بعد از اتمام هر آزمایش، جریان آب فلوم به آرامی تخلیه شده و نقطه ماکزیمم آب‌شستگی و همچنین توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی توسط متر لیزری با دقت ۱ میلی‌متر برداشت می‌شد.

آنالیز ابعادی

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، برای شرایط جریان نزدیک شونده آب زلال و در صورتی که اثرات ویسکوزیته نادیده گرفته شود، عمق آب‌شستگی d_s را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای زیر نوشت:

$$d_s = f_1[\rho, V_1, y_1, \gamma'_s, g, D_{50}, L_a, B_m, B_f, y_m] \quad (7)$$

که در آن، V_1 سرعت جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی؛ y_1 عمق جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی؛ g شتاب ثقل؛ D_{50} متوسط اندازه ذرات رسوب؛ L_a طول تکیه‌گاه؛ B_m عرض آبراهه اصلی؛ B_f عرض دشت سیلابی و y_m عمق آب در آبراهه اصلی است. در این پژوهش، تکیه‌گاه عمود بر جریان نزدیک شونده بوده و دماغه تکیه‌گاه به صورت لبه تیز است. بنابراین، اثرات شکل و

فاصله ابتدای بستر رسوبی تا ابتدای فلوم ۴ متر و فاصله انتهای بستر رسوبی تا انتهای فلوم نیز ۳ متر در نظر گرفته شد. این فاصله باعث می‌شود تا نیمرخ سطح آب روی بستر رسوبی یکنواخت بوده و تحت تأثیر دریاچه نباشد.

آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با تنظیم دبی و عمق جریان در حد آستانه حرکت رسوبها ($U/U_c = 0.95$) انجام شد. U متوسط سرعت جریان نزدیک شونده و U_c سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی است. ۵ دبی در بازه ۲۰-۴۰ لیتر بر ثانیه انتخاب و برای آن‌ها آزمایش‌های حد آستانه حرکت روی دشت سیلابی انجام شد. بدین ترتیب ۵ عمق $4/8$ ، $6/4$ ، $8/3$ ، 10 و $11/8$ سانتی‌متر به دست آمد.

براساس طبقه‌بندی ملویل (۱۹۹۲)، بیشتر شرایط واقعی آب‌شستگی تکیه‌گاه پل‌ها در محدوده طول متوسط تکیه‌گاه قرار می‌گیرند. در این پژوهش از تکیه‌گاه‌هایی با دیوار عمودی و در محدوده طول متوسط طبقه‌بندی ملویل استفاده شد. با توجه به عمق آب روی دشت سیلابی، عرض آبراهه و عرض دشت سیلابی، تکیه‌گاه‌هایی با سه طول ۱۲، ۱۹ و ۲۶ سانتی‌متر در آزمایش‌ها استفاده شد. ماکزیمم طول تکیه‌گاه طوری انتخاب شد که به طور تقریبی از ۲۵ درصد عرض آبراهه بیشتر نشود. عرض تکیه‌گاه (در جهت جریان) نیز ۱۲ سانتی‌متر انتخاب شد. رسوب غیرچسبنده با دانه‌بندی یکنواخت و با قطر متوسط 0.4 میلی‌متر در آزمایش‌ها استفاده شد. معیار یکنواختی رسوب براساس مقدار انحراف معیار هندسی σ_g است. برای توزیع لوگ نرمال رسوبها، σ_g به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84.1}}{d_{15.9}}} = \frac{d_{84.1}}{d_{50}} \quad (6)$$

رسوبها در صورتی یکنواخت در نظر گرفته خواهند شد که $\sigma_g < 1/4$ است (دی و باربویا، ۲۰۰۵). در اینجا $\sigma_g = 1/27$ به دست آمد که نشان دهنده یکنواختی رسوبها است.

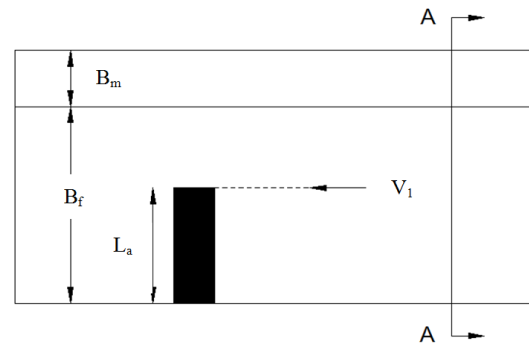
همان‌طور که ذکر شد، در این پژوهش برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی در دشت سیلابی از موانع استوانه‌ای استفاده شد. از موانع استوانه‌ای به صورت آرایش زیگزاگی و قطر ثابت در ۴ تراکم و در حالت غیرمستغرق استفاده شد. قطر موانع استوانه‌ای با توجه به عمق کم جریان در دشت سیلابی ۱ سانتی‌متر انتخاب شد. با توجه به شکل ۳، چهار

در آن نرخ جریان در واحد عرض در مقطع نزدیک شونده و مقطع تنگ شده ثابت است، مناسب است. در مورد یک آبراهه مرکب، توزیع جریان در مقطع عرضی غیریکنواخت بوده و بستگی به هندسه و زبری آبراهه مرکب دارد. غیریکنواختی توزیع جریان، بر توزیع سرعت جریان نزدیک شونده و همچنین بر افزایش نسبی نرخ جریان در واحد عرض از مقطع نزدیک شونده به مقطع تنگ شده، تأثیرگذار است. برای یک طول تکیه‌گاه ثابت، با تغییر در هندسه مقطع مرکب و زبری، توزیع جریان نزدیک شونده و توزیع جریان در مقطع تنگ شده، تغییر خواهند کرد. به عبارت دیگر، طول تکیه‌گاه پارامتر مهمی است اما یک طول تکیه‌گاه مشابه ممکن است بسته به توزیع جریان نزدیک شونده در مقطع مرکب و توزیع جریان در مقطع تنگ شده، عمق آب‌شستگی متفاوتی را نتیجه دهد.

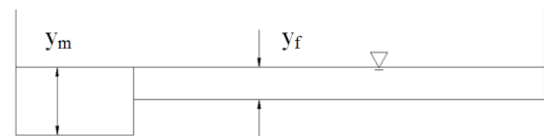
برای تخمین اثرات توزیع جریان بر آب‌شستگی تکیه‌گاه پل، استفاده از نسبت دبی انقباض، $M=Q_0/Q$ ، به جای استفاده از نسبت انقباض هندسی، m ، پیشنهاد شده است. نسبت دبی انقباض، M ، به صورت نسبت دبی در مقطع جریان نزدیک شونده با عرضی معادل عرض بازشدگی (Q_0) به دبی کل جریان نزدیک شونده (Q) تعریف شده است (کیندسویر و کارتر، ۱۹۵۵). نسبت دبی انقباض، M ، یک تخمین از تغییر نسبی در نرخ جریان در واحد عرض از مقطع نزدیک شونده به مقطع تنگ شده بوده و همچنین به طور غیرمستقیم، بازتاب میزان انقباض جریان در انتهای تکیه‌گاه و میزان قدرت گرداب نعل اسبی (به عنوان عامل اصلی آب‌شستگی) در تکیه‌گاه پل است. همچنین، قدرت گرداب نعل اسبی تابعی از سرعت جریان نزدیک شونده در بالادست تکیه‌گاه و به موازات دماغه آن است. بنابراین، به جای استفاده از میانگین سرعت جریان نزدیک شونده در بالادست تکیه‌گاه و به موازات دماغه آن استفاده می‌شود. بدیهی است که تأثیر سه نسبت هندسی B_m/B_f ، B_f/y_1 و y_m/y_1 روی توزیع جریان، در مقدار نسبت دبی انقباض، M ، پنهان است. همچنین، عدد فرود بحرانی برای آستانه حرکت رسوب‌ها را می‌توان جایگزین عدد بدون بعد D_{50}/y_1 کرد (جین، ۱۹۸۱). با انجام این تغییرات روی معادله ۹، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{y_1} = f_4[F_1, F_c, M] \quad (10)$$

چولگی تکیه‌گاه ثابت است. علاوه بر این، توزیع دانه‌بندی رسوب نیز یکنواخت فرض شده است.



شکل ۴- تعریف طرح کلی تکیه‌گاه پل واقع در دشت سیلابی (استارم و جانجوا، ۱۹۹۴)



شکل ۵- مقطع A-A

با آنالیز ابعادی معادله ۷ به روش پی-باکینگهام، معادله ۸ با عددهای بدون بعد زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{y_1} = f_2 \left[\frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{D_{50}}{y_1}, \frac{V_1}{\sqrt{g' D_{50}}}, \frac{L_a}{B_f}, \frac{B_m}{B_f}, \frac{B_f}{y_1}, \frac{y_m}{y_1} \right] \quad (8)$$

که در آن $g' = \gamma_s' / \rho$ است. عدد بدون بعد سوم در معادله ۸ عدد فرود دنسیمتریک ذره یا عدد رسوب (کارستنس، ۱۹۶۶) بوده که با پارامتر شیلدز نیز ارتباط دارد. برای جریان آب روی ذرات رسوبی کوارتز، $(\rho_s - \rho) / \rho$ ثابت بوده و به عدد فرود ذره دنسیمتریک نیازی نیست. نسبت انقباض هندسی، m ، تابعی از L_a/B_f و B_m/B_f است. با حذف عدد فرود ذره دنسیمتریک و جایگزینی m بجای L_a/B_f در معادله ۸، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{d_s}{y_1} = f_3 \left[\frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{D_{50}}{y_1}, m, \frac{B_m}{B_f}, \frac{B_f}{y_1}, \frac{y_m}{y_1} \right] \quad (9)$$

نسبت انقباض هندسی، m ، بستگی به طول تکیه‌گاه و عرض آبراهه دارد و برای یک آبراهه مستطیلی شکل که

پوشش گیاهی استفاده نشد، کاهش پیدا کرده و به دنبال آن عدد فرود جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی، F_1 ، نیز کاهش پیدا کرده و عمق آب‌شستگی کمتری به دست آمد. همچنین، پوشش گیاهی موجب بزرگ‌تر شدن نسبت دبی انقباض، M ، نسبت به حالتی که پوشش گیاهی استفاده نشد، شد. میزان کاهش در عدد فرود جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی و افزایش نسبت دبی انقباض، در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی متفاوت بود.

نتایج و بحث

در جدول ۱ آمار و داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

که در آن، F_1 ، عدد فرود جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی بوده و از عمق و سرعت جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی (به موازات دماغه تکیه‌گاه) برای محاسبه آن استفاده می‌شود. F_c نیز عدد فرود بحرانی برای آستانه حرکت رسوب‌ها جریان نزدیک شونده است.

در معادله ۱۰، پوشش گیاهی با تغییر در پروفیل عرضی سرعت جریان نزدیک شونده در تراکم‌های مختلف، اثر خود را بر روی عدد فرود جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی، F_1 ، و نسبت دبی انقباض، M ، نشان خواهد داد. همان‌طور که در بالا ذکر شد قدرت گرداب نعل اسبی (به عنوان عامل اصلی آب‌شستگی) تابعی از سرعت جریان نزدیک شونده در بالادست تکیه‌گاه و به موازات دماغه آن است. در حالتی که پوشش گیاهی استفاده شد، سرعت جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی نسبت به حالتی که

جدول ۱- آمار و داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

$L_a(\text{cm})$	$S(\text{cm})$	$y_1(\text{cm})$	F_1	M	$d_s(\text{cm})$
۱۲	بدون پوشش	۴/۸	۰/۲۷	۰/۹۵	۶/۴
۱۲	بدون پوشش	۶/۴	۰/۲۵	۰/۹۴	۷/۸
۱۲	بدون پوشش	۸/۳	۰/۲۳	۰/۹۴	۸/۷
۱۲	بدون پوشش	۱۰	۰/۲۱	۰/۹۳	۹/۲
۱۲	بدون پوشش	۱۱/۸	۰/۲۰	۰/۹۳	۹/۴
۱۹	بدون پوشش	۴/۸	۰/۳۰	۰/۹۲	۸/۵
۱۹	بدون پوشش	۶/۴	۰/۲۸	۰/۹۰	۱۰/۸
۱۹	بدون پوشش	۸/۳	۰/۲۶	۰/۸۹	۱۲/۶
۱۹	بدون پوشش	۱۰	۰/۲۴	۰/۸۹	۱۴
۱۹	بدون پوشش	۱۱/۸	۰/۲۲	۰/۸۸	۱۴/۸
۲۶	بدون پوشش	۴/۸	۰/۳۱	۰/۸۸	۱۱/۷
۲۶	بدون پوشش	۶/۴	۰/۲۸	۰/۸۶	۱۴/۲
۲۶	بدون پوشش	۸/۳	۰/۲۷	۰/۸۵	۱۵/۸
۲۶	بدون پوشش	۱۰	۰/۲۴	۰/۸۴	۱۷
۲۶	بدون پوشش	۱۱/۸	۰/۲۲	۰/۸۳	۱۷/۹
۱۲	۱۶	۴/۸	۰/۲۴	۰/۹۶	۵/۹
۱۲	۱۶	۶/۴	۰/۲۲	۰/۹۵	۷/۳
۱۲	۱۶	۸/۳	۰/۲۱	۰/۹۴	۸/۴
۱۲	۱۶	۱۰	۰/۲۰	۰/۹۴	۸/۹
۱۲	۱۶	۱۱/۸	۰/۱۸	۰/۹۳	۹/۱
۱۹	۱۶	۴/۸	۰/۲۵	۰/۹۳	۷/۷
۱۹	۱۶	۶/۴	۰/۲۴	۰/۹۱	۱۰
۱۹	۱۶	۸/۳	۰/۲۲	۰/۹۰	۱۱/۹
۱۹	۱۶	۱۰	۰/۲۱	۰/۹۰	۱۳/۳

ادامه جدول ۱-

$L_a(\text{cm})$	$S(\text{cm})$	$y_1(\text{cm})$	F_1	M	$d_s(\text{cm})$
۱۹	۱۶	۱۱/۸	۰/۲۰	۰/۸۹	۱۴/۲
۲۶	۱۶	۴/۸	۰/۲۶	۰/۹۰	۱۰/۴
۲۶	۱۶	۶/۴	۰/۲۵	۰/۸۸	۱۳
۲۶	۱۶	۸/۳	۰/۲۳	۰/۸۶	۱۴/۶
۲۶	۱۶	۱۰	۰/۲۱	۰/۸۵	۱۵/۹
۲۶	۱۶	۱۱/۸	۰/۲۰	۰/۸۵	۱۶/۸
۱۲	۱۲	۴/۸	۰/۲۳	۰/۹۶	۵/۲
۱۲	۱۲	۶/۴	۰/۲۱	۰/۹۵	۶/۷
۱۲	۱۲	۸/۳	۰/۱۹	۰/۹۵	۷/۹
۱۲	۱۲	۱۰	۰/۱۸	۰/۹۴	۸/۵
۱۲	۱۲	۱۱/۸	۰/۱۷	۰/۹۴	۸/۷
۱۹	۱۲	۴/۸	۰/۲۳	۰/۹۳	۶/۷
۱۹	۱۲	۶/۴	۰/۲۲	۰/۹۲	۹/۱
۱۹	۱۲	۸/۳	۰/۲۰	۰/۹۱	۱۱
۱۹	۱۲	۱۰	۰/۱۹	۰/۹۰	۱۲/۵
۱۹	۱۲	۱۱/۸	۰/۱۸	۰/۹۰	۱۳/۴
۲۶	۱۲	۴/۸	۰/۲۴	۰/۹۰	۸/۹
۲۶	۱۲	۶/۴	۰/۲۲	۰/۸۹	۱۱/۶
۲۶	۱۲	۸/۳	۰/۲۰	۰/۸۸	۱۳/۲
۲۶	۱۲	۱۰	۰/۱۹	۰/۸۷	۱۴/۵
۲۶	۱۲	۱۱/۸	۰/۱۸	۰/۸۶	۱۵/۵
۱۲	۸	۴/۸	۰/۱۹	۰/۹۶	۵/۹
۱۲	۸	۶/۴	۰/۱۸	۰/۹۵	۷/۳
۱۲	۸	۸/۳	۰/۱۷	۰/۹۵	۸/۴
۱۲	۸	۱۰	۰/۱۶	۰/۹۵	۸/۹
۱۲	۸	۱۱/۸	۰/۱۵	۰/۹۴	۹/۱
۱۹	۸	۴/۸	۰/۲۰	۰/۹۴	۷/۷
۱۹	۸	۶/۴	۰/۱۸	۰/۹۳	۱۰
۱۹	۸	۸/۳	۰/۱۶	۰/۹۲	۱۱/۹
۱۹	۸	۱۰	۰/۱۶	۰/۹۱	۱۳/۳
۱۹	۸	۱۱/۸	۰/۱۵	۰/۹۱	۱۴/۲
۲۶	۸	۴/۸	۰/۲۰	۰/۹۲	۱۰/۴
۲۶	۸	۶/۴	۰/۱۸	۰/۹۰	۱۳
۲۶	۸	۸/۳	۰/۱۷	۰/۸۹	۱۴/۶
۲۶	۸	۱۰	۰/۱۶	۰/۸۸	۱۵/۹
۲۶	۸	۱۱/۸	۰/۱۵	۰/۸۷	۱۶/۸

$$\frac{d_s}{y_1} = 9.132(F_c)^{1.661}(F_1)^{0.306}(M)^{-6.193} \quad (11)$$

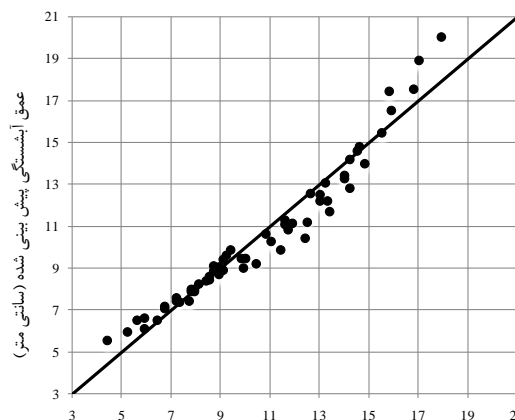
در شکل ۶ عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده در برابر عمق آبشستگی پیش‌بینی شده با معادله ۱۱ نشان داده

با استفاده از معادله ۱۰، داده‌های آزمایشگاهی جدول ۱ و به کارگیری رگرسیون چندمتغیره غیرخطی در نرم‌افزار spss معادله زیر به دست آمد:

برای کارایی رابطه رگرسیونی چندمتغیره غیرخطی به دست آمده، از دو شاخص آماری ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. برای رابطه رگرسیونی ارائه شده، ضریب همبستگی ۰/۹۴ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۷۹ سانتی‌متر به دست آمده است.

در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ آنالیز حساسیت پارامتر وابسته d_s/y_1 نسبت به پارامترهای مستقل F_c و F_1 نشان داده شده است. در این‌جا ابتدا در محدوده پارامترهای مستقل، مقداری انتخاب شده و پارامتر وابسته d_s/y_1 محاسبه شده است. سپس به یکی از پارامترهای مستقل ۱۰ درصد اضافه و ۱۰ درصد کم شده و بقیه پارامترهای مستقل ثابت مانده‌اند. مقدار تغییر در نتیجه، بیانگر میزان حساسیت پارامتر وابسته d_s/y_1 نسبت به پارامتر مستقل مورد نظر است.

شده است. خط ۴۵ درجه نشان دهنده توافق کامل بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار پیش‌بینی شده است.



عمق آب‌شستگی اندازه‌گیری شده (سانتی متر)

شکل ۶- عمق آب‌شستگی اندازه‌گیری شده در برابر عمق آب‌شستگی پیش‌بینی شده

جدول ۲- آنالیز حساسیت d_s/y نسبت به M در سطح $\pm 10\%$ درصد

F_c	F_1	M	d_s/y	درصد تغییر M	درصد تغییر d_s/y
۰/۳	۰/۲۵	۰/۸۶	۲/۰۵	-	-
۰/۳	۰/۲۵	۰/۹۴	۱/۱۸	+۱۰	-۴۲/۳
۰/۳	۰/۲۵	۰/۷۸	۳/۷۶	-۱۰	+۸۳/۱

جدول ۳- آنالیز حساسیت d_s/y نسبت به F_c در سطح $\pm 10\%$ درصد

F_c	F_1	M	d_s/y	درصد تغییر F_c	درصد تغییر d_s/y
۰/۳	۰/۲۵	۰/۸۶	۲/۰۵	-	-
۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۸۶	۲/۴۱	+۱۰	+۱۷/۲
۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۸۶	۱/۷۲	-۱۰	-۱۶/۱

جدول ۴- آنالیز حساسیت d_s/y نسبت به F_1 در سطح $\pm 10\%$ درصد

F_c	F_1	M	d_s/y	درصد تغییر F_1	درصد تغییر d_s/y
۰/۳	۰/۲۵	۰/۸۶	۲/۰۵	-	-
۰/۳	۰/۲۷۵	۰/۸۶	۲/۱۱	+۱۰	+۲/۹
۰/۳	۰/۲۲۵	۰/۸۶	۱/۹۹	-۱۰	-۳/۱

مقدار حساسیت عمق نسبی آب‌شستگی نسبت به پارامترهای مربوطه به گونه‌ای نیست که بتوان از بعضی از آن‌ها صرف‌نظر کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش M از ۰/۸۶ به ۰/۹۴، d_s/y_1 به میزان ۴۲/۳ درصد کاهش و با کاهش M از ۰/۸۶ به ۰/۷۸، d_s/y_1 به میزان ۸۳/۱ درصد افزایش پیدا کرده است. مقدار نسبت دبی

همان‌طور که در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود پارامتر d_s/y_1 بیشترین حساسیت را نسبت به پارامتر نسبت دبی انقباض، M ، و در مرتبه بعدی به عدد فرود بحرانی برای آستانه حرکت رسوب‌های جریان نزدیک شوند، F_c ، و کمترین حساسیت را به عدد فرود جریان نزدیک شونده در دشت سیلابی، F_1 ، دارد. در هر صورت

8. Kwan F. 1988. Study of abutment scour. Report No. 451, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
9. Melville B. W. 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(4):615-631.
10. Melville B. W. 1995. Bridge abutment scour in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121(12):863-868.
11. Melville B. W. 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*. 123(2):125-136.
12. Stone B. M. and Shen H. T. 2002. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(5):500-506.
13. Sturm T. W. and Janjua N. S. 1994. Clear-water scour around abutments in floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*. 120(8):956-972.
14. Sturm T. W. and Chrisochoides A. 1998. Abutment scour in compound channels for variable setbacks. *International Water Resources Engineering Conference, ASCE, Memphis*. 174-179.
15. Sturm T. W. 1999. Abutment scour in compound channels. *Stream Stability and Scour at Highway Bridges, ASCE, Reston*. 443-456.
16. Sturm T. W. 2006. Scour around bankline and setback abutments in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(1):21-32.
17. Tey C. B. 1984. Local scour at bridge abutments. Report No. 329. School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
18. Wong W. H. 1982. Scour at bridge abutments. Report No. 275. School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
19. Yang K. J. Cao S. Y. and Knight D. W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(2):148-159.

انقباض، M، بازتاب اثر طول تکیه‌گاه و غیریکنواختی توزیع جریان مقطع مرکب روی آب‌شستگی است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آب‌شستگی تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی واقع در دشت سیلابی یک کانال با مقطع مرکب در ۴ تراکم پوشش گیاهی، ۳ طول تکیه‌گاه و شرایط هیدرولیکی آب زلال بررسی شد. براساس داده‌های آزمایشگاهی، آنالیز ابعادی و رگرسیون غیرخطی چندمتغیره، یک رابطه بدون بعد برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی در دشت سیلابی دارای پوشش گیاهی با مقطع مرکب ارائه شد. نتایج پژوهش نشان داد توافق خوبی بین عمق آب‌شستگی مشاهده شده و عمق آب‌شستگی پیش‌بینی شده توسط رابطه پیشنهادی وجود دارد. برای کارایی رابطه رگرسیونی چندمتغیره غیرخطی ارائه شده، از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد. برای رابطه رگرسیونی ارائه شده، ضریب همبستگی ۰/۹۴ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۷۹ سانتی‌متر به دست آمد. همچنین، آنالیز حساسیت نشان داد که پارامتر عمق نسبی آب‌شستگی، d_s/y_1 ، بیشترین حساسیت را نسبت به پارامتر نسبت دبی انقباض، M، دارد.

منابع

1. Carstens M. R. 1966. Similarity laws for localized scour. *Journal of the Hydraulics Division*. 92(3):13-36.
2. Dey S. and Barbhuiya A. K. 2005. Time variation of scour at abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131(1):11-23.
3. Gill M. A. 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. *Journal of the Hydraulics Division*. 98(HY9):1587-1602.
4. Jain S. C. 1981. Maximum clear-water scour around circular piers. *Journal of the Hydraulics Division*. 117(5):611-626.
5. Kandasamy J. K. 1989. Abutment scour. Report No. 458. School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
6. Kindsvater C. E. and Carter R. W. 1955. Tranquil flow through open-channel constrictions. *Transactions, ASCE, New York*. 955-1005.
7. Kwan F. 1984. Study of abutment scour. Report No. 328, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

