

بررسی آبشستگی گروه پایه‌های پل در زوایای مختلف با استفاده از مدل ریاضی و تحلیل

رگرسیون

رضا فرزاد^۱، ابراهیم نوحانی^{۲*}، علی افروس^۳، حسن کیامنش^۴

(۱) گروه مهندسی عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

(۲) استادیار گروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

(۳) استادیار گروه مهندسی آب، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

(۴) استادیار گروه عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

*نویسنده مسئول: Nohani_e@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹

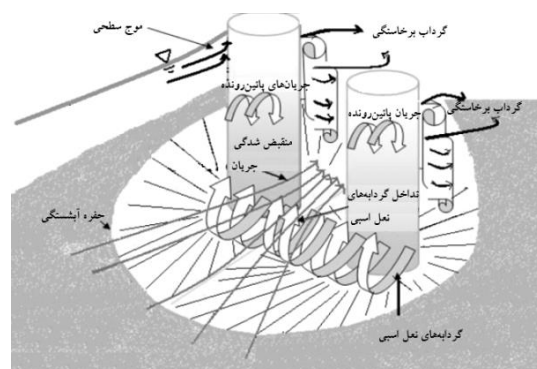
چکیده

با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکالی مدرن بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به پل‌های در زوایای مختلف اشاره کرد. پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند. یکی از عوامل عمده تخریب پل‌ها، آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل می‌باشد. آب‌شستگی به فرم‌های مختلف، پایداری سازه‌های هیدرولیکی را مورد تهدید و فرسایش قرار می‌دهد. همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان به دلیل در نظرنگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی تخریب می‌شوند. در این تحقیق به شبیه‌سازی عددی آب‌شستگی در گروه‌های ۳ و ۴ پایه پل در زوایای صفر، ۱۰، و ۱۵ درجه و استفاده از دبی و قطر ثابت پایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Flow3D پرداخته می‌شود و تحلیل رگرسیون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دادند که با افزایش شیب پایه‌ها از درجه صفر به سمت زاویه ۱۵ درجه میزان آب‌شستگی کاهش می‌یابد. همچنین آب‌شستگی در اطراف بالادست پایه‌ها بیش‌تر اتفاق می‌افتد. حداکثر آب‌شستگی در اطراف پایه‌های ابتدایی گزارش شده است. این تحقیق تایید می‌کند که شیب پایه‌های استوانه‌ای پل نسبت به خط قائم، به‌طور مستقیم بر آب‌شستگی حول پایه‌های پل تاثیر می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، پایه‌پل، رگرسیون، Flow-3D.

مقدمه

امروزه پدیده آب‌شستگی از مسائل مهم در علم مهندسی رودخانه و مهندسی سواحل است. فرارگیری سازه‌های مختلف در مسیر جریان رودخانه‌ها مستلزم تعبیه پایه‌هایی در این مناطق است که عملاً این پایه‌ها در معرض پدیده آب‌شستگی قرار خواهند داشت. تعیین عمق آب‌شستگی از این جهت دارای اهمیت می‌باشد که ۱- بیانگر میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و ۲- در طراحی ابعاد فونداسیون سازه‌هایی که در مسیر جریان آب قرار دارند نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند (روشنگر و همکاران، ۱۳۹۷). در اثر آب‌شستگی حفره‌ای در اطراف پایه پل شکل گرفته که به تدریج با توسعه آن باعث ناپایداری سازه و در نهایت تخریب آن در یک سیلاب که نقش آن‌ها برای حمل و نقل و امداد رسانی به مناطق آسیب دیده پر اهمیت تر می‌شود، خواهد شد. در اثر برخورد آب به پایه پل، کاهش فشار از سطح آزاد جریان به سمت بستر رخ داده و جریان‌های رو به پایین ایجاد می‌شود. این جریان‌ها رو به پایین پس از برخورد به بستر با جریان اصلی ترکیب شده و گرداب نعل اسبی را به وجود می‌آورد. گرداب‌های نعل اسبی بیش‌تر در جلو پایه پل فعالیت دارند. گرداب برخاستگی در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل ایجاد می‌شوند. این نوع سیستم گردابی مانند یک گردباد عمل می‌کند و رسوبات را از کف به سمت بالا حرکت می‌دهد. به عبارت دیگر جهت حرکت این سیستم گردابی رو به بالا است. بررسی‌ها نشان می‌دهد گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای را در ایجاد حفره آب‌شستگی اطراف پایه پل دارند (Melville and Sutherland, 1988).



شکل ۱: الگوی جریان پیرامون پایه پل و پل قدیم دزفول (فرزاد، ۱۳۹۵)

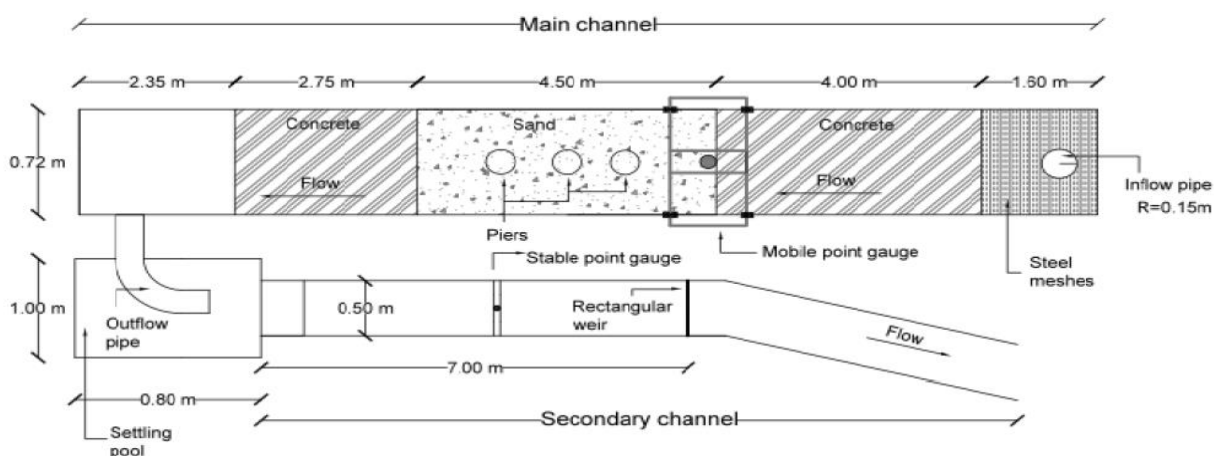
پرچمی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی تاثیر زاویه برخورد جریان و ارتفاع قرارگیری صفحه مستغرق محدب-تخت بر کاهش آب‌شستگی پایه پل پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین مقدار کاهش عمق آب‌شستگی نسبت به پایه بدون محافظ مربوط به زاویه ۲۰ درجه و ارتفاع روی بستر صفر برابر ۸۷/۵ درصد می‌باشد. مظلوم خراسانی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی اثر هم‌زمان صفحات مستغرق و شکاف بر میزان آب‌شستگی پایه پل پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که در صورت استفاده از پایه شکاف‌دار تنها عمق آب‌شستگی نسبت به پایه شاهد ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. اما زمانی که از صفحات و شکاف به صورت هم‌زمان استفاده شود، میزان کاهش آب‌شستگی می‌تواند خیلی بیش‌تر شود. عرب و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی اثر آستانه بر

کاهش آبشستگی اطراف پایه پل در شرایط جریان سیلابی پرداختند و آن‌ها دریافتند که در حالت سیلابی در شرایط آستانه چسبیده به پایه در پایین‌دست، عمق آبشستگی حدود ۲۵ درصد و حجم آبشستگی حدود ۴۸ درصد کاهش می‌یابد. رحیمی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر تجمع اجسام شناور بر آبشستگی موضعی پایه پل پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تجمع اجسام شناور در اطراف پایه پل حدود ۹۰ درصد آبشستگی را افزایش می‌دهد. Hosseini و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی بیشینه عمق آبشستگی حول تکیه گاه قائم، دیوار باله‌ای و نیم‌دایروی به صورت آزمایشگاهی با ۱۴۰۰ داده پرداختند. نتایج نشان داد که ۷۰ تا ۹۰ درصد از آبشستگی در همان زمان ۲۰ درصد اولیه اتفاق می‌افتند. حسینی و همکاران (۱۳۹۳) با شبیه‌سازی سه بعدی حفره آبشستگی اطراف تکیه گاه پل با دیواره قائم با نرم‌افزار FLOW-3D به بررسی بهترین مدل آشفتنگی در تعیین مقدار عمق میانگین جریان و مقدار بیشینه عمق آبشستگی و محل وقوع آن پرداختند. نتایج کار آن‌ها حاکی از آن بود که مدل مذکور، موارد فوق را با دقت خوبی در قیاس با نتایج داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. امروزه با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال گوناگونی بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به پل‌ها با گروه پایه کج اشاره کرد. فرآیند آبشستگی در حضور گروه پایه تحت تاثیر عامل تقویت کننده در پایه جلویی که باعث افزایش عمق آبشستگی در مجاورت آن می‌گردد و عامل حفاظ بودن که منجر به کاهش سرعت موثر و عمق آبشستگی برای پایه پایین‌دست می‌شود، می‌باشد. مقایسه انجام شده در خصوص تاثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه پایه کج نشان داد که مقدار آبشستگی در گروه پایه کج از حالت تک پایه بیش‌تر بوده که این موضوع به دلیل تاثیر توام دو پایه و نیز کج شدن آن به سمت بالادست می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب پایه‌ها بر روی پی که در زیر بستر و بالاتر از حداکثر عمق آبشستگی به ازای تک پایه قرار دارد، مقدار حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (اسماعیلی‌ورکی و همکاران، ۱۳۹۳). حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۰)، الگوی جریان اطراف پایه‌های با مقاطع دایره، دوکی، بیضی، مستطیلی، مربعی و مستطیلی گرد گوشه را به صورت سه بعدی با نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی کردند. مقایسه نتایج حاکی از آن است که مقطع دوکی و بیضی بهترین نوع مقطع در کاهش تنش برشی و در نتیجه کاهش آبشستگی اطراف پایه‌های پل هستند.

مواد و روش‌ها

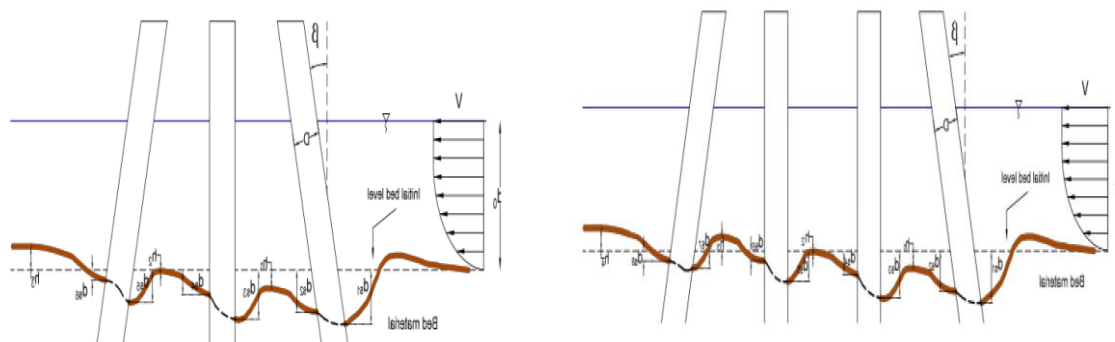
در این تحقیق، از داده‌های رساله کارشناسی ارشد Ozalp (۲۰۱۳) که در لابراتوار هیدرولیک در بخش مهندسی راه و ساختمان در دانشگاه فنی خاورمیانه آنکارا انجام شده است، استفاده گردید. در شکل ۲ ابعاد فلوم مشخص شده است. الگوی جریان و وضعیت آبشستگی در اطراف ۲ گروه از پایه‌های پل، گروه ۳ پایه و ۴ پایه با استفاده از ۳ زاویه شیب متفاوت صفر، ۱۰ و ۱۵ درجه با دبی و عمق جریان ثابت به مدت ۲۴ ساعت مورد ارزیابی، واسنجی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D

قرار گرفته است. همچنین جهت ارزیابی رگرسیون از معادلات مربوطه استفاده و به محاسبات ریاضی پرداخته می‌شود. کانال آزمایش شامل: ۵ قسمت لوله ورودی، کانال اصلی، استخر تسویه، لوله خروجی و کانال ثانویه می‌باشد.



شکل ۲: پلان کانال آزمایش

شکل قرارگیری پایه‌ها در این تحقیق براساس شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳: قرارگیری پایه‌ها در گروه ۳ و ۴ پایه

مواد بستر به شرح جدول (۱) می‌باشد. جدول زیر مقادیر سرعت بحرانی را در مقابل تخلیه اندازه‌گیری شده و مقادیر عمق جریان را به منظور بررسی شرایط جریان نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود، انحراف معیار هندسی (σ_g) عددی کوچکتر از ۱/۳ است و توزیع رسوبات به صورت یکنواخت برای این مقدار تعریف می‌شود. Kocabişik و Yanmaz (۲۰۰۲) اظهار داشتند که وقتی $\sigma_g < 1/3$ باشد، ماده بستر یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱: ویژگی مواد بستر

دانه‌بندی	D10	D15	D50	D60	D84.1	d_m
قطر (میلی‌متر)	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۸۸	۰/۹۲	۱/۱۳	۰/۹۵

مدل Flow-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات می‌باشد. این مدل توانایی بسیار بالایی در شبیه‌سازی جریان آب، انتقال رسوب و آبشستگی دارد و مدل مناسبی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی می‌باشد. استفاده از روش VOF در

پیش‌بینی سطح سیال و ترکیب آن با روش FAVOR در تشخیص مرزهای صلب و همچنین استفاده از شبکه حل ساده مکعب مستطیلی از ویژگی‌های این مدل هستند که آن را از مدل‌های مشابه متمایز می‌کند (ساهی و همکاران، ۱۳۹۵).

به‌طور کلی معادله پیوستگی جرم را می‌توان به صورت ذیل بیان نمود:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad \text{رابطه ۱:}$$

که V_f کسر حجمی جریان، ρ دانسیته سیال، R_{DIF} عبارت بخش آشفته‌گی و R_{SOR} منبع جرم می‌باشند. اجزا سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) یا (r, θ, z) تعریف می‌شوند. A_x ، A_y و A_z برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهات x و y و z است و مقدار ضریب R بستگی به نوع سیستم مختصات دارد. در شرایطی که مختصات استوانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد در آن صورت مشتقات y باید به مشتقات قطبی مطابق رابطه ذیل تبدیل شوند:

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad \text{رابطه ۲:}$$

که این تبدیل به نوبه خود بایستی با استفاده از معادله ذیل انجام پذیرد

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{r_m}{r} \frac{\partial}{\partial y} \quad \text{رابطه ۳:}$$

به طوری که $y = r_m \theta$ و r_m برابر شعاع مرجع ثابت است.

انتقالی که با معادله بالا نشان داده شده آسان‌تر بوده است. بدین دلیل که برای انجام آن فقط ضرب $R = r_m / r$ روی هر مشتق y در معادلات کارتزینی انجام می‌شود. در مختصات کارتزین R برابر ۱ و \mathcal{N} برابر صفر است. در مختصات استوانه‌ای \mathcal{N} برابر ۱ است.

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y}(v_\rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) + \mathcal{N} \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad \text{رابطه ۴:}$$

ضریب θ_p برابر $C_p \mu / p$ است که μ برابر ضریب پخش ممنتوم (لزجت) و C_p به عنوان یک عدد ثابت بوده که معکوس آن مربوط به عدد آشفته‌گی اشمیت است. این نوع پخش جرم تنها برای فرایندهای اختلاط آشفته‌گی در سیالاتی که دارای گرایان غیریکنواخت چگالی هستند، کاربرد دارند. عبارت آخری در سمت راست معادله پیوستگی جرم (R_{SOR}) مربوط به دانسیته است. سیالات غیر قابل تراکم، ρ در معادله پیوستگی جرم ثابت بوده و رابطه (۱) را می‌توان به صورت ذیل ساده‌سازی نمود:

$$\frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) + \mathcal{N} \frac{\rho u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad \text{رابطه ۵:}$$

به منظور صحت‌سنجی نرم‌افزار، با استفاده از رابطه (۶) به مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است و درصد خطا نرم‌افزار معین شده است. برای مثال در جدول زیر میزان خطای نرم‌افزار Flow-3D برای ۲ آزمایش محاسبه شده است. با توجه به جدول (۲) میزان خطای نرم‌افزار حدود ۵ درصد بوده که در محدوده مجاز می‌باشد.

$$\text{رابطه ۶: } 100 * [\text{مقدار آزمایشگاهی} / (\text{مقدار شبیه سازی} - \text{مقدار آزمایشگاهی})] = \text{درصد خطا}$$

جدول ۲: میزان خطا نرم‌افزار برای زاویه قرارگیری پایه‌ها بصورت کاملاً قائم (۰ درجه)

شماره	دبی (لیتر بر ثانیه)	قطر (میلی‌متر)	عمق جریان	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱*	۴/۶۹۸	۵۰	۳۷	۲۸/۵	۵/۷	۴/۷۵	-۵/۷	۵/۷	۰
۲*	۷/۲۳۹	۵۰	۴۷	۴۷/۵	۲۳/۷	۲۸/۵	-۰/۹۵	۱۸/۰۵	-۱/۹
۱	۴/۶۹۸	۵۰	۳۷	۳۰	۶	۵	-۶	۶	۰
۲	۷/۲۳۹	۵۰	۴۷	۵۰	۲۵	۳۰	۱	۱۹	-۲

رگرسیون

معادله (۷) را می‌توان به عنوان یک معادله آبستگي مطرح نمود.

$$\frac{d_s}{D} = c_0 \left(\frac{d_0}{D}\right)^{c_2} (Fr)^{c_2} \quad \text{رابطه ۷:}$$

در رابطه (۷)، c_0 ، c_1 و c_2 مقادیر ثابتی هستند که به وسیله تحلیل رگرسیون مضاعف تعیین می‌شوند.

تحلیل ابعادی برای عمق آبستگي در بالادست اولین پایه (۱) بیان می‌شود و تعیین می‌شود که عمق آبستگي ds/D تابعی از عمق جریان یعنی d_0/D ، شدت جریان v/v_c و شیب زاویه عمودی β است.

$$\frac{d_s}{D} \equiv f\left(\frac{d_0}{D}, \frac{V}{V_c}, \beta\right) \quad \text{رابطه ۸:}$$

متغیر شدت جریان V/V_c در معادلات به جای عدد فرود به کار می‌رود، زیرا دامنه عدد فرود خیلی کوچک است. یک متغیر اضافی در این مورد وجود دارد که متغیر شیب زاویه عمودی است. در این تحقیق اساساً تاثیر شیب زاویه عمودی پایه‌ها پل مورد بحث می‌باشند، بنابراین معادلات آبستگي پایه‌ها شامل آن پارامتر هم می‌شود.

$$\frac{d_s}{D} = c_0 \left(\frac{d_0}{D}\right)^{c_1} \left(\frac{V}{V_c}\right)^{c_2} (\alpha)^{c_3} \quad \text{رابطه ۹:}$$

که $\alpha = \beta - 90$ بر حسب رادیان می‌شود.

با لگاریتم گرفتن از هر دو طرف معادله (۹)، معادله زیر به دست می‌آید.

$$\ln\left(\frac{d_s}{D}\right) \equiv \ln(c_0) + c_1 \ln\left(\frac{d_0}{D}\right) + c_2 \ln\left(\frac{V}{V_c}\right) + c_3 \ln(\alpha) \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

ماتریس زیر برای به دست آوردن فرمول کلی تحلیل رگرسیون مضاعف با جایگزین کردن $\ln(d/D)$ با Y ، $X_1 \ln(d_0/D)$ ، $\ln(V/V_c)$ با X_2 ، $\ln(\alpha)$ با X_3 .

N تعداد نقاط داده‌ها می‌باشد. از آنجا که ۴ مجهول یعنی c_0, c_1, c_2, c_3 وجود دارد، ماتریس 4×4 نوشته می‌شود.

$$\begin{bmatrix} N & \sum X_1 & \sum X_2 & \sum X_3 & c_0 \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_1 X_3 & c_1 \\ \sum X_2 & \sum X_2 X_1 & \sum X_2^2 & \sum X_2 X_3 & c_2 \\ \sum X_3 & \sum X_3 X_1 & \sum X_3 X_2 & \sum X_3^2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \sum X_3 Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \sum X_3 Y \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

ds/D ، d_0/D ، V/V_c و داده α در ستون ۱ از ۴ قرار می‌گیرند. آنگاه الگوریتم‌های طبیعی آن‌ها به ستون‌های ۵ از ۸ نوشته

می‌شود. به همین روش $X_1 X_2$ ، $X_1 X_3$ ، $X_2 Y$ ، $X_3 Y$ ، $X_1 Y$ ، $X_2 X_3$ و مقادیر $X_2 X_3$ محاسبه می‌شوند و در ستون

بعدی قرار می‌گیرند. بالاخره اینک معادلات با استفاده از جبر ماتریسی حل می‌شوند و ضرایب محاسبه می‌شوند. معادلات

آبستگی پایه‌ها در زیر نشان داده شده‌اند.

$$\frac{d_s}{D} = 1.136 \left(\frac{d_0}{D}\right)^{0.250} \left(\frac{V}{V_c}\right)^{1.086} (\alpha)^{1.136} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$r=0.99$ and $r_2=0.97$

$$\frac{d_s}{D} = 1.192 \left(\frac{d_0}{D}\right)^{0.251} \left(\frac{V}{V_c}\right)^{0.909} (\alpha)^{0.785} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$r=0.99$ and $r_2=0.97$

همانطور که پایه‌های پایین دست تاثیری روی آبستگی پایه‌های بالادست ندارند، همه داده‌ها با هم ترکیب می‌شوند و یک

تحلیل رگرسیون مضاعف کلی برای همه داده‌ها انجام می‌شود.

$$\frac{d_s}{D} = 1.163 \left(\frac{d_0}{D}\right)^{0.250} \left(\frac{V}{V_c}\right)^{1.047} (\alpha)^{0.828} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$r=0.97$ and $r_2=0.95$

ضریب همبستگی r با استفاده از معادله (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$r = \pm \sqrt{1 - \frac{\sum \left(\left(\frac{d_s}{d}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{d_s}{D}\right)_{\text{comp}} \right)^2}{\sum \left(\left(\frac{d_s}{d}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{d_s}{D}\right)_{\text{ave}} \right)^2}} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

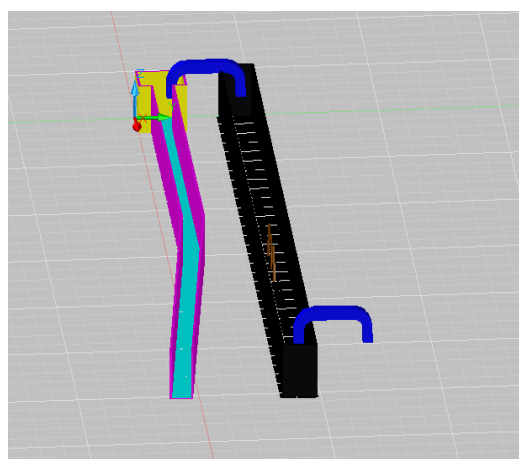
در جدول (۳) نتایج مربوط به محاسبات حاصل از رگرسیون به طور مختصر بیان می‌شود.

جدول (۳): محاسبات رگرسیونی

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
D_s/D^*	D_0/D	v/v_c	$\beta(\text{deg})$	$\alpha(\text{Deg})$	$\alpha(\text{rad})$	Y	X_1	X_2	X_3
۱	۰/۹۴	۰/۶۸۶	۰	۹۰	۱/۵۷۱	۰	-۰/۰۶۲	-۰/۳۷۶	۰/۴۵۲
۰/۹	۰/۹۴	۰/۶۸۶	۱۰	۸۰	۱/۳۹۶	-۰/۱۰۵	-۰/۰۶۲	-۰/۳۷۶	۰/۳۳۴
۰/۸۶	۰/۹۴	۰/۶۸۶	۱۵	۷۵	۱/۳۰۹	-۰/۱۵۱	-۰/۰۶۲	-۰/۳۷۶	۰/۲۶۹
۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
X_{12}	X_{1X2}	X_{1X3}	X_{22}	X_{2X3}	X_{32}	X_{1Y}	X_{2Y}	X_{3Y}	D_s/D^{**}
۰/۰۰۴	۰/۰۲۳	-۰/۰۲۸	۰/۱۴۲	-۰/۱۷۰	۰/۲۰۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۶۰
۰/۰۰۴	۰/۰۲۳	-۰/۰۲۱	۰/۱۴۲	-۰/۱۲۶	۰/۱۱۱	۰/۰۰۷	۰/۰۴	-۰/۰۳۵	۰/۹۵۶
۰/۰۰۴	۰/۰۲۳	-۰/۰۱۷	۰/۱۴۲	-۰/۱۰۱	۰/۰۷۳	۰/۰۰۹	۰/۰۵۷	-۰/۰۴۱	۰/۹۰۵

نتایج و بحث

در این تحقیق به بررسی اثر شیب زاویه پایه‌های پل در گروه ۳ پایه و ۴ پایه و شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار Flow-3D پرداخته می‌شود و نتایج شبیه‌سازی و صحت‌سنجی آن‌ها بیان می‌گردد. در این تحقیق قطر پایه‌های پل ثابت و برابر ۵۰ میلی‌متر و فاصله آن‌ها از یکدیگر برابر ۴۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. دبی مورد استفاده پس از محاسبه برابر ۴/۶۹۸ لیتر بر ثانیه و عمق جریان نیز برابر ۳۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از معادلات رگرسیونی به ارزیابی رگرسیون پرداخته شد. همچنین برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار FLOW-3D10.0.1 استفاده شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار Autocad2007 مدل فلوم طراحی شده و سپس به فرمت STL درآمد و در نرم‌افزار FLOW-3D فایل ساخته شد STL فراخوانی شد.



شکل ۴: مدل شبیه‌سازی شده فلوم

در این تحقیق آب‌شستگی پایه پل در مجاری اصلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. فاصله پایه‌ها در این تحقیق ثابت در نظر گرفته شده است و پایه‌های پل به صورت تک ردیف و پشت سر هم نصب و کارگزاری شده‌اند. در ادامه به بررسی میزان آب‌شستگی در بالادست و پایین‌دست پایه‌های پل پرداخته می‌شود. آب‌شستگی در بالادست معمولاً بیشتر از آب‌شستگی در پایین‌دست

می‌باشد و همچنین هرچه از پایه‌های اول به سمت پایه‌های بعدی حرکت می‌شود، عمق آبشستگی در اطراف این پایه‌ها کم‌تر شده و شاهد افزایش رسوب‌گذاری در اطراف پایه‌های پایین‌دست خواهیم بود. در جدول (۳) تعاریفی که جهت ارائه مطالب مورد نیاز می‌باشد آورده شده است.

جدول ۳- تعاریف عمق آبشستگی

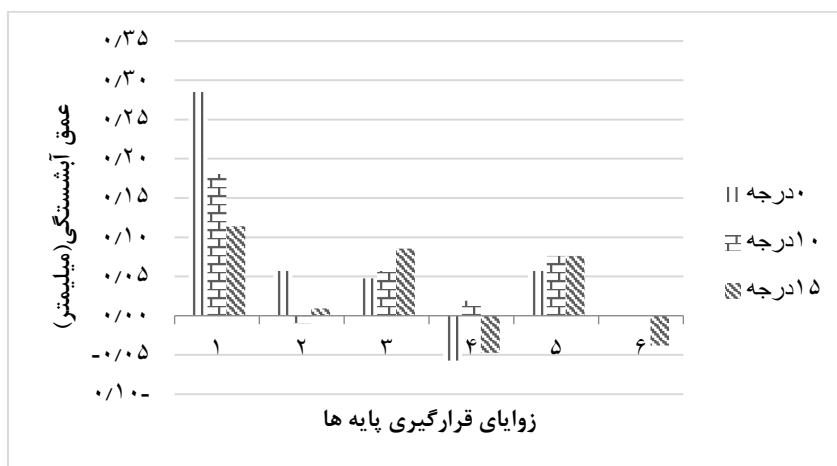
شماره	توضیحات
۱	عمق آبشستگی در بالادست پایه ۱
۲	عمق آبشستگی در پایین‌دست پایه ۱
۳	عمق آبشستگی در بالادست پایه ۲
۴	عمق آبشستگی در پایین‌دست پایه ۲
۵	عمق آبشستگی در بالادست پایه ۳
۶	عمق آبشستگی در پایین‌دست پایه ۳
۷	عمق آبشستگی در بالادست پایه ۴
۸	عمق آبشستگی در پایین‌دست پایه ۴

حرکت مواد بستر موقعی شروع می‌شود که شدت جریان به یک نقطه خاص می‌رسد. ذرات قسمت بالایی پایه‌ها اولین چیزی هستند که از بستر برداشته می‌شوند که با استفاده از یک ساختار مارپیچی کوچک صورت می‌گیرد و درست در پایین‌دست، رسوبات کوچک پایه‌ها تشکیل می‌شود. مشاهده می‌شود که تشکیل فرسایش در ۵ دقیقه نخست خیلی سریع است. رسوبات بزرگی در این دوره تشکیل می‌شود. ذرات رسوب بستر را بلند کرده و جریان پایینی با سرعت سریع‌تر از سرعت متوسط برای همه ذرات دیگر حرکت می‌کند. بعد از چند دقیقه ذرات رسوب که جریان پایین‌دست اطراف پایه‌ها را حمل کرده، بین پایه‌ها انباشته می‌شود. بنابراین رسوب‌گذاری در این ناحیه‌ها مشاهده می‌شود. زمانی که حفره‌های آبشستگی با توجه به زمان بزرگ می‌شوند، گرداب‌های نعل اسبی شدت و مقاومت خود را از دست می‌دهند و سرعت فرسایشی کاهش می‌یابد. از این رو قابل پیش‌بینی است، حفره‌های آبشستگی در اطراف هر پایه به شکل متقارن با زمان پیشرفت می‌کند و بیش از ۸۰ درصد از تشکیل حفره آبشستگی در ۲ ساعت رخ می‌دهد.

جدول ۴: عمق آبشستگی

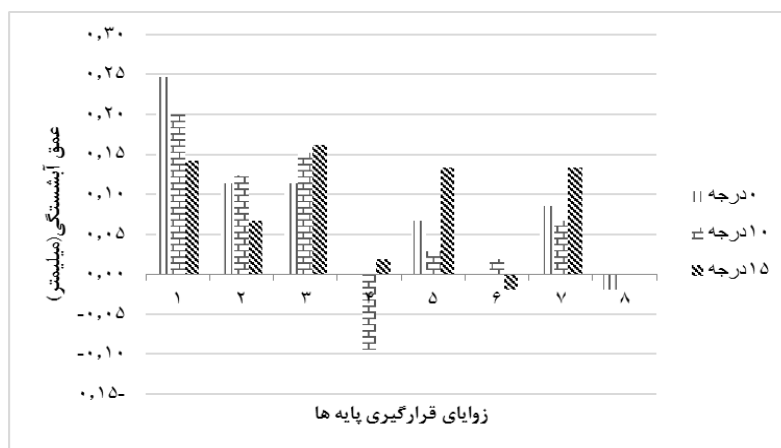
زاویه (درجه)	تعداد پایه‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	پایه ۳	۲۸/۵	۵/۷	۴/۷۵	-۵/۷	۵/۷	۰	-	-
	پایه ۴	۲۴/۷	۱۱/۴	۱۱/۴	۰	۶/۶۵	۰	۸/۵۵	-۱/۹
۱۰	پایه ۳	۱۸/۰۵	-۰/۹۵	۵/۷	۱/۹	۷/۶	۰	-	-
	پایه ۴	۱۹/۹۵	۱۲/۳۵	۱۵/۲۰	-۹/۵	۲/۸۵	۱/۹	۶/۶۵	۰
۱۵	پایه ۳	۱۱/۴	۰/۹۵	۸/۵۵	-۴/۷۵	۷/۶	-۳/۸	-	-
	پایه ۴	۱۴/۲۵	۶/۶۵	۱۶/۱۵	۱/۹	۱۳/۳	-۱/۹	۱۳/۳	۰

جدول (۴) عمق آبشستگی محاسبه شده توسط نرم افزار را نشان می دهد. همان گونه که مشهود می باشد تغییر زاویه قرارگیری پل نقش عمده ای در کاهش آبشستگی اطراف پایه های پل دارد. زمانی که زاویه محور پل با جهت جریان افزایش پیدا می کند و به ۱۵ درجه می رسد عمق آبشستگی کاهش پیدا می کند. قابل پیش بینی است که زاویه قرارگیری به عنوان یک پارامتر مهم می تواند باعث کاهش گرادیان فشار و نهایتاً کاهش گرداب های نعل اسبی شود و عمق آبشستگی را کاهش دهد.



شکل ۵: نمودار عمق آبشستگی - زاویه برای عمق جریان ۳۷ میلی متر در گروه ۳ پایه پل

شکل (۵) نمودار تغییرات عمق آبشستگی با توجه به زاوای قرارگیری پایه ها در گروه ۳ پایه را نشان می دهد. همان گونه که این شکل نشان می دهد، بیشترین عمق آبشستگی در زاویه صفر درجه مربوط به بالادست پایه (۱) به مقدار ۲۸/۵ میلی متر و بیشترین عمق رسوبگذاری مربوط به پایین دست پایه دوم (۲) به میزان ۵/۷ میلی متر می باشد. همچنین بیشترین عمق آبشستگی برای زاویه ۱۰ درجه مربوط به بالادست پایه (۱) به مقدار ۱۸/۰۵ میلی متر و بیشترین عمق رسوبگذاری مربوط به پایین دست پایه اول (۲) به میزان ۰/۹۵ میلی متر می باشد. بیشترین عمق آبشستگی برای زاویه ۱۵ درجه نیز مربوط به بالادست پایه (۱) به مقدار ۱۱/۴ میلی متر و بیشترین عمق رسوبگذاری مربوط به پایین دست پایه دوم (۴) به میزان ۴/۷۵ میلی متر می باشد.



شکل ۶: نمودار عمق آبشستگی - زاویه برای عمق جریان ۳۷ میلی متر در گروه ۴ پایه پل

شکل (۶) نمودار تغییرات عمق آبشستگی با توجه به زوایای قرارگیری پایه‌ها در گروه ۴ پایه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌ترین عمق آبشستگی در زاویه صفر درجه مربوط به بالادست پایه (۱) به مقدار ۲۴/۷ میلی‌متر و بیش‌ترین عمق رسوبگذاری مربوط به پایین‌دست پایه چهارم (۸) به میزان ۱/۹ میلی‌متر می‌باشد. همچنین بیش‌ترین عمق آبشستگی در زاویه ۱۰ درجه مربوط به بالادست پایه (۱) به مقدار ۱۹/۹۵ میلی‌متر و بیش‌ترین عمق رسوبگذاری مربوط به پایین‌دست پایه دوم (۴) به میزان ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد. بیش‌ترین عمق آبشستگی نیز برای زاویه ۱۵ درجه مربوط به بالادست پایه دوم (۳) به مقدار ۱۶/۱۵ میلی‌متر و بیش‌ترین عمق رسوبگذاری مربوط به پایین‌دست پایه سوم (۶) به میزان ۱/۹ میلی‌متر می‌باشد (فرزاد، ۱۳۹۵). بنابراین با توجه به شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که وقتی پایه‌ها عمود بر جریان در نظر گرفته شوند گرداب‌های بیش‌تری شکل می‌گیرد که این امر موجب می‌شود تا عمق آبشستگی افزایش یابد که متناسب با این آبشستگی‌ها، شاهد حمل رسوبات توسط سیال و رسوبگذاری حول پایه‌های پایین‌دست پل خواهیم بود. این درحالی است که اگر این موضوع را در یک حوضه آبریز که منتهی به یک سد باشد در نظر بگیریم خواهیم دید که مقدار زیادی رسوب، توسط جریان وارد حوضه آبریز می‌شود و نهایتاً در پشت سد رسوبگذاری شکل می‌گیرد که باعث کاهش عمر مفید سد خواهد شد. استفاده از پایه با زاویه متناسب باعث کاهش میزان آبشستگی و همچنین کاهش رسوبگذاری در اطراف دیگر پایه‌ها می‌شود.

نتیجه‌گیری

با افزایش زاویه پایه‌ها از صفر به ۱۵ درجه کاهش مقدار آبشستگی مشاهده می‌شود. دلیل این امر کاهش عمودی زاویه برخورد جریان سیال با پایه‌ها و کاهش گرادیان فشار و نهایتاً کاهش قطر گرداب‌های نعل اسبی می‌باشد. آبشستگی در بالادست پایه‌ها به دلیل سرعت اولیه جریان بیش‌تر است. همچنین آبشستگی در اطراف پایه‌های ابتدایی بیش‌ترین مقدار و در اطراف پایه انتهایی کم‌ترین مقدار را دارد ولی در این قسمت رسوبگذاری مشاهده می‌شود. زمانی که زاویه افزایش می‌یابد، آبشستگی در اطراف یک پایه مشخص کاهش می‌یابد. بیش‌ترین کاهش در عمق آبشستگی در اطراف اولین پایه روی می‌دهد. با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی و ساختاری، طراحی و ساخت پایه‌های استوانه‌ای شکل پل، می‌توان زاویه ۱۰ درجه را عملی‌تر از ۱۵ درجه جهت ساخت پیشنهاد کرد.

منابع

- اسماعیلی‌ورکی، م.، موسی‌پور، س. و حاتم‌جعفری، م. (۱۳۹۳). بررسی آزمایشگاهی عوامل آبشستگی پایه پل تحت فاکتورهای هیدرولیکی و ژئومتری. نشریه تحقیقات آب، دوره ۱۴۱، شماره ۱۳، ص ۷-۱۵.
- پرچی، ل.، اصغری‌پری، ا. و شفاعی‌بجستان، م. (۱۳۹۶). تاثیر زاویه برخورد جریان و ارتفاع قرارگیری صفحه مستغرق- محذب بر کاهش آبشستگی پایه پل. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۴، شماره ۱۰، ص ۴۴۴-۴۵۳.

حسن زاده، ی.، حکیم زاده، ح. و عیاری، ش. (۱۳۹۰). بررسی شکل پایه‌های پل روی الگوی جریان اطراف آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Fluent. نشریه تحقیقات منابع آب، دوره ۷، شماره ۴، ص ۹۵-۱۰۵.

حسینی، ه.، هاتف، و. و طالب‌بیدختی، ن. (۱۳۹۳). شبیه‌سازی سه بعدی حفره آبشستگی اطراف تکیه گاه پل با دیواره قائم با نرم‌افزار Flow-3D. نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲، شماره ۳۰، ص ۱۱۷-۱۲۳.

رحیمی، ا.، قادری، ک.، رحیم پور، م. و احمدی، م.م. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی تاثیر تجمع اجسام شناور بر آبشستگی موضعی پایه پل. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۶، شماره ۱۰، ص ۷۹۶-۷۸۶.

روشنگر، ک.، قاسم‌پور، ر. و ناقیبیان، م. (۱۳۹۷). بررسی مقایسه‌ای پارامترهای هیدرولیکی تاثیرگذار بر آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای چسبیده و دانه‌ای با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۶، شماره ۱۲، ص ۱۴۸۵-۱۴۷۵.

ساهی، س.، نوحانی، ا. و افروس، ا. (۱۳۹۵). محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان و عمق روی سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3d. شباک، دوره ۲، شماره ۳، ص ۱-۹.

عرب، ح.، اسماعیلی، ک.، بهشتی، ع.ا. و اکبرزاده، م.ر. (۱۳۹۵). اثر آستانه بر کاهش آبشستگی اطراف پایه پل در شرایط جریان سیلابی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۱، شماره ۱۱، ص ۶۹-۷۹.

فرزاد، ر. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی آبشستگی در گروه پایه‌های پل در زوایای مختلف و دانه‌بندی متفاوت رسوب با نرم‌افزار Flow-3D، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دی ماه ۱۳۹۵، دزفول، ایران.

مظلوم خراسانی، م.، خدائشناس، س. و اسماعیلی، ک. (۱۳۹۶). بررسی اثر هم‌زمان صفحات مستغرق و شکاف بر میزان آبشستگی پایه پل. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵، جلد ۱۲، ص ۱۱۰۶-۱۰۹۷.

Hosseini, Kh., Karami, H., Hosseinjanzade, H. and Ardeshir, A. (2016). Prediction of time-varying maximum scour depth around short abutment using soft computing methodologies- A comparative study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (5), pp: 2070-2081.

Melville, B.W. and Sutherland A. J. (1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 114 (10), pp: 1210-1226.

Ozalp, M. (2013). Experimental investigation of local scour around bridge pier groups. M.Sc Department of civil engineering .Ankara university.

Yanmaz, A.M. and Kocabiyyık, B. (2002). Risk Assessment of Scour Vulnerable Bridges: A Case Study. 2002 Conference on Water Resources Planning and Management, pp: 1-10.

Investigation of scour of bridge piers group in different angles using mathematical model and regression analysis

Reza Farzad¹, Ebrahim Nohani^{*2}, Ali Afrous³, Hasan Kiamanesh⁴

- 1) Department of Civil Science and Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 2) Assistant professor, Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
- 3) Department of Civil Science and Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
- 4) Assistant professor, Department of civil Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

*Correspondence author: Nohani_e@yahoo.com

Received Data: 2021. 11. 29

Accepted Data: 2022. 07.26

Abstract

With the advancement of technology for design and construction of structures, it has witnessed the construction of bridges with modern forms, including bridges at different angles. Bridges are one of the most important river structures. One of the major causes of bridge collapse is scouring around the bridges. The scouring of various forms of sustainability of hydraulic structures is threatened and erosion. All year round many bridges around the world are damaged due to the role of hydraulic elements. In this research, numerical simulation of scouring in groups 3 and 4 of the bridge at 0, 10, and 15 degrees, and using the flow rate and constant diameter of the foundations using the Flow3D software are considered and the regression analysis is evaluated. . The simulation results indicate that with increasing the slope of the foundations, from 0 to 15 degrees, the scouring rate is reduced, and scouring is high above the base of the base. Also, maximum scouring has been reported around the bases. This research confirms that the slope of the cylindrical bridges of the bridge relative to the straight line directly affects the scouring around the bridges.

Keywords: Bridge Base, Flow3D, Regression, Scouring,