

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی مدل ترکیبی شکاف و طوق در آبستگي اطراف پایه پل

رضا ارشادی فارسانی^{۱*}، موسی رسائی^۲ و احسان دلاوری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

چکیده

یکی از عوامل تخریب پایه‌های پل ایجاد فرسایش در فونداسیون می‌باشد. با گسترش پدیده آبستگي در اطراف پایه پل، سبب تضعیف فونداسیون و تهدیدی برای تخریب کل سازه خواهد شد. لذا در این پژوهش برای کنترل این پدیده از روش‌های ترکیبی شکاف و طوق استفاده شد. ارزیابی به صورت آزمایشگاهی در اطراف پایه پل در شرایط آب زلال انجام گرفت. ابتدا پایه بدون شکاف و طوق (نمونه شاهد)، سپس به روش ترکیبی شکاف و طوق در موقعیت‌های مختلف بررسی و مقایسه شدند. در روش ترکیبی از ادغام طوق در ۲ حالت پایین (روی تراز بستر) و وسط (فاصله بین بستر تا سطح آب) و شکاف با میزان بازشدگی ۲۵٪ (۲۵ درصد قطر پایه)، در ۳ حالت بالا (۱ سانتی‌متر شکاف بالای سطح آب)، وسط و پایین (۱ سانتی‌متر شکاف زیر بستر رسوبی) قرار داده شد. آزمایش‌ها در دو دبی ۱۱/۵ و ۲۳ لیتر بر ثانیه انجام شدند. مدل‌های ترکیبی در حالت‌های مختلف با نمونه شاهد (بدون طوق و شکاف)، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که وجود شکاف و طوق عملکرد بهتری در کاهش آبستگي نسبت به نمونه شاهد دارد. حداکثر عمق آبستگي در حالت شکاف و طوق پایین، ۴/۲ سانتی‌متر می‌باشد که برای نمونه شاهد ۱۱/۲ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین در حالت طوق و شکاف پایین باشد میزان آبستگي ۶۲/۵ درصد کاهش داشته و بیشترین عملکرد را در کنترل آبستگي نشان داد. در نهایت، با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه‌ای برای پیش بینی عمق آبستگي ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: آبستگي موضعی، پایه پل، شکاف، طوق، مدل ترکیبی

مقدمه

زمانی اتفاق می‌افتد که در زمان احداث پل، بستر رودخانه شسته شده و نسبت به بستر طبیعی رودخانه در بالادست، در تراز پایین‌تری قرار بگیرد، یا آبستگي به خاطر انقباض مجرای جریان در محل پل اتفاق افتد (Alabi, 2006). در آبستگي موضعی، در اثر برخورد جریان با پایه‌های پل، حفره‌هایی در پایه‌های پل ایجاد می‌گردد که موجب کاهش مقاومت پایه‌های پل می‌گردد. آبستگي نوع دوم سهم بیشتری از میزان آبستگي پل‌ها را به خود اختصاص می‌دهد و رایج‌تر می‌باشد (نظری، ۱۳۸۱).

وجود پایه‌های پل در مسیر جریان موجب تغییر در الگوی جریان عبوری شده و باعث ایجاد حفره آبستگي در اطراف پایه‌های پل می‌گردد که در صورت عدم کنترل، منجر به شکست پایه‌های پل و نهایتاً خرابی کلی پل می‌گردد (محبوب و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی ۵۰۰ پل در ایالات متحده بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۰ نشان می‌دهد که بیش‌ترین علت شکست پل، سیل و آبستگي بوده است (Wardhana and Haipriono, 2003).

از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌ها آبستگي می‌باشد و به دلیل

از دیرباز تا کنون استفاده از پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین سیستم‌های حمل و نقل در هر کشوری مورد توجه قرار گرفته است (ایرندگانی، ۱۳۹۲). یکی از دلایل شکست پل‌ها ناشی از آبستگي موضعی پایه‌های پل می‌باشد. آبستگي یک پدیده طبیعی است که به موجب آن فرسایش بستر در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی در محل پایه‌های پل و هر مکان دیگری که شدت جریان زیاد باشد به صورت موضعی افزایش می‌یابد (همایون، ۱۳۸۸). آبستگي به دو دسته آبستگي عمومی و موضعی تقسیم می‌شود. آبستگي عمومی

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

(*) نویسنده مسئول: reza.e.f@iau.ac.ir

تا مرز ۹۸ درصد) را نشان می‌دهد. اما مدل SVM با دقت بالاتری عمل می‌کند و خطای نسبی را به کمتر از ۲ درصد کاهش می‌دهد. بنابراین، مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان گزینه‌ای مطمئن برای پیش‌بینی دقیق‌تر آبشستگی در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد. البته ترکیب دو روش در پروژه‌های بزرگ می‌تواند هم دقت پیش‌بینی و هم کارایی محاسباتی را بهبود بخشد.

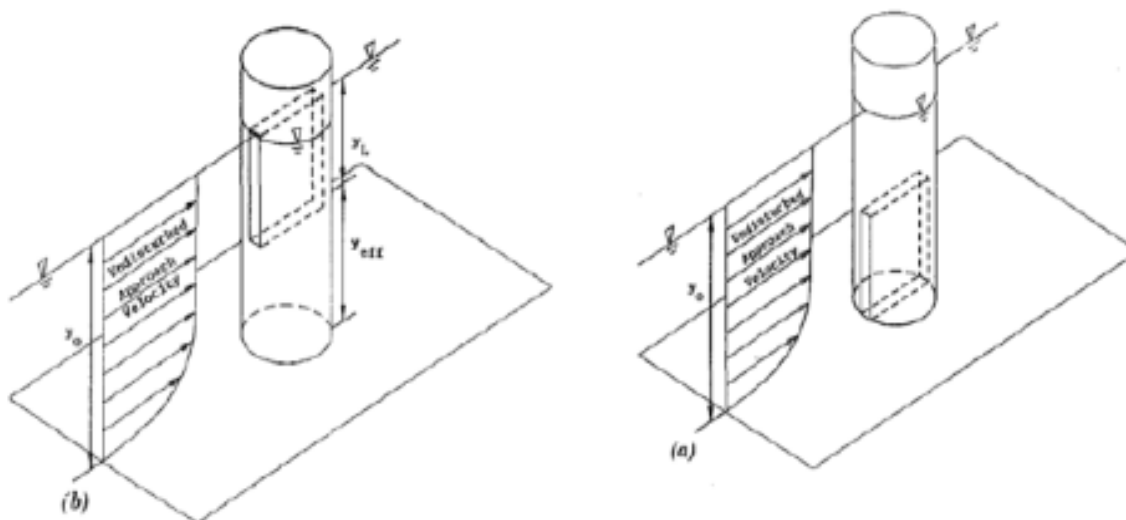
یانسری و همکاران (۱۴۰۳)، به بررسی آزمایشگاهی روش‌های کاهش آبشستگی پایاب حوضچه آرامش پرداختند. مطالعات بر روی سازه بند سنگی ملاتی وطنای واقع در استان گلستان انجام شد. در این پژوهش با استفاده از دو روش، بالا آوردن انتهای کانال و استفاده از صفحات مستغرق به همراه لایه آرمور بلافاصله پس از حوضچه آرامش استفاده شد. به این نتیجه رسیدند که، در روش بالا آوردن انتهای کانال اثر مثبتی بر روی کاهش عمق آبشستگی پایاب حوضچه آرامش دارد. اما در روش دوم استفاده از لایه آرمور با صفحات مستغرق کاهش بیشتری در عمق آبشستگی پایاب حوضچه آرامش را دارد.

چیو، برای اولین بار شکاف (سوراخ درون پایه)، را به عنوان روشی برای پیشگیری و کاهش آبشستگی مطرح کرد. شکل (۱) عملکرد شکاف در نزدیک بستر و سطح آب را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱a) دیده می‌شود، اگر شکاف در نزدیک بستر باشد با ایجاد جهت جریان افقی شدت گراب نعل اسبی که عامل اصلی فرسایش اطراف پایه است را در فاصله‌ای دورتر از پایه منحرف می‌کند که خود سبب کاهش عمق آبشستگی می‌شود. شکل (۱b) وقتی شکاف نزدیک سطح آب باشد با کاهش عمق موثر جریان و گردان فشار، شدت جریان رو به پایین را کاهش می‌دهد. در نتیجه باعث کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه می‌شود (Chiew, 1992).

اهمیت و پیچیدگی آن، بررسی و ارائه راهکارهایی نوین برای کاهش آن ضروری می‌باشد. به طور کلی دو روش اساسی برای کنترل آبشستگی وجود دارد. روش‌های هیدرولیکی و غیر هیدرولیکی می‌باشد. در روش‌های هیدرولیکی با منحرف کردن جریان اطراف پایه و کاهش شدت گرداب‌های ایجاد شده، از پایه در برابر آبشستگی محافظت می‌کند. در روش‌های غیر هیدرولیکی با استفاده از سنگچین، گابیون و ... از بستر در برابر آبشستگی محافظت می‌شود. (Melvill and Sutherland., 1989).

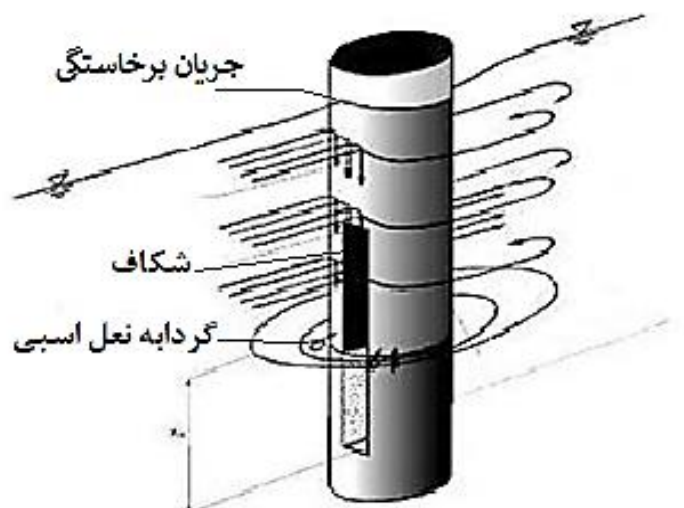
ستوبادی و همکاران (۱۴۰۴)، به پیش‌بینی عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای در بسترهای با خاک چسبنده با استفاده از سه روش ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نرم افزار QNET و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) پرداختند. با مقایسه سه مدل بررسی شده به این نتیجه رسیدند که، روش QNET با بیشترین R^2 (۹۲ درصد) و کمترین خطا (کاهش ۶۲ درصد)، در تمامی روش‌ها به طور نسبی بهتر بوده و دارای مقادیر آماری مطلوب‌تری با دقت قابل توجهی می‌باشد. که این نشان از پیش‌بینی دقیق‌تر و رویکردی نوآورانه و قابل اعتماد برای پیش‌بینی آبشستگی در بسترهای چسبنده ارائه می‌دهد.

نجاتی و همکاران (۱۴۰۴)، به تحلیل مقایسه‌ای آبشستگی پایین دست سرریز مرکب مثلثی- مثلثی با استفاده از روش کلاسیک و مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان پرداختند. عملکرد یک مدل کلاسیک تجربی و یک مدل مبتنی بر هوش مصنوعی از نوع ماشین بردار پشتیبان (SVM) در پیش‌بینی سه پارامتر کلیدی آبشستگی (عمق، محل وقوع و طول کلی حفره آبشستگی) را بررسی کردند. به این نتیجه رسیدند که، مدل کلاسیک در روند کلی آبشستگی میزان خطای آماری بالایی (دامنه خطا بین ۱۳ تا ۲۰ درصد و حداکثر خطا



شکل ۱- (a) شکاف نزدیک بستر (b) شکاف نزدیک سطح آب (چیو، ۱۹۹۲)

می‌گیرد، همگی از عوامل مهم شکاف پایه پل هستند (نوری‌فر و همکاران، ۱۳۹۳). شکل (۲) الگوی جریان در اطراف پایه استوانه‌ای با شکاف را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از شکاف الگوی جریان در اطراف پایه

کاهش آبشستگی پایه‌های پل پرداختند. طوق‌های مورد استفاده در پژوهش آنها مستطیلی و دایره‌ای بودند. نتایج نشان داد طوق‌های مستطیلی با بعدهای ۲ و ۲/۵ برابر قطر پایه به ترتیب ۲۹ و ۴۹ درصد نسبت به شرایط پایه بدون طوق میزان آبشستگی کاهش یافته است. چپو، با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی، تاثیر وجود یک شکاف بر روی پایه پل و همچنین نصب یک طوق در اطراف آن به منظور محافظت پایه‌های پل مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که وجود شکاف با عرض یک چهارم قطر پایه، عمق آبشستگی را تا ۲۱ درصد کاهش می‌دهد (Chiew, 1992).

کومار و همکاران، به بررسی آزمایشگاهی اثرات شکاف و طوق بر روی الگوی آبشستگی اطراف پایه‌های پل دایره‌ای شکل پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که وجود طوق‌های دایره‌ای شکل موجب کاهش آبشستگی در اطراف پایه می‌شود. همچنین توانستند رابطه‌ای برای محاسبه عمق آبشستگی پیشنهاد دهند (Kumar et al., 1999).

شریعتی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی آزمایشگاهی کارکرد باهم طوق و شکاف بر میزان آبشستگی موضعی در پایه پل پرداختند. در مرحله اول کارکرد دو نوع طوق مربعی و دایره‌ای بر روی یک پایه استوانه‌ای را بررسی کردند. سپس با ایجاد شکاف روی پایه ترکیب طوق و شکاف را در میزان آبشستگی را بررسی کردند. به این نتیجه

هدف اصلی استفاده از شکاف بر روی پایه پل، منحرف کردن جریان رو به پایین و کاهش قدرت گرداب نعل اسبی در هنگام برخورد جریان رو به پایین به بستر رودخانه است. طول، عرض و محل قرارگیری شکاف و همچنین طولی از شکاف که در درون بستر قرار

بهبستی عطایی و آشتیانی (۱۳۸۷)، طوق‌ها ابزاری هستند که بر روی پایه نصب می‌شوند تا جلوی جریان رو به پایین را بگیرد و مانع از ایجاد گودال آبشستگی در اطراف پایه شوند. چپو، همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، طوق‌ها وقتی روی پایه نصب می‌شوند در هر سطحی که باشد جریان را به دو قسمت بالا و پایین طوق تقسیم می‌کند. قسمت بالای طوق به عنوان یک مانع عمل کرده و قسمت پایین طوق نیز قدرت جریان رو به پایین (گرداب نعل اسبی) را کاهش داده و در نتیجه میزان آبشستگی نیز کاهش می‌یابد (Chiew, 1992).

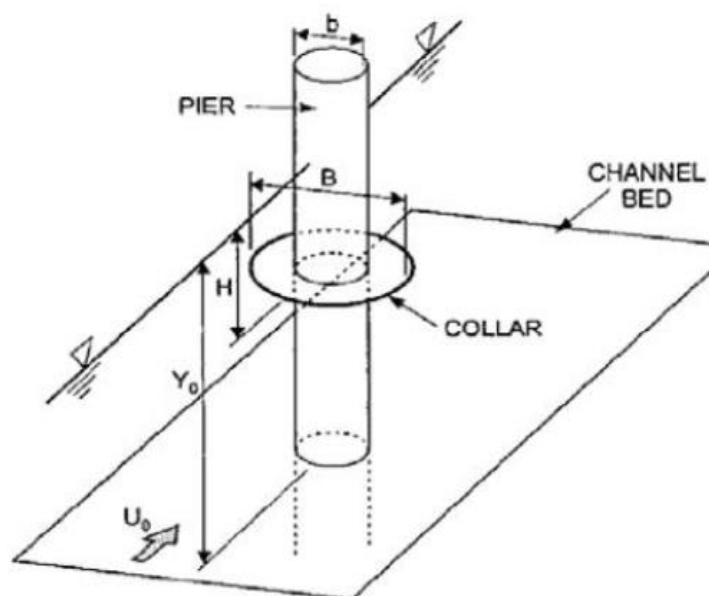
سینگ و همکاران، در پژوهشی نشان دادند که با افزایش فاصله بین بستر و محل نصب طوق، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. پیشنهاد کردند که بهترین محل برای نصب طوق در آزمایش برابر ۰/۱ قطر پایه زیرسطح بستر بود. در این حالت طوق به اندازه دو برابر قطر پایه، منجر به کاهش ۹۱ درصدی آبشستگی می‌شود (Singh et al., 2001).

براساس مطالعات زراتی و همکاران، با بررسی نصب طوق در دو حالت روی بستر و زیر تراز بستر، به این نتیجه رسیدند که طوق روی تراز بستر عملکرد بهتری در کاهش آبشستگی نسبت به طوق در زیر تراز بستر دارد (Zarrati et al., 2004).

ثانی خانی و همکاران (۱۳۸۸)، به بررسی اثر شکل طوق در

محل قرارگیری پایه در قوس مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که هرچه به انتهای قوس در بخش همگرا نزدیک می شویم آبشستگی اطراف پایه های پل افزایش می یابد و حداکثر عمق آبشستگی در زاویه ۷۵ درجه رخ می دهد. همچنین آبشستگی اطراف پایه های استوانه به مراتب کمتر از آبشستگی اطراف پایه های مکعبی مشاهده گردید (Rasaei et al., 2020, 2021, 2022).

رسیدند که، شکاف نزدیک بستر میزان آبشستگی را تا ۲۱ درصد کاهش می دهد. اما ترکیب طوق مربعی زیر بستر و شکاف نزدیک بستر میزان آبشستگی تا ۸۰ درصد کاهش می یابد. رسائی و همکاران (۲۰۲۰، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳)، در یک کار نویی وضعیت آبشستگی اطراف پایه های پل در یک قوس ۹۰ درجه همگرا را با در نظر گرفتن پارامترهای موثر اعم از شکل پایه، تغییرات دبی و



شکل ۳- نصب طوق روی پایه (Chiew, 1992)

شکاف و طوق به صورت همزمان در کاهش عمق آبشستگی می باشد.

مواد و روش ها

تحلیل ابعادی

پارامترهای زیادی بر آبشستگی پایه پل موثر می باشد و آوردن همه پارامترها مشکل و پیچیده می باشد، بنابراین با در نظر گرفتن پارامترهایی که بیشترین تاثیر را بر پدیده آبشستگی دارد، به صورت نسبت های بی بعد مورد بررسی قرار داد و به صورت زیر فرموله کرد:

$$f(S_{hp}, D, U, U_c, d_{50}, \rho, \rho_s, S, S_0, b, h, \mu, g, \sigma_s, L_b, d_s, y, S_a, h_b, h_c, S_c) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱): S_{hp} شکل پایه، D قطر متوسط رسوبات، U سرعت متوسط جریان، U_c سرعت آستانه حرکت رسوبات، d_{50} قطر متوسط رسوبات، ρ_s چگالی رسوبات، ρ چگالی، S زبری کف کانال، S_0 شیب کانال، b عرض فلوم، h ارتفاع پایه، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، g شتاب گرانشی، σ_s انحراف معیار هندسی رسوبات، L_b فاصله بین پایه و عرض فلوم، d_s عمق آبشستگی، y عمق جریان، S_a مساحت شکاف، h_b تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر، h_c تراز قرارگیری

با توجه به اهمیت مساله آبشستگی اطراف پایه های پل و با توجه به مطالعات پیشین که در این زمینه انجام شده، لزوم بررسی متمرکز بر روش های کاهش آبشستگی کاملاً آشکار است. طبق مطالعات پیشین تاکنون تحقیقی به صورت ترکیبی در مورد کاهش عمق آبشستگی پایه پل استوانه ای دارای شکاف در ۳ حالت مختلف قرارگیری و همچنین نصب طوق دوکی شکل در دو حالت مختلف بر روی پایه به صورت همزمان انجام نشده است و بیشتر به صورت مجزا بوده است. لذا در این پژوهش، با استفاده از تعبیه شکاف و طوق دوکی شکل در حالت های مختلف کارایی و نوآوری این روش را در کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه به صورت مدل فیزیکی بررسی گردید و هندسه گودال آبشستگی ایجاد شده با نمونه شاهد مقایسه و تحلیل شد.

هدف از این پژوهش: ۱- بررسی اثر همزمان شکاف و طوق دوکی شکل بر آبشستگی اطراف پایه پل ۲- بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف در سه حالت قرارگیری و همچنین طوق دوکی شکل در دو حالت مختلف قرارگیری روی پایه در مقایسه با پایه بدون شکاف و طوق (نمونه شاهد) ۳- ارائه یک معادله برای در نظر گرفتن اثر

طوق نسبت به بستر، S_c مساحت طوق است.

براساس تئوری باکینگهام پارامترهای تکراری $\rho \cdot U \cdot y$ می‌باشند. پارامترهای بدون بعد به دست آورده شد. با ترکیب پارامترهای بی بعد و حذف پارامترهای ثابت در آزمایش‌ها، رابطه بدون بعد برای این پژوهش به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$\frac{d_s}{y} = f \left(S_{hp} \cdot \frac{D}{y} \cdot \frac{U_c}{y} \cdot \frac{d_{s0}}{y} \cdot \frac{U}{\sqrt{y}g} \cdot \frac{b}{y} \cdot \frac{h}{y} \cdot \frac{s}{y} \cdot \frac{s_0}{y} \cdot \sigma_s \cdot \frac{\mu}{\rho U y} \cdot \frac{S_a}{y} \cdot \frac{l_b}{y} \cdot \frac{h_b}{y} \cdot \frac{h_c}{y} \cdot \frac{S_c}{y} \right) \quad (2)$$

چون در این پژوهش هدف فقط پایه استوانه‌ای می‌باشد بنابراین اثر شکل پایه نادیده گرفته شد. همچنین، زمان تمامی آزمایش‌ها ثابت (۲۴۰ دقیقه) و برابر زمان تعادل بستر است. از طرفی عمق آبشستگی در حالت به تعادل رسیده بررسی شد، پس پارامتر زمان نیز حذف گردید. به دلیل ثابت بودن عمق جریان در تمامی آزمایش‌های انجام شده، سرعت نسبی جریان و عدد فرود بر عمق آبشستگی رفتار مشابهی را نشان می‌دهند. همچنین عدد رینولدز $(Re = Uh/v > 2 \times 10^5)$ در محدوده جریان متلاطم می‌باشد در نتیجه تاثیر ویسکوزیته و تاثیر رسوبات نیز نادیده گرفته شد (Oliveto and Hager (2005).

$$\frac{d_s}{D} = \left(\frac{U}{U_c} \cdot \frac{D}{d_{s0}} \cdot \frac{h}{D} \cdot \frac{h_b}{D} \cdot \frac{h_c}{D} \right) \quad (3)$$

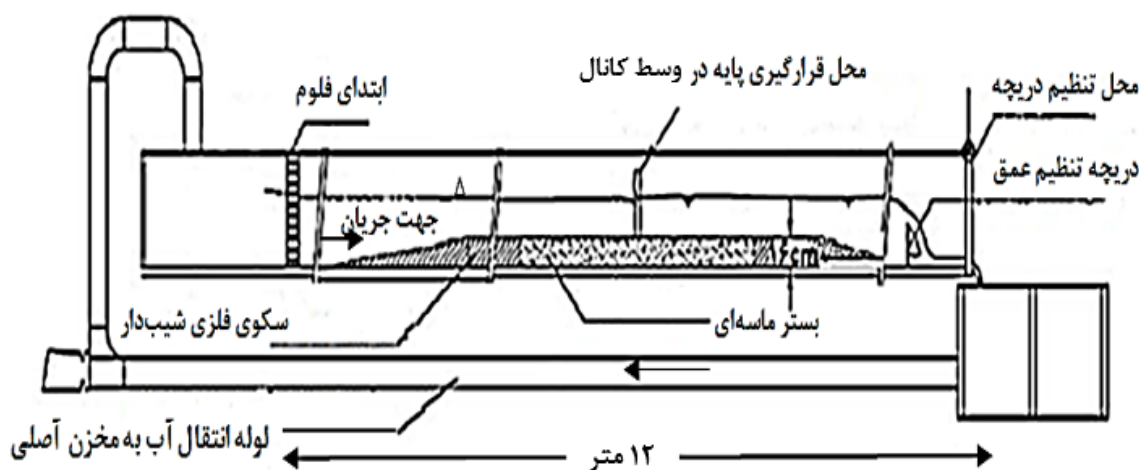
از طرفی چون عمق نسبی جریان و قطر نسبی ذرات ثابت هستند، آنها نیز حذف می‌شوند. با استفاده از تئوری باکینگهام و حذف نسبت‌های بی‌اثر و پارامترهای ثابت غیر مهم، در نهایت براساس عمق آبشستگی رابطه‌ای به صورت زیر استخراج گردید:

$$\frac{d_s}{D} = \left(\frac{U}{U_c} \cdot \frac{h_b}{D} \cdot \frac{h_c}{D} \right) \quad (4)$$

۲-۲- مشخصات فلوم آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقات مهندسی هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، فلوم آزمایشگاهی با کف گالوانیزه و دیواره شیشه‌ای به طول ۱۲ متر، عرض داخلی ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. یک پمپ در بالادست کانال ایجاد شده است که بیشترین توان تخلیه آن ۷۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. با استفاده از حجم آب خروجی از مخزن با سرریز مثلی استاندارد مدرج دبی آب تعیین شده و همچنین اندازه‌گیری جریان توسط یک دبی سنج آلتراسونیک نیز انجام گرفت (شکل ۵). در انتهای کانال یک دریچه تنظیم عمق وجود دارد که در ابتدا دریچه بسته شده تا سطح آب به عمق ۱۶ سانتی‌متر برسد سپس به آرامی دریچه را باز تا عمق آب در اندازه مورد نظر بماند. همه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شد. ضخامت رسوبات مورد استفاده در بستر رسوبی ۱۶۰ میلی‌متر می‌باشد. بستر رسوبی مورد آزمایش ۱۲ متر می‌باشد. در دو طرف بستر برای آرامش جریان مقداری شن ریخته شد.

بعد از به تعادل رسیدن آزمایش و تخلیه آب درون فلوم، برای برداشت عمق آبشستگی ایجاد شده از دستگاه متر لیزری (عمق سنج لیزری)، استفاده شد. بر روی یک شیشه شبکه بندی شده مدرج قرار گرفته و قرائت توپوگرافی بستر در دو راستای طولی و عرضی به فواصل ۲ سانتی‌متر از بالادست و پایین دست و چپ و راست انجام شد (شکل ۶).



شکل ۴- نمایی از فلوم آزمایشگاهی



شکل ۵- دبی سنج آلتراسونیک



شکل ۶- متر لیزری و شیشه شبکه بندی شده

مشخصات رسوبات

آبشستگی باید شرط $20 < D/d_{50}$ برقرار باشد (Raudkivi and Ettema, 1983). جدول (۱) مشخصات رسوبات به کار رفته در آزمایش‌ها آورده شده است. رسوبات یکنواخت می‌باشد و انحراف معیار هندسی رسوبات کمتر از ۱/۳ می‌باشد، شرط یکنواختی برقرار بوده و آبشستگی موضعی رخ می‌دهد.

براساس مطالعات رادکیوی و اتما، برای از بین بردن تاثیر دیواره کانال بر میزان آبشستگی، نسبت عرض کانال به قطر پایه باید بزرگتر از ۶/۲۵ باشد. در این آزمایش‌ها با توجه به عرض کانال از پایه استوانه‌ای به قطر ۴ سانتی‌متر (عرض نسبی ۱۰ درصد) استفاده شد. برای جلوگیری از تشکیل ریزل در سطح رسوبات قطر ذرات بایستی از ۰/۷ میلی‌متر بزرگتر باشد و برای حذف تاثیر اندازه رسوبات بر

جدول ۱- مشخصات رسوبات

انحراف معیار هندسی σ_g	ضریب یکنواختی C_u	وزن مخصوص G_s	قطر متوسط d_{50} (mm)
۱/۱	۱/۲	۲/۶۵	۰/۷۵

دست آمد. با توجه به شیلدز که از رابطه $\frac{d_s}{v} \sqrt{0.1(S_s - 1)gd_s}$ مقدار عددی این پارامتر برای بستر به دست می‌آید (Vanoni, 2006).

طبق جدول (۲) برای همه آزمایش‌ها عمق ثابت ۱۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. سرعت آستانه حرکت ذرات برابر با ۰/۳۶۲ محاسبه شد و عدد فرود (Fr) برابر با $Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$ و g شتاب ثقل و برابر با $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ است که با دبی‌های ذکر شده در عمق ۱۶ سانتی‌متری محاسبه شد. سرعت متوسط (U) از رابطه (۶) به دست آمد:

$$U = \frac{Q}{A} \quad (۶)$$

برای از بین بردن تاثیر عمق جریان بر آبشستگی اطراف پایه باید شرط $y/D > 3/5$ برقرار باشد (Chiew and Melville, 1987). برای تعیین سرعت آستانه حرکت از رابطه (۵) ارائه شد (Richardson and Davis, 2001).

$$U_c = \frac{K_s^{0.5} (S_s - 1)^{0.5} \cdot d_{50}^{0.5} \cdot y^{0.167}}{n} \quad (۵)$$

در رابطه بالا U_c ، سرعت آستانه حرکت رسوبات (m/s)، K_s ، پارامتر بی بعد شیلدز، G_s ، وزن مخصوص ذرات بی بعد، d_{50} ، قطر متوسط ذرات (m)، y ، عمق جریان (m) و n ضریب زبری مانینگ است که از رابطه استریکلر $n = 0.041(d_{50})^{1/6}$ برابر به ۰/۰۳۱ به

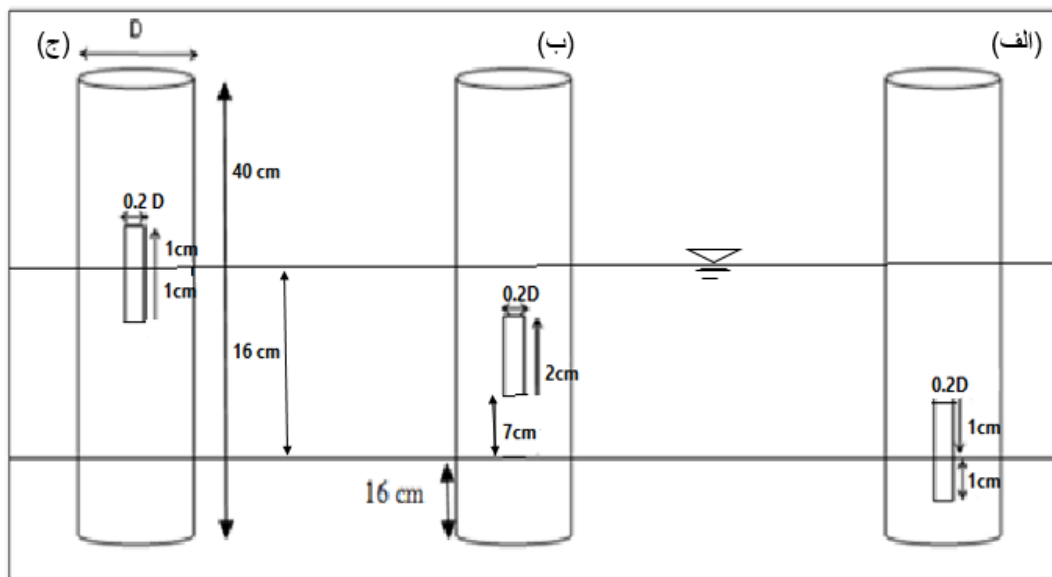
جدول ۲: شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان

Q (lit/s)	Y (cm)	U (m/s)	U_c (m/s)	$\frac{U}{U_c}$	Fr
۱۱/۵	۱۶	۰/۱۷	۰/۳۶۲	۰/۴۶۹	۰/۱۳
۲۳	۱۶	۰/۳۵	۰/۳۶۲	۰/۹۶۶	۰/۲۷

قطر پایه و در ۳ موقعیت مختلف بالای سطح آب، وسط پایه، زیر سطح بستر رسوبات (شکافی که در داخل بستر امتداد یافته)، استفاده شد. برای شکافی که در داخل بستر امتداد یافته طول ۱ سانتی‌متر زیر بستر و ۱ سانتی‌متر بالای بستر و برای شکافی که در بالای سطح آب است، ۱ سانتی‌متر بالای سطح آب و ۱ سانتی‌متر زیر سطح آب می‌باشد. در واقع شکاف‌ها طوری انتخاب شدند که بیشترین کاهش در آبشستگی حاصل شود. شکل (۷) به صورت نمادین ابعاد شکاف‌های انتخاب شده را نشان می‌دهند.

طراحی شکاف و طوق

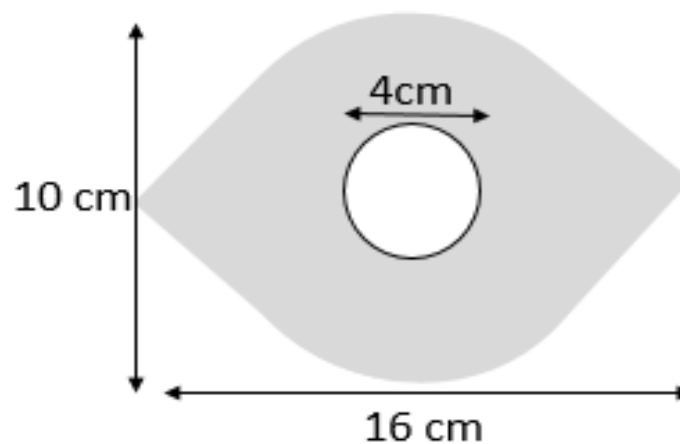
با توجه به نتایج نوری‌فر و همکاران (۱۳۹۳) شکافی به عرض ۰/۳D (D قطر پایه) که در داخل رسوبات امتداد یافته، بیشترین تاثیر در کاهش میزان عمق آبشستگی را داشت. در مطالعات آقاخانی و همکاران (۱۳۸۹)، ایجاد شکافی به عرض ۰/۳ قطر پایه که تا سطح بستر و همچنین در داخل بستر امتداد یافته، عمق آبشستگی را به ترتیب ۵۸/۱ و ۷۲/۵ درصد کاهش داده است. در این آزمایش‌ها از شکافی به عرض ۰/۲ قطر پایه و طول ۰/۵



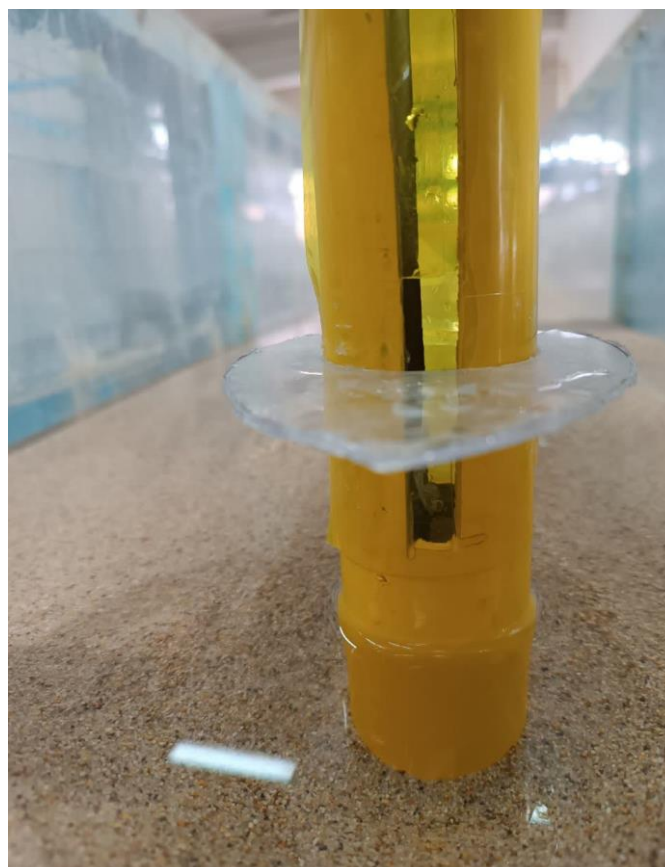
شکل ۷- قرار گیری شکاف (الف) شکف در پایین، شکاف در وسط (ج) شکاف در بالا

را ۳ برابر عرض پایه بیان کردند. که در این آزمایش‌ها عرض طوقه ۲/۵ برابر عرض پایه انتخاب شد. شکل (۸) طوقه مورد استفاده در این آزمایش‌ها به صورت دوکی شکل با ابعاد ۳/۲ برابر قطر پایه (ابعاد ۱۶*۱۰ سانتی‌متر) و ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب شد. طوقه در دو حالت پایین روی تراز بستر و در وسط پایه (۸ سانتی‌متر از سطح بستر رسوبی) قرار گرفت. شکل (۹) طرز قرارگیری طوق و شکاف بر روی پایه در محیط آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

درگاهی، با بررسی طوقه‌ها و میزان آبشستگی روی طوقه‌ها به این نتیجه رسید که ضخامت طوقه‌ها تاثیر زیادی بر میزان آبشستگی دارد. طوقه با ضخامت زیاد خود مانعی در برابر جریان می‌باشد که آبشستگی را بیشتر می‌کند. بنابراین ضخامت طوقه نباید زیاد باشد. طوقه باید در محل مناسبی نسبت به تراز بستر قرار گیرد که نقش موثری بر کاهش میزان آبشستگی داشته باشد (Dargahi., 1990). بر اساس آزمایش‌های بلوچی و همکاران (۱۳۸۶)، ارونقی و همکاران (۱۳۸۸) و تاناکا و یانو (۱۹۶۷)، عرض مناسب برای طوقه‌ها



شکل ۸- پلان از طوق و پایه



شکل ۹- طرز قرارگیری طوق و شکاف روی پایه

نحوه انجام آزمایش

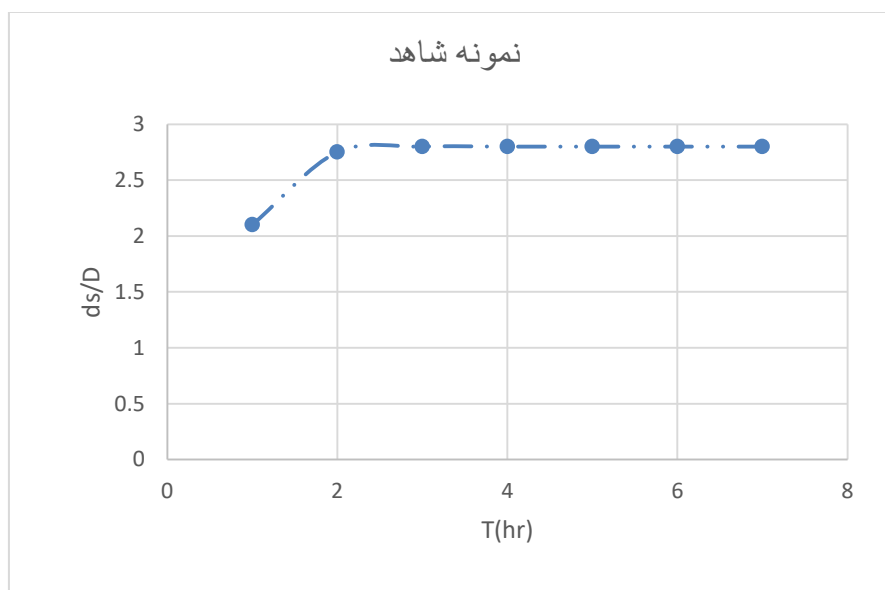
برای همه آزمایش‌ها، پس از نصب پایه و تجهیزات محافظی (در صورت وجود) سطح رسوبات بستر به طور کامل به خصوص در اطراف پایه با دقت کاملاً تراز شد. قبل از روشن کردن پمپ دریچه انتهایی بسته و پس از آن آب به آرامی با دبی ۱ لیتر بر ثانیه به درون کانال هدایت شد تا از ایجاد ریزل و آبشستگی اولیه اطراف پایه جلوگیری شود. پس از بالا آمدن آب تا عمق ۱۶ سانتی‌متر (عمق مورد نظر) دریچه انتهایی به آرامی تنظیم شد تا عمق لازم حاصل شود. در طول زمان انجام آزمایش با استفاده از عمق سنج بیشترین عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. بعد از اتمام مدت زمان آزمایش پمپ خاموش شده و دریچه انتهایی به آرامی پایین آورده شد تا آب فلوم تخلیه شود به طوری که به توپوگرافی بستر در اطراف پایه آسیبی وارد نشود. پس از تخلیه با استفاده از متر لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر در یک شبکه ۱*۱۰ سانتی‌متری توپوگرافی اطراف پایه برداشت شد (شکل ۶). برای همه آزمایش‌ها به همین روش انجام شد، در پایان توپوگرافی و نمودارهای مربوط به هر کدام رسم شد.

آزمایش پایه پل بدون محافظ (نمونه شاهد)

در این پژوهش در ابتدا پایه پل را بدون محافظ (شکاف و طوق)، به عنوان نمونه شاهد مورد آزمایش قرار گرفت تا مبنایی برای مشاهده و ارزیابی راهکارهایی برای کاهش میزان آبشستگی در اطراف پایه پل باشد. در شکل (۱۰) پایان آزمایش و به وجود آمدن گودال آبشستگی در اطراف پایه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اطراف پایه خالی شده و رسوبات در پشت پایه با فاصله از پایه تجمع پیدا کرده‌اند و باعث تشکیل پشته رسوبی شده‌اند. براساس معیار رادکیوی و اتما، مدت زمان انجام آزمایش زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در یک بازه زمانی ۴ ساعته تغییرات کمتر از ۱ میلی‌متر باشد (Raudkivi and Ettema., 1983). بنابراین مدت زمان انجام آزمایش‌ها در این پژوهش ۴ ساعت در نظر گرفته شد و برای تمامی آزمایش‌ها مبنای قرار گرفت. با توجه به نمودار شکل (۱۱)، تغییرات عمق آبشستگی در ابتدای آزمایش زیاد می‌باشد و با گذشت زمان رفته رفته کم شده به طوری که ۷۵ درصد آبشستگی در ساعت اول رخ داده است. پس از آن تغییرات آبشستگی تنها یک میلی‌متر اندازه‌گیری شده است.



شکل ۱۰- فلوم آزمایشگاهی و پایان آزمایش آبشستگی نمونه شاهد



شکل ۱۱- توسعه زمانی آبشستگی برای نمونه شاهد

رسوبات) و وسط (۸ سانتی متری بستر) قرار داده شد. شکاف با عرض ۱ سانتی متر و طول ۲ سانتی متر در سه حالت بالا (۱ سانتی متر از شکاف بالای سطح آب و ۱ سانتی متر زیر سطح آب)، در حالت وسط (۷ سانتی متری از بستر رسوبات) و در حالت پایین (۱ سانتی متر از شکاف زیر بستر رسوبی و ۱ سانتی متر بالای بستر رسوبی) قرار داده

آزمایش پایه پل همراه با طوق و شکاف

به منظور بررسی و ارزیابی راهکارهای حفاظتی در کاهش آبشستگی از مدل ترکیبی طوق و شکاف به صورت همزمان استفاده شد. در این آزمایش ها از طوق دوکی شکل با ضخامت ۲ میلی متر استفاده شد. طوق در دو حالت پایین (مماس بر سطح بستر هم تراز

آبستگی ایجاد شده در پایان آزمایش در شکل (۱۲) مشاهده می شود.

شد. در شکل (۱۲)، طرز قرارگیری شکاف و طوق نشان داده شده است. همچنین تشکیل گودال آبستگی در اطراف پایه و حداکثر



شکل ۱۲- میزان آبستگی اطراف پایه در ترکیب طوق و شکاف

نتایج و بحث

تاثیر ترکیب طوق و شکاف در توسعه زمانی حداکثر عمق آبستگی با نمونه شاهد

در شکل (۱۳) نمودار توسعه زمانی آبستگی برای مدل ترکیبی طوق و شکاف نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود برای نمونه شاهد ۷۵ درصد از آبستگی در ساعت اول رخ می دهد اما در مدل ترکیبی شکاف و طوق میزان آبستگی روند کمتری دارد و تا ۴ ساعت با روند بسیار کم ادامه پیدا می کند. وجود طوق و شکاف زمان شروع آبستگی را به تاخیر می اندازد به طوریکه ۷۵ درصد آبستگی در ۱۰۰ دقیقه اول رخ می دهد. پس از این زمان با شیب کمتری ادامه پیدا می کند که حدوداً از زمان ۲۰۰ تا ۲۴۰ دقیقه مقدار آن ثابت و بدون تغییر است.

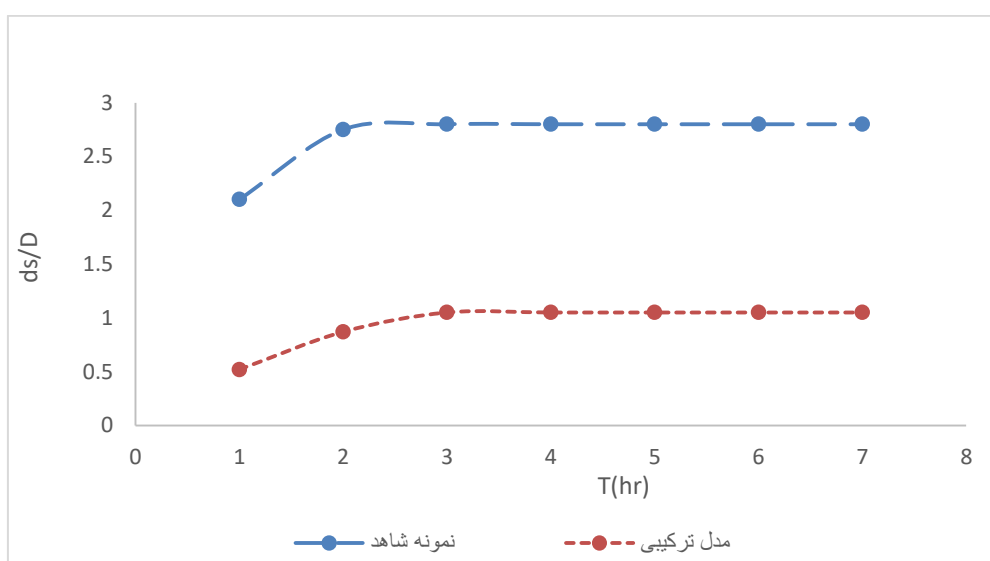
اثر دبی جریان بر میزان آبستگی

شکل (۱۴)، نشان می دهد که با افزایش دبی از ۱۱/۵ لیتر بر ثانیه به ۲۳ لیتر بر ثانیه آبستگی در اطراف پایه بدون شکاف و طوق و همچنین برای مدل ترکیبی انجام شد. براساس نتایج به دست آمده

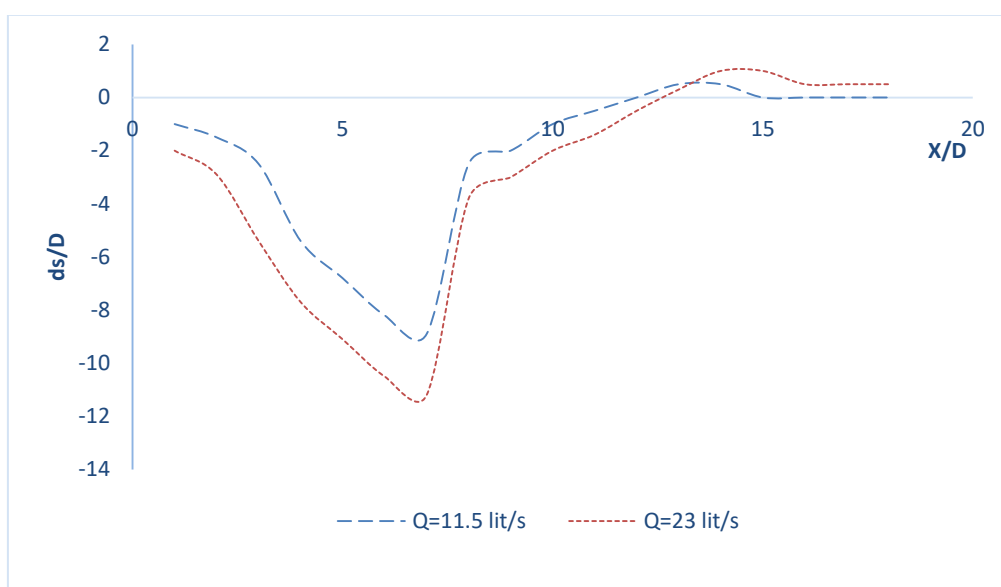
حداکثر عمق آبستگی برای دبی ۱۱/۵ لیتر بر ثانیه ۸/۹ سانتی متر و برای ۲۳ لیتر بر ثانیه برابر با ۱۱/۲ سانتی متر می باشد. بر این اساس با افزایش دبی میزان آبستگی ۲۵/۸۴ درصد افزایش یافته است. همچنین در مدل ترکیبی نیز با افزایش دبی میزان آبستگی ۳۱/۲۵ درصد افزایش داشته است.

تاثیر ترکیب طوق و شکاف در کاهش حداکثر عمق آبستگی در اطراف پایه پل در مقایسه با نمونه شاهد

همانطور که در شکل (۱۵) دیده می شود گودال آبستگی تشکیل شده در نمونه شاهد نسبت به مدل ترکیبی شکل (۱۶) بیشتر است و خطوط دو بعدی تشکیل شده نیز میزان آبستگی بیشتری را برای نمونه شاهد نشان می دهند. در جدول (۳) حداکثر عمق آبستگی برای نمونه شاهد و مدل ترکیبی (شکاف و طوق) آورده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می شود میزان آبستگی برای نمونه شاهد بدون شکاف و طوق ۱۱/۲ سانتی متر می باشد. که این میزان برای مدل ترکیبی ۶۲/۵ درصد کاهش داشته است. که در مقایسه می توان گفت عملکرد مدل ترکیبی باعث کاهش عمق آبستگی نسبت به پایه بدون شکاف و طوق می باشد.



شکل ۱۳- توسعه زمانی مدل ترکیبی حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه پل



شکل ۱۴- تغییرات آبشستگی نمونه شاهد در دو دبی مختلف

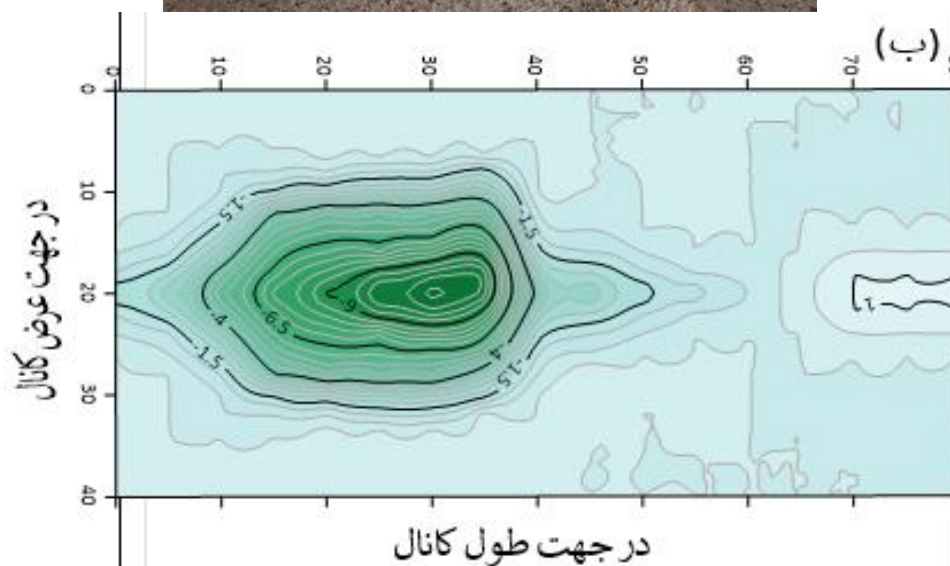
است که این میزان برای نمونه شاهد از نظر حجم گودال بیشترین آبشستگی را دارد. برای مدل‌های ترکیبی به سمت دیواره‌های کانال این میزان کاهش یافته به طوریکه در نزدیکی دیواره به صفر رسیده است. در شکل (۱۹) پروفیل طولی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به قطر پایه برای حالتی که طوق پایین و شکاف پایین باشد میزان آبشستگی نسبت به حالتی که طوق پایین و شکاف وسط باشد ۱۴/۲۸ درصد و نسبت به حالتی که طوق پایین و شکاف بالا باشد ۲۵ درصد آبشستگی کاهش یافته است. همچنین پشته رسوبی تشکیل شده در پشته پایه تا امتدادی از آن در محور طولی ادامه یافته است. همانطور

بررسی موقعیت قرارگیری طوق و شکاف و تاثیر آن بر میزان آبشستگی

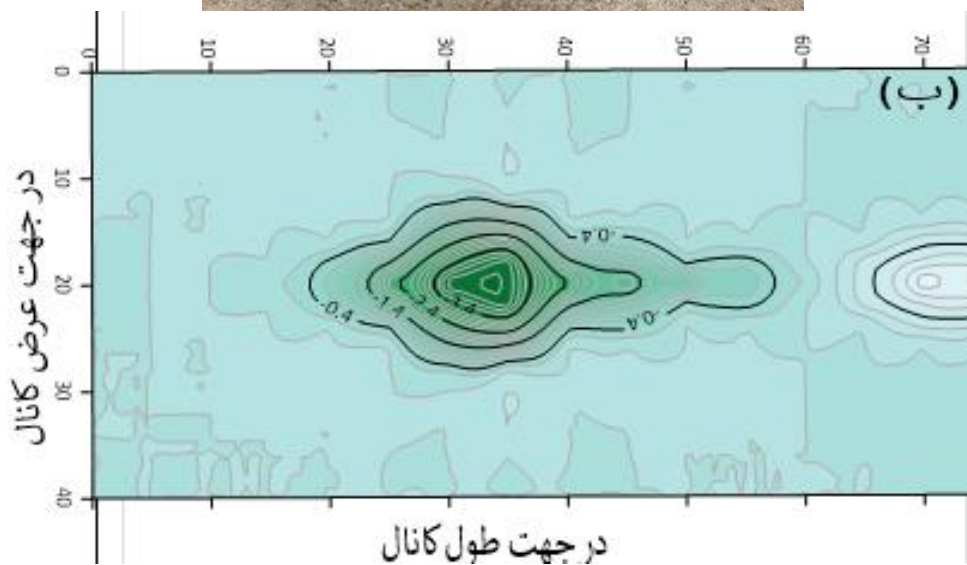
محل قرارگرفتن شکاف و طوق تاثیر زیادی بر میزان آبشستگی در جلو پایه دارد. در دبی ۲۳ لیتر بر ثانیه در حالتی که طوق وسط شکاف پایین باشد میزان آبشستگی نسبت به حالتی که طوق وسط و شکاف در وسط باشد ۴/۶۱ درصد کاهش و نسبت به حالتی که طوق وسط شکاف بالا باشد ۱۰/۱۴ درصد کاهش داشته است شکل (۱۷). در شکل (۱۸) پروفیل عرضی نشان داده شده است. میزان آبشستگی برای نمونه شاهد از جلو پایه به سمت دیواره‌های کانال ادامه داشته

داشته است. در شکل (۲۰) نیز پروفیل عرضی میزان آبستگی به سمت دیواره‌ها برای نمونه شاهد بیشتر و برای مدل‌های ترکیبی کم شده تا به صفر برسد.

که مشاهده می‌شود در ساعت اولیه بیشترین آبستگی اتفاق افتاده بر اساس نمودار آبستگی برای نمونه شاهد روند تندتری نسبت به مدل‌های ترکیبی دارد و با شیب بیشتری شدت گرفته برای همه حالت‌ها آبستگی از جلو پایه شروع شده و به سمت پایین دست ادامه



شکل ۱۵- الف) گودال آبستگی در نمونه شاهد ب) خطوط دو بعدی میزان آبستگی در نمونه شاهد



شکل ۱۶- الف) گودال آبشستگی در طوق و شکاف ب) خطوط دو بعدی میزان آبشستگی با طوق و شکاف

جدول ۳- تاثیر شکاف و طوق در کاهش حداکثر عمق آبشستگی در دبی 23 lit/s

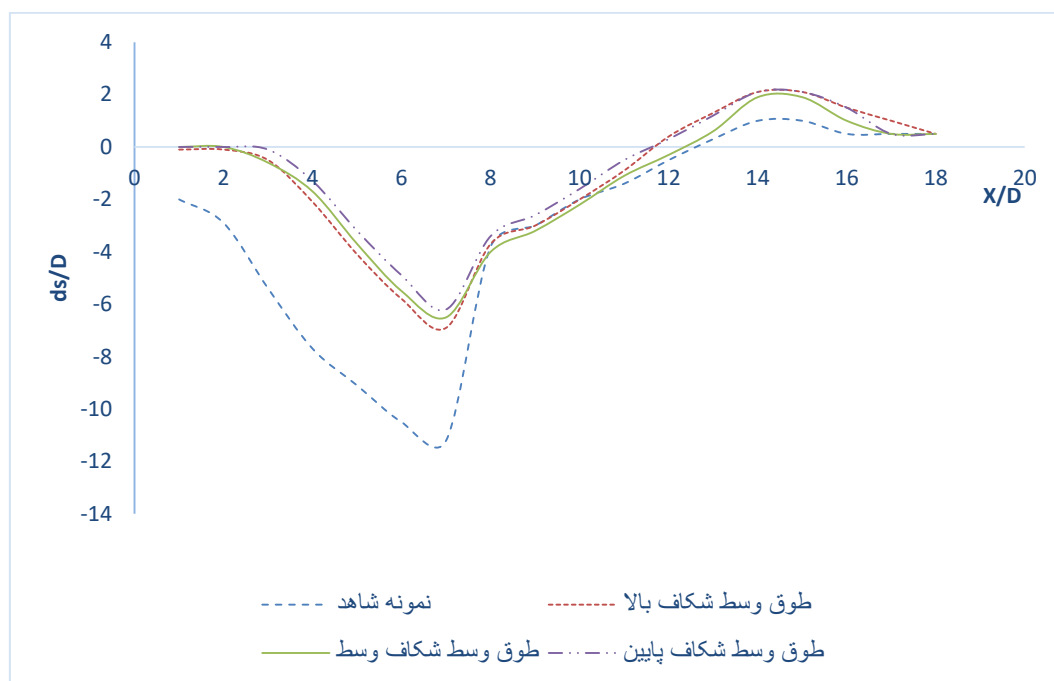
آزمایش	d_s (cm)	$\frac{d_s}{D}$	درصد کاهش عمق آبشستگی
نمونه شاهد	۱۱/۲	۲/۸	...
مدل ترکیبی	۴/۲	۱/۰۵	۶۲/۵

برای حالت طوق وسط شکاف بالا، طوق وسط شکاف وسط، طوق وسط شکاف پایین، طوق پایین شکاف بالا، طوق پایین شکاف وسط و طوق پایین شکاف پایین می‌باشد. در کل نتیجه می‌شود که در حالت

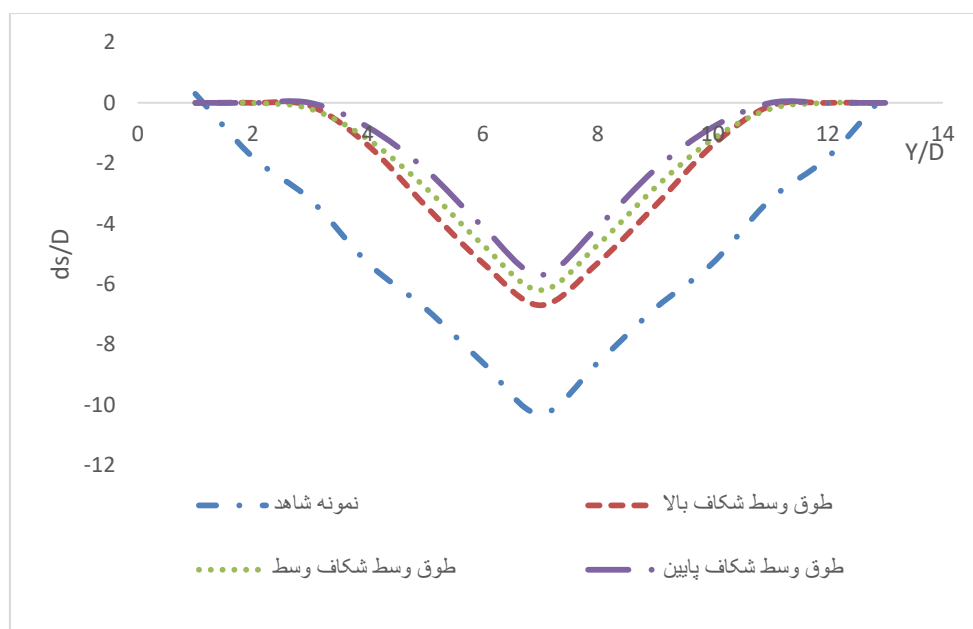
در حالت کلی قرارگیری طوق و شکاف در موقعیت‌های ذکر شده در شکل (۲۱) نشان داده شده است همانطور که دیده می‌شود بیشترین آبشستگی برای نمونه شاهد می‌باشد پس از آن به ترتیب

فضایی را برای ورود و خروج جریان فراهم می‌کند. این شکاف به تخلیه فشار مکش در پشت و اطراف پایه کمک کرده و نیروی مکشی که ذرات بستر را بلند می‌کند، کاهش یافته و پتانسیل آبستگي کم می‌شود.

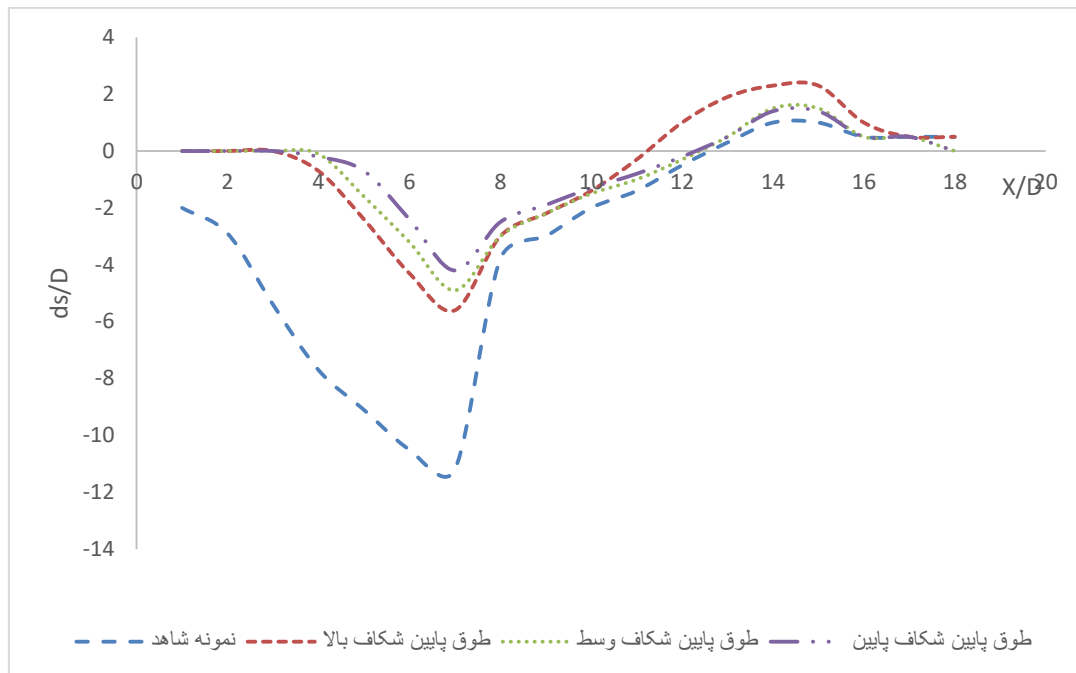
شکاف پایین آبستگي کمتر است اما در حالتی که هم طوق و هم شکاف همزمان در حالت پایین قرار بگیرند عملکرد بهتری داشته و میزان آبستگي ۶۲/۵ درصد کاهش داشته است. به دلیل اینکه وجود شکاف پایین (۱ سانتی‌متر زیر بستر و ۱ سانتی‌متر بالای بستر)،



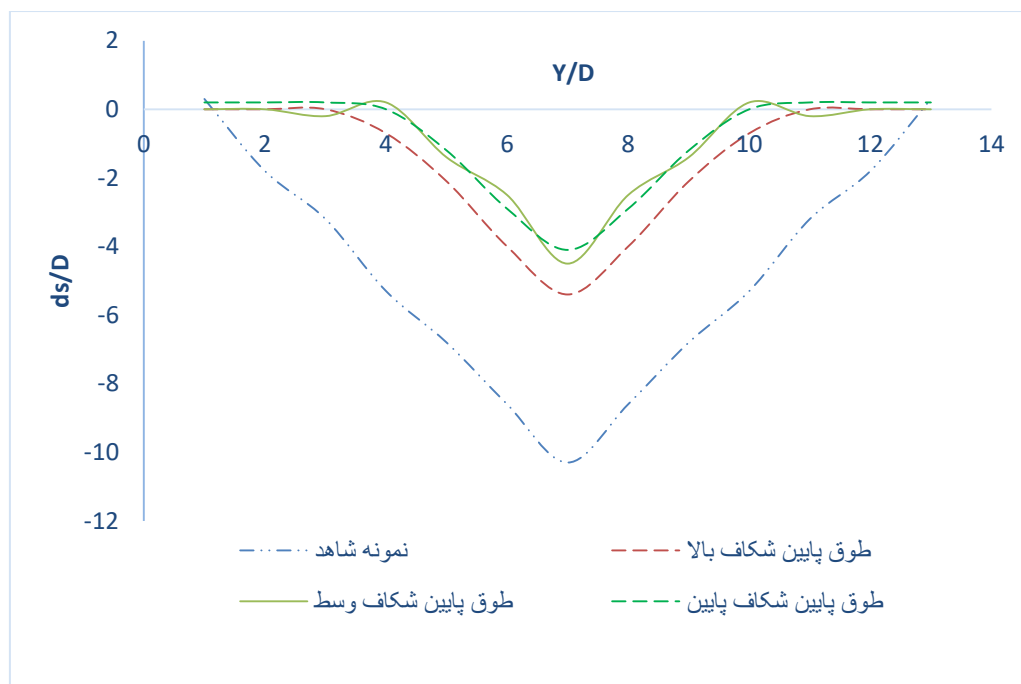
شکل ۱۷- پروفیل طولی طوق وسط و شکاف در ۳ حالت بالا، وسط و پایین در دبی ۲۳ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۸- پروفیل عرضی طوق وسط و شکاف در ۳ حالت بالا، وسط و پایین در دبی ۲۳ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۹- پروفیل طولی طوق پایین و شکاف در ۳ حالت بالا، وسط و پایین در دبی ۲۳ لیتر بر ثانیه



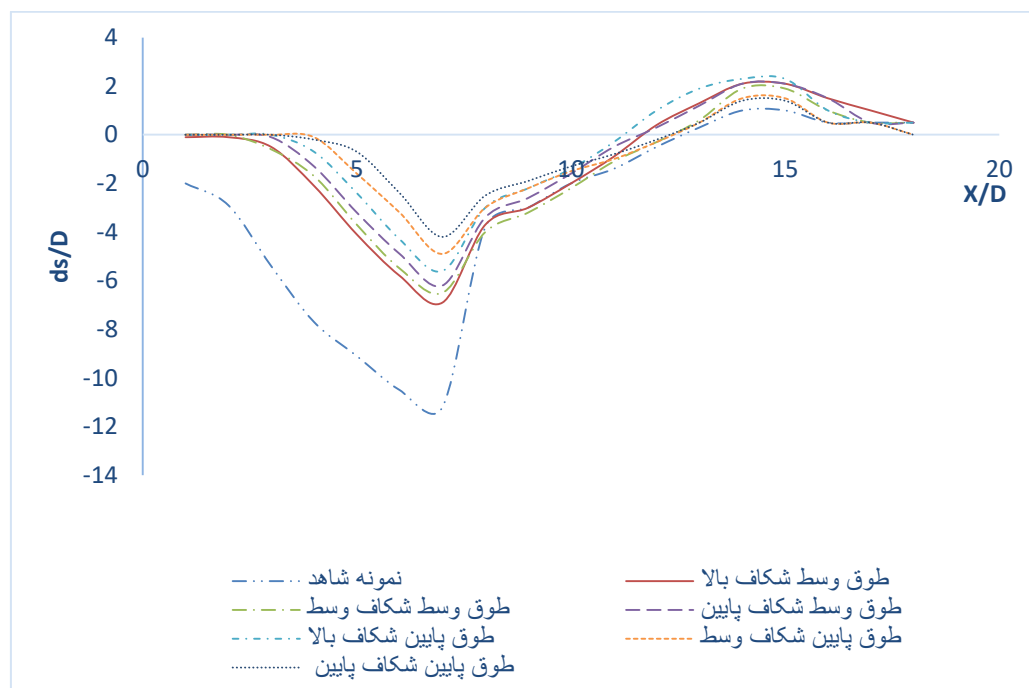
شکل ۲۰- پروفیل عرضی طوق پایین شکاف در ۳ حالت بالا، وسط و پایین در دبی ۲۳ لیتر بر ثانیه

کاهش انرژی در نواحی اطراف پایه و کاهش فشار مکش می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود در ابتدا میزان آبشستگی با روند تندی صورت گرفته و رفته رفته به پشت پایه این روند کاهش یافته است. همان اندازه که آبشستگی کم یا زیاد شده میزان رسوبات شسته شده از جلو پایه و تجمع آن‌ها پشته پایه تغییر پیدا کرده است. هر چه

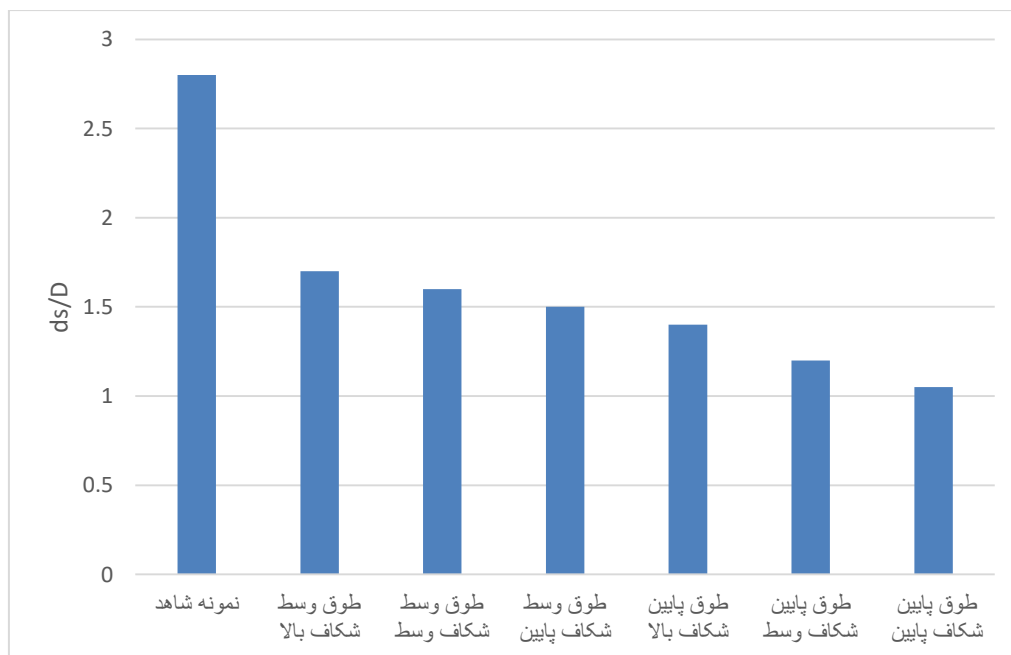
طوق پایین نیز باعث می‌شود جریان قبل از رسیدن به پایه مجبور به انحراف مسیر و عبور از رو یا اطراف آن شود. این انحراف سرعت جریان در نقطه برخورد مستقیم به پایه را کاهش می‌دهد. مسیر جریان را طولانی‌تر کرده و انرژی آن را مستهلک می‌کند. طوق به عنوان یک سپر محافظ عمل می‌کند. در نتیجه هر دو به کمک هم به

۰/۲ شکاف نسبت به قطر پایه در تراز زیر بستر و طوق در روی تراز بستر میزان آبشستگی در کمترین مقدار آبشستگی می‌باشد اما با ارتفاع گرفتن طوق و همچنین شکاف از سطح بستر آبشستگی بیشتر می‌شود و در نمونه شاهد که میزان آبشستگی حداکثر است.

میزان آبشستگی بیشتر باشد میزان تجمع و تشکیل پشته رسوبی نیز بیشتر خواهد بود. در شکل (۲۲)، حداکثر عمق آبشستگی بی بعد در موقعیت‌های مختلف قرارگیری طوق و شکاف نشان داده شده است. از بیشترین آبشستگی به سمت کمترین آبشستگی ایجاد شده به همین ترتیب نیز برای دبی ۱۱/۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد. با قرار گرفتن



شکل ۲۱- مقایسه پروفیل طولی بیشینه عمق آبشستگی در حالت‌های مختلف قرارگیری طوق و شکاف در دبی ۲۳ لیتر بر ثانیه

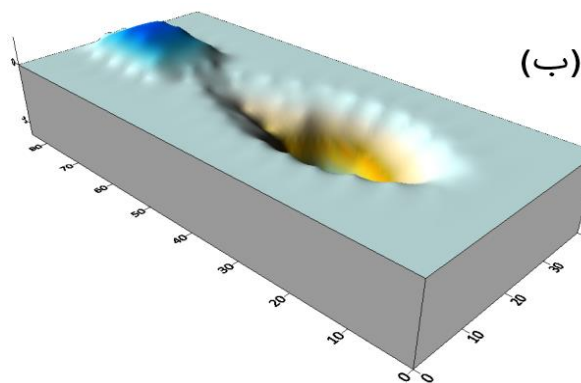
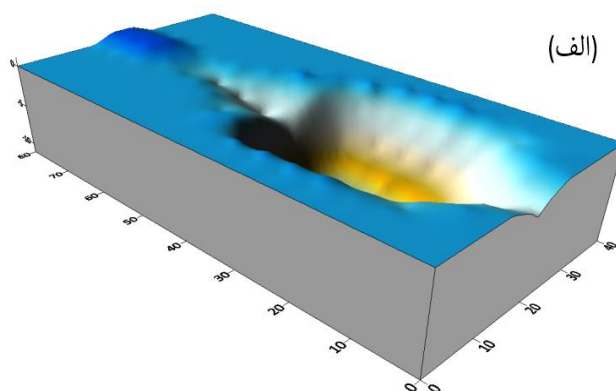


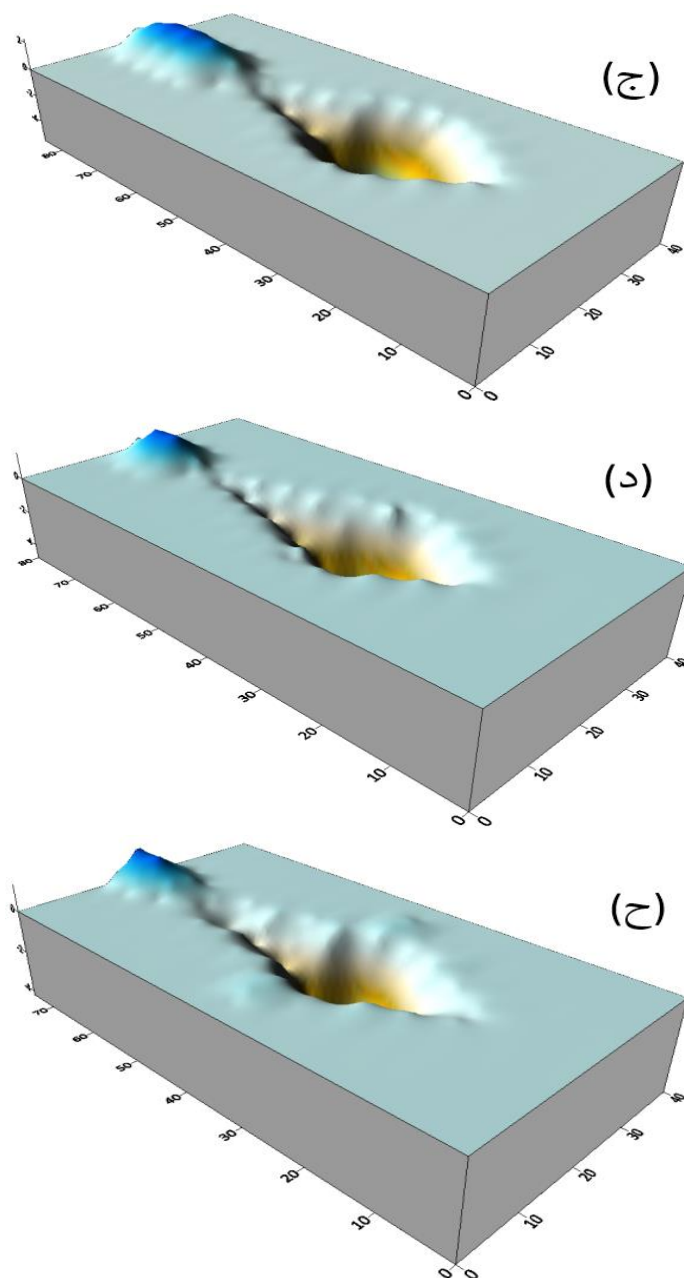
شکل ۲۲- تغییر موقعیت بی بعد طوق و شکاف در مقابل حداکثر عمق آبشستگی در دبی ۲۳ لیتر بر ثانیه

توپوگرافی بستر

در پایان هر آزمایش تغییرات توپوگرافی بستر در مجاورت پایه پل به صورت نمایش سه بعدی با استفاده از نرم افزار Surfer رسم شد. در شکل (۲۳) محدوده آبستگي بستر اطراف پایه برای نمونه شاهد و تغییرات مورفولوژیک راهکارهای محافظتی در مدل ترکیبی طوق و شکاف را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در قسمت (الف) میزان آبستگي برای نمونه شاهد تغییر قابل ملاحظه‌ای نسبت به مدل‌های ترکیبی با طوق و شکاف دارد. برای نمونه شاهد همانطور که در شکل (۲۳) قسمت (الف) مشاهده می‌شود آبستگي از جلوی پایه با تشکیل گودال آبستگي و به صورت متقارن نسبت به محور پایه شروع شده و مواد رسوبی از جلو پایه و اطراف پایه شسته شده و به سمت پایین دست حرکت کرده و به تدریج باعث تجمع رسوبات و ایجاد پشته رسوبی در پشت پایه می‌شود. چون در نمونه شاهد آبستگي زیاد بوده پشته رسوبی ایجاد شده به صورت پهن دیده می‌شود. پس از تشکیل گودال آبستگي و مستهلک شدن گرداب نعل اسبی در زمان رسیدن به تعادل حرکت رسوبات کم شده و در حد میلی‌متر تغییر نداشته است. در قسمت (ب) مدل ترکیبی طوق وسط

شکاف پایین قرار دارد در این قسمت آبستگي به میزان ۴۴/۶۴ درصد نسبت به قسمت (الف) کاهش آبستگي داشته است حجم گودال تشکیل شده کمتر و کشیده‌تر است. پشته رسوبی تشکیل شده نیز بصورت باریکتر و ارتفاع بیشتر می‌باشد. در قسمت (ج) طوق پایین و شکاف بالا قرار دارد در این قسمت نیز میزان آبستگي نسبت به قسمت (ب) ۱۶/۱۳ درصد کاهش داشته که نتیجه می‌شود با توجه به توپوگرافی رسم شده حجم گودال کمتر شده که نشان از آن است که طوق در قسمت پایین روی تراز بستر عملکرد بهتری در کاهش آبستگي دارد. در قسمت (د) نیز در حالت طوق پایین و شکاف وسط نیز به میزان ۱۲/۵ درصد کاهش آبستگي نسبت به قسمت (ج) داشته است و این نشان از این می‌باشد که شکاف در موقعیت‌های نزدیک به بستر عملکرد بهتری در کاهش آبستگي دارد. در قسمت (ح) نیز در حالت شکاف پایین و طوق پایین میزان آبستگي نسبت به قسمت قبل ۱۴/۲۹ درصد کاهش داشته است. همینطور که در توپوگرافی دیده می‌شود آبستگي کاهش چشمگیری داشته است. و این حالت کمترین آبستگي را به وجود آورده است.





شکل ۲۳- تغییرات توپوگرافی بستر الف) نمونه شاهد (بدون محافظ) ب) مدل ترکیبی طوق وسط و شکاف پایین ج) مدل ترکیبی طوق پایین و شکاف بالا د) مدل ترکیبی طوق پایین و شکاف وسط ح) مدل ترکیبی طوق پایین و شکاف پایین

$$\frac{d_s}{D} = 1.116 \left(\frac{U}{U_c} \right)^{1.029} + 0.120 \left(\frac{h_b}{D} \right)^{0.352} + 0.302 \left(\frac{h_c}{D} \right)^{0.363} \quad (7)$$

میانگین مجموع خطا پیش بینی شده مدل از رابطه (۸) محاسبه

می‌شود:

$$MFE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (8)$$

یافتن رابطه عمق آبستگي برای روش ترکیبی طوق و شکاف

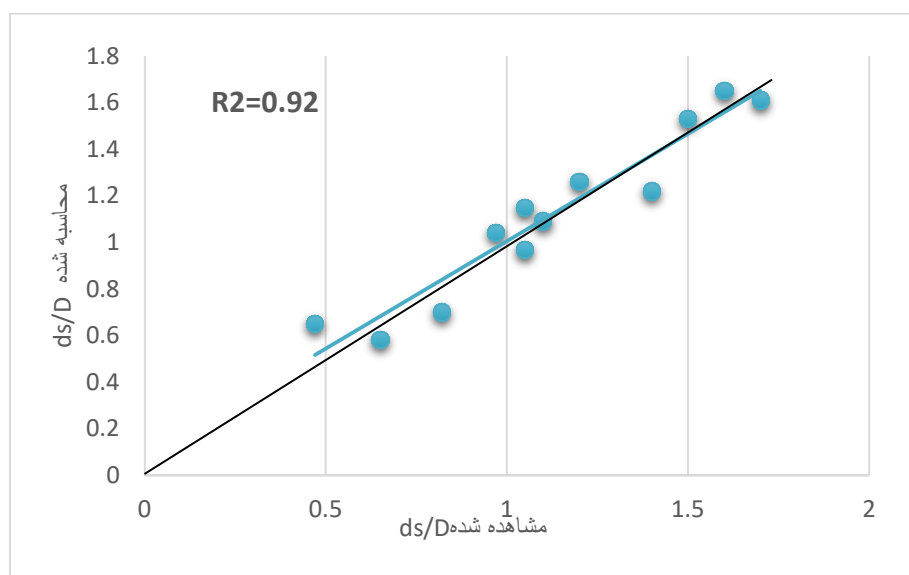
یافتن رابطه مناسب برای پیش بینی عمق آبستگي با استفاده از آنالیز ابعادی در جلو پایه استوانه‌ای با روش ترکیبی طوق و شکاف می‌باشد. با استفاده از نرم افزار SPSS و رگرسیون خطی رابطه (۷) به دست آمد که بیشترین R^2 و کمترین خطا را نشان می‌دهد. در این رابطه R^2 برابر است با ۰/۹۲ است و نشان می‌دهد ۹۲ درصد از تغییرات آبستگي، توجیه می‌شود.

شکل (۲۴)، حداکثر عمق آبستگي محاسبه شده در برابر حداکثر عمق آبستگي مشاهده شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود پراکندگی داده‌ها کم و نزدیک به مقدار مشاهده شده است و این نشان می‌دهد که رابطه پیش‌بینی شده عمق آبستگي برای تخمین عمق آبستگي روش ترکیبی طوق و شکاف از دقت بالایی برخوردار بوده و به درستی به کار رفته است.

در رابطه بالا MFE بیانگر میانگین خطای پیش‌بینی شده، y_i بیانگر حداکثر عمق آبستگي اندازه‌گیری شده و $\hat{y}_i$ بیانگر حداکثر عمق آبستگي برآورد شده توسط مدل و n تعداد مشاهدات می‌باشد. هرچه MFE به صفر نزدیکتر باشد یعنی مدل از دقت بالاتری برخوردار است و اگر MFE صفر شود یعنی مدل بدون خطا است. در این مدل مطابق با جدول (۴) این مقدار نزدیک صفر و برابر با ۰/۰۰۰۷ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است.

جدول ۴- میزان خطای محاسبه شده

MFE	R ²	نوع پایه
۰/۰۰۰۷	۰/۹۲	استوانه‌ای با شکاف و طوق



شکل ۲۴- مقایسه حداکثر عمق آبستگي برآورده شده از مدل و حداکثر عمل آبستگي مشاهده شده در آزمایش

باعث کاهش آبستگي می‌شود. همچنین شکاف نیز بستری را برای تخلیه و عبور جریان جدا شده می‌کند که خود باعث کاهش فشار در اطراف پایه می‌شود که این دو عمل با هم به طور موثری باعث کاهش آبستگي می‌شوند.

پایه با شکاف ۱ سانتی‌متر زیر بستر و طوق در پایین مماس بستر تا ۶۲/۵ درصد نسبت به نمونه شاهد موجب کنترل و کاهش آبستگي در جلو پایه می‌شود. این میزان کاهش، به طور معناداری بالاتر از حالتی است که تنها از یکی از این دو مدل استفاده شده باشد. در حالت کلی هرچه شکاف به بستر رسوبی نزدیکتر باشد میزان آبستگي نیز کمتر است. وقتی طوق وسط و شکاف در ۳ موقعیت بالا، وسط و پایین قرار بگیرد میزان آبستگي به ترتیب برابر است به ۶/۹ ۶/۵ و ۶/۲ می‌باشد. که نسبت به نمونه شاهد ۳۸/۳۹٪، ۴۱/۹۶٪ و ۴۴/۶۴٪ درصد کاهش داشته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان آبستگي در اطراف پایه استوانه‌ای نمونه شاهد (بدون شکاف و طوق) و مدل ترکیبی (شکاف و طوق به صورت همزمان)، در موقعیت‌های مختلف و در دو دبی متفاوت مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

نتایج به صورت زیر ارائه شد:

با افزایش دبی حجم و عمق گودال آبستگي نیز افزایش می‌یابد. مدل ترکیبی شکاف و طوق یک روش کارآمد برای کنترل آبستگي می‌باشد.

طوق با ۳/۲ برابر قطر پایه و شکاف به عرض ۰/۲D و طول ۰/۵D (قطر پایه) در موقعیت طوق پایین، شکاف پایین بیشترین عملکرد را در کاهش آبستگي دارند. مکانیزم‌های عمل این مدل ترکیبی مکمل یکدیگر هستند و طوق با انحراف جریان از سمت پایه

محبوب، ب.، محمدنژاد، ب. و بهمنی، ج. ۱۳۹۳. مدلسازی عددی آبستگي موضعی اطراف گروه پایه پل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸(۲): ۲۶۷-۲۷۵.

نجاتی، س.، مفتاح هلقی، م.، ظهیری، ع. و امین‌پور، ی. ۱۴۰۴. تحلیل مقایسه‌ای آبستگي پایین‌دست سرریز مرکب مثلثی- مثلثی با استفاده از روش کلاسیک و مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۹(۳): ۴۳۹-۴۵۲.

نظری، ع. ۱۳۸۱. کنترل و کاهش آبستگي موضعی پایه پل با استفاده از شکاف در گروه پایه‌های مستطیلی نوک گرد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

نوری‌فر، م.، آقاخانی افشار، ا. ح.، حسن‌زاده، ی. و فغفور مغربی، م. ۱۳۹۳. بررسی عددی و آزمایشگاهی کنترل و کاهش آبستگي موضعی در اطراف پایه‌های پل با مقطع دایروی بدون شکاف و شکاف‌دار. سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز.

همایون، س. ۱۳۸۸. تاثیر شکل پایه بر روی عمق و پروفیل آبستگي اطراف پایه پل. همایش ملی مدیریت بحران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت.

Alabi, P.D. 2006. Time Development of Local Scour at a Bridge Pier Fitted With a Collar. Thesis for degree of Master of Science, University of Saskatchewan.

Chiew, Y. 1992. Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 118(9): 1260-1269.

Chiew, Y.M. and Melville, B.W. 1987. Local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Research. 25(1): 15-26.

Singh, C., Setia, P. and Verma, D.V.S. 2001. Collar sleeve combination as a scour protection device around a circle pier. 29th Congress on Hydraulics of Rivers, Water Works and Machinery, Beijing, China. 16-21.

Dargahi, B. 1990. Controlling mechanism of local scouring. Journal of Hydraulic Engineering. 116(10): 1197-1214.

Kumar, V., Ranga Raju, K.G. and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. Journal of Hydraulic Engineering. 125(12): 1302-1305.

Melville, B.W. and Sutherland, A.J. 1989. Design method for local scour at bridge pier. Journal of Hydraulic Engineering. 114(10): 22-30.

Oliveto, G. and Hager, W.H. 2005. Further results to time-dependent local scour at bridge elements.

قرار گرفتن طوق در پایین و شکاف در پایین (۱ سانتی‌متر زیر بستر) کمترین آبستگي را ایجاد می‌کند. بیشترین آبستگي مربوط به نمونه شاهد بدون طوق و شکاف می‌باشد.

منابع

آقاخانی، ا.، فغفور مغربی، م. و اسماعیلی، ک. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکاف پایه و پایه‌های مجاور هم. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

ارونقی، ه. و فرسادی‌زاده، د. ۱۳۸۸. تعیین ابعاد مناسب طوق مستطیلی در کاهش آبستگي پایه پل. مجله دانش آب و خاک. ۱۹(۱): ۵-۱۱.

ایرندگانی، م. ۱۳۹۲. بررسی عمق آبستگي پایه پل‌های واقع بر رودخانه سرباز (جکیگور، سرباز). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

بهشتی، ع. ا. و عطائی آشتیانی، ب. ۱۳۸۷. بررسی عددی الگوی جریان و آبستگي در اطراف گروه شمع. مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

بلوچی، م.، چمنی، م. ر. و بیرامی، م. ک. ۱۳۸۶. بررسی اثر تغییر شکل طوق بر روند و میزان آبستگي موضعی. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.

ثانی‌خانی، ه.، حسین‌زاده دلیر، ع.، فرسادی‌زاده، د. و ملاحسینی، ش. ۱۳۸۸. بررسی اثر شکل طوق در کاهش آبستگي پایه‌های پل. مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

رایجی یانسری، ف.، مفتاح هلقی، م.، ظهیری، ع. و صلبی، م. ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی روش‌های کاهش آبستگي پایاب حوضچه آرامش (مطالعه موردی: بند سنگی ملاتی و طنا). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۸(۴): ۵۵۹-۵۷۳.

سلطانی ستوبادی، م.، امیدپور علویان، ت. و کاردان، ن. ۱۴۰۴. پیش‌بینی عمق آبستگي موضعی اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای در بسترهای با خاک چسبنده با استفاده از روش‌های فرامدلی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۹(۲): ۲۷۵-۲۹۰.

شریعتی، ح.، خدائشاس، س. و اسماعیلی، ک. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی کارکرد با هم طوق و شکاف بر میزان آبستگي موضعی در پایه پل. نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۳(۱): ۹۶-۱۰۹.

- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109(3): 338–350.
- Tanaka, S. and Yano, M. 1967. Local scour around circular cylinder. *Proceedings of the 12th IAHR Congress*. 193–201.
- Vanoni, V.A. 2006. *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers.
- Wardhana, K. and Hadipriono, F.C. 2003. Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 17(3): 144–150.
- Zarrati, A., Gholami, H. and Mashahir, M. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*. 42(1): 97–103.
- Journal of Hydraulic Engineering. 131(2): 97–105.
- Rasaei, M. and Nazari, S. 2023. Experimental and numerical evaluation of local scouring around different bridge piers at a 90 convergent meander. *Sādhana*. 48(1): 116–129.
- Rasaei, M. and Kolbi, S. 2021. Application of SSIIM numerical model in simulation of local scouring around the aerodynamic bridge pier located in 90 ° bend. *Journal of Hydraulic Structures*. 7(3): 59–71.
- Rasaei, M., Nazari, S. and Eslamian, S. 2020. Experimental investigation of local scouring around the bridge piers located at a 90° convergent river bend. *Sādhana*. 45(1): 87–101.
- Richardson, E.V. and Davis, S.R. 2001. Evaluating scour at bridges (No. FHWA-NHI-01-001). United States: Federal Highway Administration.

Laboratory Investigation of a combined gap and Collar Model in Local Scour around Bridge Piers

R. Ershadi Farsani^{*1}, M. Rasaei², E. Delavari³

Recived: Dec.21, 2025

Accepted: May.20, 2026

Abstract

One of the factors causing the destruction of bridge piers is the erosion of the foundation. As the scouring phenomenon spreads around the bridge pier, it weakens the foundation and threatens to destroy the entire structure. Therefore, in this study, combined gap and collar methods were used to control this phenomenon. The evaluation was carried out in a laboratory around the bridge pier in clear water conditions. First, the pier without a gap and collar (control sample), then the combined gap and collar method was examined and compared in different positions. In the combined method, the collar was integrated in 2 positions, low (on the bed level) and middle (the distance between the bed and the water surface), and the gap with an opening rate of D 25% (25% of the pier diameter) was placed in 3 positions: high (1 cm gap above the water surface), middle and low (1 cm gap under the sedimentary bed). The tests were conducted at two flow rates of 11.5 and 23 liters per second. The combined models were compared in different modes with the control sample (without collar and gap). The results showed that the presence of the gap and collar has a better performance in reducing scour than the control sample. The maximum scour depth in the low gap and collar mode is 4.2 cm, which is 11.2 cm for the control sample. Also, in the low gap and collar mode, the scour rate decreased by 62.5 percent and showed the highest performance in scour control. Finally, using relational analysis to predict scour depth was presented.

Key words: Bridge abutment, Combined Model, Collar, Gap, Localized scour

1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

(*- Corresponding Author Email: reza.e.f@iau.ac.ir)