

Laboratory study of scour around bridge pier groups with floating debris under supra-threshold flow conditions

Zahra Karami¹, Elham Ghanbari Adivi^{2*}, Mohammad Reza Nouri Emamzadehei³, Mehdi Asadi Aghbolaghi⁴ and Zeynab Badir⁵

Extended Abstract

Introduction

Bridges are critical structures in river engineering and require robust protection against scour, which is a significant hydraulic concern. Scour around bridge piers, exacerbated by flood events of varying intensity and duration, poses a substantial risk of structural failure. Furthermore, the accumulation of floating debris around piers can significantly alter local flow dynamics and scour patterns. Understanding these phenomena under diverse conditions is paramount for accurate scour depth estimation and the development of effective bridge protection strategies. Accumulation of floating debris around bridges, particularly near the piers, ranks among the primary factors contributing to scour. This debris reduces the flow cross-sectional area, thereby increasing the flow velocity to the levels beyond design thresholds. Consequently, the accumulation of floating debris causes a compounded increase in flow velocity, leading to severe scour. This occurs especially in regions characterized by high-velocity water flows such as mountainous and forested areas. Thus, it is imperative to proactively identify bridges susceptible to debris accumulation and implement appropriate mitigation measures, such as installing debris traps upstream of the bridge piers, to prevent excessive debris buildup. This research investigated laboratory-scale scour around bridge pier groups under live-bed conditions. Also, it examined the influence of pier arrangement and the presence of accumulated floating debris.

Materials and Methods

The study analyzed pier groups consisting of three, five, and six piers, with a relative pier width (pier diameter to channel width ratio) of 1/10. A total of 18 experiments were conducted across two scenarios: with floating debris and without floating debris (control). To eliminate the influence of channel walls on scour depth, the pier diameter should not exceed 10 percent of the channel width. Therefore, piers with a diameter of 6 cm (exactly 10 percent of the channel width) were utilized in these experiments. The related tests were performed in a mobile-bed flume to evaluate how varying discharge rates (24, 39, and 54 L/s) affect scour dynamics. The experimental design aimed to demonstrate that increases in the relative flow velocity lead to greater scour depth and volume, and to quantify the significant exacerbation of scour caused by floating debris accumulation. To prevent the influence of bed particle size on scour depth, the ratio of pier diameter to the mean sediment particle diameter was maintained at 50, in accordance with previous related studies. Furthermore, to eliminate the effect of sediment non-uniformity on scour reduction, the geometric standard deviation of the sediment was kept below 1.3. Consequently, a mean particle diameter of 0.96 mm was selected for this study. Prior to initiating each experiment, the sediment bed surface was leveled using a trowel, and the area around the piers was precisely leveled using a laser level and a spirit level. The tailgate at the downstream end of the flume was fully raised to prevent initial scour and the formation of bed forms. Subsequently, the pump was started at a low discharge rate. After a few minutes, once the sediment was fully saturated, the discharge was gradually increased to the target flow rate. The previously closed tailgate was then slowly adjusted to establish the required water depth. After allowing several hours for the scour around the piers to reach an equilibrium state, the pump was shut down, and the water in the flume was slowly drained. Following

1- PhD Student in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, University of Shahrood, shahrood, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Shahrood, shahrood, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Shahrood, shahrood, Iran.

4- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Shahrood, shahrood, Iran.

5- PhD Student in Water Resources, Department of Water Engineering, University of Shahrood, shahrood, Iran.

* Corresponding Author: ghanbariadi@sku.ac.ir

Received: 2026/03/05

Accepted: 2026/06/16

the cessation of flow, the topography around the pier group was measured using a non-contact bed profiler to ensure accurate assessment.

Results and Discussions

In the absence of floating debris, the maximum scour depths for the three-, five-, and six-pier groups were recorded as 11.5 cm, 12.1 cm, and 14.8 cm, respectively. Increasing the number of piers significantly amplifies the maximum scour depth; specifically, the six-pier configuration exhibited a 28.70% increase compared to the three-pier group, which is primarily attributed to the complex interference and overlap of horseshoe and updraft vortices. Furthermore, the accumulation of floating debris acts as a critical aggravating factor by reducing the effective flow cross-section and intensifying local flow velocities. In the densest pier arrangement, this debris accumulation exacerbated the maximum scour depth by 35.14% relative to the no-debris condition. The analysis of the blockage ratio revealed that denser pier configurations, particularly at shallower flow depths, severely restrict the effective flow area, thereby forcing intense flow channelization between the piers and exacerbating localized bed erosion. Under supra-threshold live-bed conditions, a direct and substantial correlation was observed between the relative flow velocity and the expansion of the scour hole, where a 125% increase in discharge led to a remarkable 94.17% surge in scour depth when debris was present. Three-dimensional bed topography measurements further demonstrated that the presence of debris not only deepens the scour hole but also significantly increases its lateral extent and morphological complexity, particularly around the front piers where the primary downflow originates. Finally, based on dimensional analysis of the experimental data, a robust empirical predictive model was successfully formulated and statistically validated with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.85$), providing a reliable mathematical tool for estimating maximum scour depth under these specific hydraulic conditions.

Conclusion

Based on the conducted experiments and the obtained results, an empirical relationship for predicting scour depth was derived using dimensional analysis for the three investigated groups of cylindrical piers. Statistical validation, performed with the aid of SPSS software, confirmed the high accuracy of this relationship in predicting scour depth.

Keywords: Scour, Dimensional analysis, Bridge pier, Debris, Pier group, Experimental study.

Citation:

Karami.Z., Ghanbari Adivi.E., Nouri Emamzadehei.M.R., Asadi Aghbolaghi.M., Badir.Z., 2026. Laboratory study of scour around bridge pier groups with floating debris under supra-threshold flow conditions. *Iranian Water Research Journal*, 20(62), pp. 55-74. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14961.2638>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



بررسی آزمایشگاهی میزان آبشستگی اطراف گروه پایه با تجمع اجسام شناور در شرایط جریان بیش از آستانه حرکت

زهرا کرمی^۱، الهام قنبری عدیوی^{۲*}، محمدرضا نوری امامزاده‌ای^۳، مهدی اسدی آقبلاغی^۴ و زینب بدیر^۵

چکیده

در این پژوهش، با رویکردی آزمایشگاهی تلاش شده تا اثرات متقابل هیدرودینامیک گروه پایه و انباشتگی اجسام شناور بر شدت آبشستگی در بسترهای متحرک بررسی شود. برای این منظور، آرایش‌های مختلف پایه (۳، ۵ و ۶ پایه‌ای) با عرض نسبی ۰/۱ تحت دبی‌های ۲۴، ۳۹ و ۵۴ لیتر بر ثانیه، در دو سناریوی حضور و عدم حضور اجسام شناور مطالعه شد. تحلیل داده‌ها در محدوده پارامترهای این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان با توسعه گودال آبشستگی رابطه مستقیم دارد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت عادی (بدون اجسام شناور)، گروه پایه ۶ تایی با ثبت عمق ۱۴/۸ سانتی‌متر، به ترتیب ۲۲/۳۱ و ۲۸/۷۰ درصد بیشتر از گروه‌های ۵ و ۳ پایه‌ای دچار آبشستگی شده که نشان‌دهنده حساسیت بالای آرایش‌های متراکم‌تر است. از سوی دیگر، حضور اجسام شناور به عنوان عاملی تشدیدکننده عمل کرده و با تغییر الگوی جریان، منجر به افزایش چشمگیر ابعاد گودال آبشستگی شده است. به طوری که در بحرانی‌ترین حالت (گروه پایه ۶ تایی)، تجمع اجسام شناور باعث افزایش ۳۵/۱۴ درصدی عمق آبشستگی نسبت به حالت شاهد گردیده است. این یافته‌ها بر لزوم در نظر گرفتن بارگذاری ناشی از اجسام شناور در طراحی‌های هیدرولیکی و ارائه راهکارهای حفاظتی برای پایه‌های پل تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، آنالیز ابعادی، پایه پل، تجمع اجسام شناور، گروه پایه، مطالعه آزمایشگاهی

ارجاع: کرمی، ز.، قنبری عدیوی، ا.، نوری امامزاده‌ای، م. ر.، اسدی آقبلاغی، م.، بدیر، ز.، ۱۴۰۵. بررسی آزمایشگاهی میزان آبشستگی اطراف گروه پایه با تجمع اجسام شناور در شرایط جریان بیش از آستانه حرکت. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۲)، صص. ۷۴-۵۵. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14961.2638>

۱- دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۵- دانشجوی دکترای منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

* نویسنده مسئول: ghanbariadi@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۴

مقدمه

آبشستگی به فرسایش رسوبات بستر رودخانه در اطراف پایه یا در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و یا فرسایش کناره آبراهه‌ها در اثر عبور جریان آب اطلاق می‌شود (Shafaei Bajestan, 2015). آبشستگی به دو صورت اتفاق می‌افتد: آبشستگی موضعی (بستر ثابت) که در آن رسوبات در بالادست حرکتی نداشته و آبشستگی بستر متحرک که در آن رسوبات از بالادست حرکت کرده و وارد حفره آبشستگی می‌شود و در نتیجه عمق آبشستگی نسبت به زمان کم و زیاد می‌شود (Shafaei Bejestan, 2015).

آبشستگی اطراف پایه‌های پل به عنوان یکی از مسائل اساسی در مهندسی هیدرولیک شناخته می‌شود که می‌تواند پایداری و ایمنی سازه‌های پل را به طور جدی تهدید کند. این پدیده به فرسایش رسوبات اطراف پایه‌های پل در اثر جریان آب اشاره دارد و در صورت عدم کنترل، ممکن است به تضعیف ساختار پایه‌ها و حتی فروپاشی پل منجر شود. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که آبشستگی یکی از دلایل اصلی خرابی پل‌ها در سراسر جهان است و درصد قابل توجهی از این خرابی‌ها را به خود اختصاص می‌دهد (Johnson et al., 2015). به عنوان مثال، از ۳۸۳ پل در ایالات متحده، ۲۵ درصد تخریب مربوط به آبشستگی پایه پل و ۷۵ درصد تخریب مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه می‌باشد (Kayaturk, 2005).

پایه‌های پل به عنوان مانعی در برابر جریان عمل می‌کنند و با برخورد جریان به پایه باعث پراکنده شدن رسوبات و با چرخش جریان در جلو پایه باعث به وجود آمدن گرداب نعل اسبی می‌شوند. گرداب برخاستگی به سمت پایین دست تشکیل می‌شود که رسوبات شسته شده از جلو و اطراف پایه را به سمت پایین دست منتقل می‌کند (Jalili, 2013).

در گروه پایه آبشستگی پیچیده‌تر از تک پایه می‌باشد (Hosseini and Amini, 2015). میدان جریان و روند آبشستگی اطراف گروه پایه تحت تاثیر مکانیزم‌هایی است که آن را نسبت به تک پایه پیچیده‌تر و عمق و شکل گودال آبشستگی را متفاوت می‌سازد. مکانیزم‌هایی که روند آبشستگی گروه پایه‌های هم امتداد را تحت تاثیر قرار می‌دهند به این صورت است که، به علت وجود پایه‌ی پشتی، ممکن است حفره‌های آبشستگی دو پایه روی هم قرار بگیرند که این باعث پایین آمدن تراز بستر در پشت پایه جلویی می‌شود و انتقال مصالح کنده شده از حفره جلوی پایه اول راحت‌تر صورت می‌گیرد که باعث می‌شود عمق آبشستگی در پایه‌ی جلویی افزایش یابد. وجود

پایه جلویی باعث کاهش عمق آبشستگی در پایه پشتی می‌شود (Grimaldi and Cardoso, 2010).

Okhravi and Gohari (2020) در پژوهشی آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های تک ستونی متشکل از چهار ردیف پایه با فاصله متفاوت بین پایه‌ها در شرایط آب زلال و برای دو دبی ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش عمق جریان نه تنها عمق آبشستگی افزایش می‌یابد بلکه وسعت عرضی گودال آبشستگی نیز افزایش داشته است. نتایج آزمایش‌های گروه پایه نشان دهنده تاثیر قابل توجه فاصله بین پایه‌ها بر میزان آبشستگی موضعی می‌باشد. افزایش فاصله بین پایه‌ها باعث کاهش اثرات متقابل گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی می‌شود. در نتیجه باعث کاهش عمق گودال آبشستگی در اطراف هر پایه به صورت تقریباً مجزا می‌شود.

مطالعات نشان داده‌اند که فاصله بین پایه‌ها در گروه پایه بر آبشستگی اثر دارد و فاصله بهینه فرسایش را کاهش می‌دهد (Kumar and Rajou, 1999). آرایش‌های پشت سر هم در گروه پایه، به دلیل اثر بیداری پایه بالادست، آبشستگی پایه‌های پایین دست را کم می‌کنند (Parchami et al., 2017). به دلیل پیچیدگی گروه پایه، طراحی دقیق آرایش پایه‌ها امری ضروری می‌باشد. تعاملات گردابی در این آرایش‌ها تحلیل خاص می‌طلبد. انتخاب آرایش مناسب گروه پایه، باتوجه به جریان و بستر، آبشستگی را بهینه می‌کند. این انتخاب پایداری پل را افزایش می‌دهد. در نهایت، روش‌های ترکیبی در آرایش گروه پایه، با پوشش ضعف‌های هر روش، کارایی را بالا می‌برند. این رویکرد به عنوان راهکاری پایدار توصیه می‌شود.

Hosseini matin et al. (2024)، در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بهینه‌سازی فاصله عرضی در گروه پایه‌های مستطیلی پرداختند. این پژوهش با هدف بررسی اثر فاصله عرضی بین پایه‌های مستطیلی قائم در گروه پایه، بر آبشستگی موضعی پیرامون آن‌ها انجام شد. در این پژوهش که در کانال مستقیم و تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود بین ۰/۱۶۰ تا ۰/۲۴۵) انجام شد، پایه‌های مستطیل شکل با عرض ۲/۵ سانتی‌متر و فاصله طولی ثابت ۴ برابر عرض پایه در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله عرضی، حداکثر عمق آبشستگی ابتدا روند نزولی پیدا کرد و در فاصله سه برابر عرض پایه به حداقل مقدار خود رسید. با این حال، با افزایش بیشتر فاصله تا ۸ برابر عرض پایه، عمق آبشستگی دوباره افزایش یافت و حداکثر عمق آبشستگی در این فاصله به طور متوسط ۳۴ درصد بیش از فاصله سه برابر عرض پایه به دست آمد.

و فاصله لوله از دیواره خارجی، بر میزان کاهش آبشستگی موثر بود (Maleki et al., 2019b; Tamoradi et al., 2023)، به بررسی آزمایشگاهی تاثیر سازه هوادهی بر جریان ثانویه، تنش برشی و الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداختند. آنها نتیجه گرفتند، سازه هوادهی در قوس ۹۰ درجه، قدرت جریان ثانویه را ۳۵ درصد کاهش داد، بیشینه سرعت را تا ۷۴ درصد از دیواره خارجی دور کرد و منطقه ماکزیمم تنش برشی را به میانه فلووم منتقل کرد که انتظار می‌رود آبشستگی را کاهش دهد.

در پژوهشی تاثیر زاویه تلاقی، نسبت دبی و نسبت عرض بر الگوی جریان و فرسایش در محل تلاقی رودخانه‌ها با شبیه‌سازی عددی با استفاده از کد CCHE2D، بررسی شد. نتایج نشان داد که در محل تلاقی رودخانه‌ها، افزایش زاویه تلاقی و افزایش نسبت دبی، حداکثر عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش نسبت عرض کانال، حداکثر عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. همچنین کاهش نسبت عرض شاخه فرعی به کانال اصلی، باعث بزرگتر شدن منطقه جدایی جریان می‌شود (Ahadiyan et al., 2018). در پژوهشی آزمایشگاهی، تاثیر سامانه پرده حباب هوا بر کاهش آبشستگی در قوس ۹۰ درجه بررسی شد. پرده حباب با تزریق هوای فشرده از طریق لوله روزنه‌دار در امتداد قوس خارجی ایجاد گردید. نتایج نشان داد که این سامانه با ایجاد گردابه‌های معکوس، هسته بیشینه سرعت را از دیواره خارجی به خط مرکز کانال منتقل می‌کند، به طوری که در مقاطع ۴۵، ۶۵، ۸۰ و ۹۰ درجه، بیشینه سرعت به ترتیب تا ۵۳، ۶۸، ۸۹ و ۸۴ درصد عرض کانال از دیواره خارجی دور شد. توان جریان ثانویه ۳۵ درصد و حداکثر عمق آبشستگی در زاویه تزریق عمودی (۹۰ درجه) تا ۷۹/۸ درصد کاهش یافت. ناحیه آبشستگی از ساحل خارجی به خط مرکز کانال منتقل شد. این یک راه حل سازگار با محیط زیست برای کنترل آبشستگی در قوس‌ها است (Maleki et al., 2025).

در پژوهشی، به تاثیر دبی تزریق بر کاهش آبشستگی قوس با استفاده از تکنیک تزریق آب پرداخته شد. نتایج نشان داد صفحه آبی ناشی از تزریق جریان، حداکثر عمق آبشستگی را تا ۶۳ درصد کاهش داد و محل آن را از ساحل خارجی به میانه مقطع منتقل کرد، افزایش دبی تزریق و عدد فرود، بر کارایی روش افزود (Tamoradi and Ahadiyan, 2022).

در پژوهشی، اثر تزریق آب و هوا بر کاهش آبشستگی قوس پرداخته شد. با تزریق آب و هوا از دو انتهای لوله روزنه‌دار در

با وقوع سیلاب خرده چوب‌های بزرگ توسط جریان آب حمل می‌شوند و در اطراف پایه‌های پل تجمع می‌یابند. اجسام شناور به طور مستقیم بر آبشستگی پایه پل تاثیر می‌گذارند (Ma and Zhang, 2022). بررسی اثر انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور روی میزان آبشستگی حول پایه پل از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا آبشستگی می‌تواند به کاهش ایمنی و پایداری پل‌ها منجر شود. تجمع اجسام شناور چوبی و کنده‌ی درختان در اطراف پایه‌های پل، موجب انسداد جریان آب رودخانه و کاهش سطح مقطع مفید آن می‌شود. این پدیده سبب افزایش آبگرفتگی شده و در نتیجه در مقایسه با عدم انباشتگی اجسام شناور، آبشستگی‌های بیشتری رخ داده و رسوب‌زدایی و کف‌کنی تشدید می‌شود. این رفتار جریان باعث زیرشویی اطراف سازه شده و بنابراین بر استحکام پل تاثیر گذاشته و منجر به خرابی غیر منتظره پل می‌شوند (Laursen and Toch, 1956; Lagasse et al., 2010). در پژوهشی با بررسی تجمع اجسام شناور گوه‌ای شکل در جلو پایه مشاهده شده که اجسام شناور مستطیلی و بلوکی شکل تمایل به ایجاد بیش‌ترین شکل آبشستگی را دارند، اما اجسام شناور مثلثی معمولاً آبشستگی کمتری را به وجود می‌آورند (Lagasse et al., 2010).

از معضلات اصلی که باعث بروز آبشستگی می‌شود، تجمع اجسام شناور در اطراف پل‌ها، به‌خصوص پایه‌های پل است. اجسام شناور با کاهش مقطع عبور جریان آب، باعث افزایش جریان آب بیش از مقدار در نظر گرفته شده در مرحله طراحی می‌شوند؛ از این رو به‌خصوص در نواحی که جریان آب سرعت بالایی دارد (مناطق کوهستانی و جنگلی)، تجمع اجسام شناور باعث افزایش مضاعف سرعت جریان آب شده و در نتیجه آبشستگی افزایش قابل توجهی خواهد داشت. از این رو بسیار مهم است که پل‌های مستعد انباشت اجسام شناور شناسایی شده و با لحاظ نمودن راهکارهایی نظیر به دام اندازی اجسام شناور در بالادست و به دور از پایه‌ی پل‌ها، از انباشت بیش از اندازه اجسام شناور جلوگیری به عمل آید (Panici et al., 2020).

تاکنون روش‌های متعددی برای کنترل آبشستگی پیشنهاد شده است. در پژوهشی، استفاده از جت هیدرولیکی هم فاز (لوله روزنه‌دار در امتداد قوس) باعث کاهش آبشستگی در قوس رودخانه شد. در این روش با ایجاد صفحه آبی، جریان ثانویه را از دیواره خارجی دور کردند. در نتیجه، حداکثر عمق آبشستگی از دیواره خارجی به میانه مقطع انتقال یافت و میزان آن در مقاطع ۹۰، ۱۳۰ و ۱۷۵ درجه به ترتیب ۶۰، ۶۴ و ۸۷ درصد کاهش یافت. همچنین کاهش فاصله روزنه‌ها

گروه پایه و اجسام شناور، پیش‌بینی عمق آبستستگی نیازمند بررسی جامع‌تری است که هدف پژوهش حاضر می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر انسداد ناشی از شیوه چینش گروه پایه، تعداد پایه‌ها و همچنین اثر افزایشی انسداد ناشی از حضور اجسام شناور مکعبی در آب روی میزان آبستستگی حول گروه پایه پل خواهد بود که بر اساس پژوهش‌های انجام شده در این مطالعه، مقایسه تعداد و حالت‌های مختلف گروه پایه در شرایط یکسان آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

در این پژوهش برای تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر آبستستگی پایه پل، از تئوری باکینگهام استفاده شد. برای این منظور در ابتدا بر اساس شناخت پدیده، پارامترهای متعددی که در پدیده آبستستگی نقش دارند، تعیین و سپس رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج خواهد شد. باتوجه به مطالعات انجام شده و هدف اصلی این تحقیق، پارامترهای مؤثر در رابطه به صورت رابطه (۱) خواهند بود.

$$f(D, b, w, L_b, H_b, h, U, \sigma_g, D_{50}, U_c, \mu, \rho, g, W_d, L_d, d_s, S, Ad) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه، D قطر پایه، L_b فاصله بین پایه و انتهای عرض فلوم، H_b ارتفاع پایه، b عرض فلوم، d_s عمق آبستستگی، σ_g انحراف معیار مصالح رسوبی بستر، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، U سرعت متوسط جریان، U_c سرعت آستانه حرکت، g شتاب گرانش، h ارتفاع آب، Ad مساحت جسم شناور مقابل جریان، D_{50} میانگین قطر ذرات، W_d عرض جسم شناور و L_d طول جسم شناور است.

با به‌کارگیری تئوری باکینگهام و انتخاب U, ρ, h به عنوان متغیرهای تکراری، معادله ۱ را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعد زیر نوشت:

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\frac{h}{D_{50}}, \frac{h}{b}, \frac{h}{b h}, \frac{h}{D}, \frac{h}{L_b}, \frac{h}{H_b}, \frac{h}{L_d}, \frac{h}{W_d}, \frac{U}{U_c}, \frac{\rho U h}{\mu}\right) \quad (2)$$

اگرچه در تحلیل ابعادی انجام شده، به دلیل ثابت بودن مشخصات فیزیکی رسوب و سیال در تمامی آزمایش‌ها، پارامترهایی مانند قطر ذره (d_{50}) و چگالی نسبی (S) از رابطه نهایی حذف شدند، اما اثر هیدرودینامیکی آن‌ها به صورت ضمنی

قوس ۱۸۰ درجه، با ایجاد سد انعطاف پذیر، جریان‌های ثانویه را از قوس خارجی منحرف کرد. حداکثر عمق آبستستگی در امتداد قوس کاهش یافت و محل آن از دیواره خارجی به خط مرکز منتقل شد که افزایش عرض کشتیرانی را ممکن ساخت. کاهش فاصله لوله روزنه‌دار از دیواره خارجی موثرتر بود. به‌طوری‌که در مقطع ۱۳۰ درجه با فاصله ۲/۵ سانتی‌متر، کاهش آبستستگی برای تزریق آب ۹۱ درصد و برای تزریق هوا ۸۸ درصد به دست آمد. با افزایش عدد فرود عمق آبستستگی افزایش یافت (Tamoradi and Ahadiyan., 2021).

در پژوهشی، تاثیر تزریق جداگانه آب و هوا از طریق لوله روزنه‌دار در کف قوس بر کاهش آبستستگی بررسی شد. هر دو روش تزریق جت آب و جت هوا، محل حداکثر عمق آبستستگی را از دیواره خارجی به میانه قوس منتقل کردند که افزایش عرض کشتیرانی را به همراه داشت. فاصله بهینه روزنه‌ها ۵ سانتی‌متر تعیین شد. در مقطع ۹۰ درجه، حداکثر عمق آبستستگی برای جت هوا ۸۵ درصد و برای جت آب ۹۱ درصد کاهش یافت. در مقطع ۱۷۰ درجه، این مقادیر به ترتیب ۷۹ و ۸۶ درصد بودند. تزریق جت آب عملکرد بهتری نسبت به جت هوا داشت. این روش از نظر عملی و اقتصادی برای رودخانه‌های واقعی قابل اجراست (Tamoradi et al., 2019a).

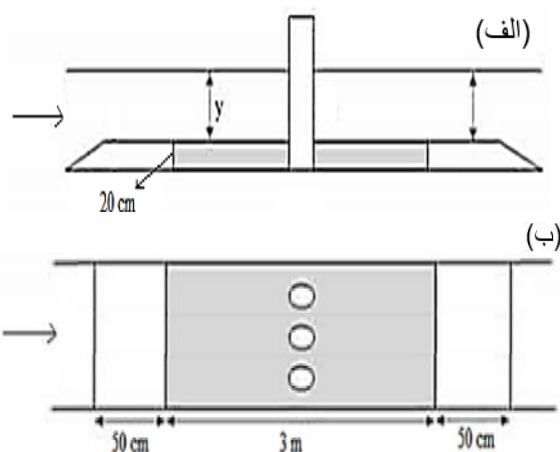
در پژوهشی، به مطالعه آزمایشگاهی الگوی آبستستگی ناشی از جت غوطه‌ور دایره‌ای در سیال محیطی کم عمق پرداخته شد. در شرایط جزر و مدی، تغییر عمق استغراق از ۵۰ به ۱۰۰ باعث شد توده رسوبی به جای قله، صاف شود. عمق استغراق تاثیر قابل توجهی بر ابعاد گودال آبستستگی ندارد. بنابراین توصیه می‌شود آبستستگی در رودخانه‌های دارای جزر و مد در شرایط جریان کامل انجام شود، زیرا حرکت جریان متمرکز به سمت پایین دست نتیجه آبستستگی در ابتدای جزر است (Jame et al., 2013).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که شرایط هیدرولیکی و موانع اضافی می‌توانند آبستستگی را تا چندین برابر افزایش دهند. به عنوان مثال، حضور عرشه پل در شرایط سیلابی عمق آبستستگی را تا ۳/۸۵ برابر افزایش می‌دهد (Jalaeeekar et al., 2025). همچنین تجمع اجسام شناور در زیر سطح آب، آبستستگی پایه مربعی را تا ۳/۶ برابر حالت بدون جسم شناور افزایش می‌دهد (Badir et al., 2025). از سوی دیگر، افزایش دمای آب باعث کاهش آستانه حرکت رسوبات شده و شرایط بستر زنده را تشدید می‌کند (Dastourani and Shirazi, 2021). این یافته‌ها نشان می‌دهد که در شرایط بیش از آستانه حرکت و با حضور همزمان

بیشتر باشد که در این آزمایش‌ها از پایه با قطر ۶ سانتی‌متر (۱۰ درصد عرض کانال) استفاده شد. شکل ۲، پلانی از گروه پایه ۳ تایی در بستر آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی



شکل ۲- الف) شماتیک از پروفیل طولی و ب) پلان محل نصب پایه‌ها در گروه پایه ۳ تایی

طراحی پایه‌ها و بستر مورد آزمایش

پایه‌ها در سه گروه پایه ۳ تایی، ۵ تایی و ۶ تایی قرار داشتند. فاصله مرکز به مرکز پایه‌های هر گروه از هم ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. انتخاب این نسبت بر اساس مطالعات انجام‌شده در زمینه دینامیک سیالات و رفتار سازه‌های آبی توسط محققانی همچون Liaghatian et al. (2022) و سایر تحقیقات مشابه، ارزیابی شده است که بر تأثیر فاصله پایه‌ها بر آبشستگی تأکید دارند. پایه‌ها روی یک صفحه با ضخامت ۴ سانتی‌متر نصب شده و دقیقاً در مرکز بستر قرار داشتند. شکل ۳ نمایی از قرارگیری پایه‌ها در بستر آزمایش را نشان می‌دهد.

بستر مورد آزمایش ۳/۵ متر (۱/۵ متر قبل از محدوده اندازه‌گیری، یک متر محدوده اندازه‌گیری و یک متر بعد از آن) با ضخامت رسوبات ۲۰ سانتی‌متر با دانه‌بندی یکنواخت پوشانده شده بود. برای جلوگیری از تأثیر اندازه ذرات بستر به عمق

در پارامتر سرعت نسبی (U/U_c) لحاظ گردیده است. از نظر تئوری، نسبت U/U_c معادل با جذر نسبت تنش برشی وارد بر بستر به تنش برشی بحرانی ($\sqrt{\theta/\theta_c}$) می‌باشد.

در این پژوهش هدف فقط گروه پایه استوانه‌ای است؛ بنابراین اثر شکل پایه نادیده گرفته شد. علاوه بر این از آنجا که فقط اجسام مکعب مستطیل مورد آزمایش می‌باشد، اثر شکل اجسام نیز نادیده گرفته شد. زمان تمامی آزمایش‌ها ثابت (۲۴۰ دقیقه) و برابر زمان تعادل بستر است. از طرفی عمق آبشستگی در حالت به تعادل رسیده بررسی، و در نتیجه پارامتر زمان حذف شد. با توجه به اینکه در در تمامی آزمایش‌ها عمق جریان ثابت نبوده است، سرعت نسبی جریان و عدد فرود تأثیرات متفاوتی بر عمق آبشستگی دارند؛ از این رو، این دو پارامتر به عنوان متغیرهای موثر در تحلیل لحاظ می‌شوند. همچنین عدد رینولدز ($Re = Uh/v > 2$) در محدوده جریان متلاطم می‌باشد در عمق‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر محاسبه شد. در نتیجه تأثیر ویسکوزیته و تأثیر رسوبات نیز نادیده گرفته شد Oliveto and Hager (2005). در صورتی که انحراف معیار هندسی رسوبات کمتر از ۱/۳ باشد شرط یکنواختی برقرار است. در این پژوهش انحراف معیار هندسی رسوبات یکنواخت و برابر با ۱/۱ می‌باشد، پس اثر غیر یکنواختی رسوبات نیز از بین می‌رود. 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:

$$\frac{d_s}{D} = \left(\frac{U}{U_c} \cdot \frac{h}{D} \cdot Fr \cdot \Delta A\% \right) \quad (3)$$

در رابطه بالا، نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت آستانه حرکت مواد رسوبی U/U_c و درصد انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور در جلو گروه پایه از معادله ۴ محاسبه شد. n تعداد پایه و Ad سطح مقطع جسم شناور می‌باشد. برای حالت نمونه شاهد (بدون تجمع اجسام شناور) $\Delta A\% = 0$ می‌باشد.

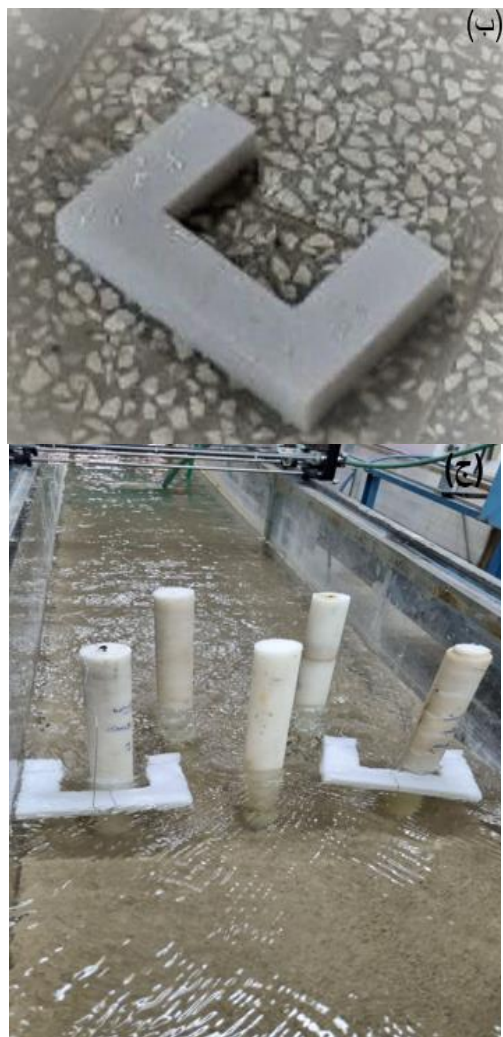
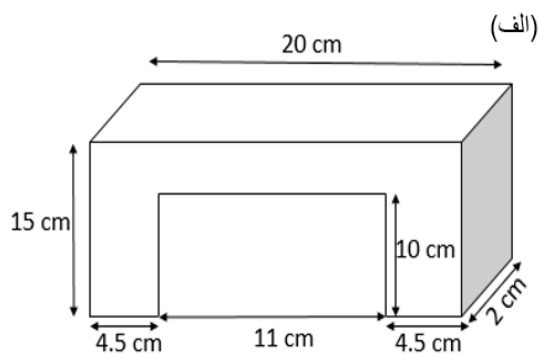
$$\Delta A\% = \frac{(D * h)(n - 2) + Ad}{b * h} \cdot 100 \quad (4)$$

مشخصات فلوم آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۲۰ متر، عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و شیب کف ثابت، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد (شکل ۱). طبق پژوهش Chiew and Melville (1987)، به منظور از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر عمق آبشستگی قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال

طراحی اجسام شناور

اجسام شناور استفاده شده به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۲۰*۱۵*۲ و مکعب داخلی با ابعاد ۱۱*۱۰*۲ انتخاب شد. شکل ۴، جسم شناور استفاده شده و همچنین در قسمت (ج) طرز قرارگیری اجسام شناور در جلو پایه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود جسم شناور در جلو پایه در موقعیت هم سطح آب به صورت شناور نصب می‌شود.



شکل ۴- اجسام شناور مورد آزمایش، الف) ابعاد اجسام شناور،
ب) جسم شناور در آزمایشگاه و ج) طرز قرارگیری اجسام شناور

آبشستگی بنا بر نظر Chiwe and Melville (1987) نسبت قطر پایه به میانگین قطر ذرات رسوبی باید ۵۰ باشد. برای از بین بردن تاثیر غیر یکنواختی رسوبات بر کاهش آبشستگی، میزان انحراف معیار هندسی رسوبات باید کمتر از ۱/۳ باشد. در این پژوهش قطر متوسط ذرات ۰/۹۶ میلیمتر می‌باشد. انحراف معیار هندسی ذرات نیز از رابطه $\sigma = \frac{D_{84}}{D_{16}}$ برابر با ۱/۱ محاسبه شد. در صورتی که، رسوبات طبیعی رودخانه‌ها معمولاً دارای ضریب بین ۱/۵ تا ۳/۵ هستند. بنابراین داده‌های این پژوهش عمدتاً برای شرایط با بستر یکنواخت می‌باشد و تعمیم آن به رودخانه‌هایی با دانه‌بندی غیریکنواخت نیازمند مطالعات تکمیلی می‌باشد.



شکل ۳- نمایی از قرارگیری پایه‌ها، الف) گروه پایه ۳ تایی،
ب) گروه پایه ۵ تایی و ج) گروه پایه ۶ تایی

سرعت آستانه حرکت رسوبات

در این پژوهش چون بررسی‌ها در شرایط بستر متحرک می‌باشد، $\frac{U}{U_c}$ معادل یک در نظر گرفته شد. با استفاده از روابط تجربی به دست آمده از منحنی شیلدز، سرعت برشی از رابطه ۵ به دست آورده شد.

$$u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \quad (5)$$

با مشخص بودن دبی و مشخصات کانال، سرعت آستانه حرکت رسوبات به دست آمد. با توجه به قطر متوسط ذرات (d_{50}) به ازای عمق‌های مختلف مقدار سرعت آستانه حرکت U_c از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$\frac{U_c}{u_{*c}} = 5.75 \log(5.53 \frac{y}{D_{50}}) \quad (6)$$

شرایط هیدرولیکی جریان مطابق با جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی جریان

y (cm)	Fr	u_{*c}	$\frac{U}{U_c}$	U (m/s)	U_c	Q (lit/s)
۱۰	۰/۴	۰/۰۱۹۶	۲	۰/۴	۰/۲	۲۴
۱۵	۰/۳۵	۰/۰۱۹۶	۱/۹۵	۰/۴۳	۰/۲۲	۳۹
۲۰	۰/۳۲	۰/۰۱۹۶	۱/۹۵	۰/۴۵	۰/۲۳	۵۴

Q دبی جریان، U سرعت متوسط جریان، U_c سرعت آستانه حرکت ذرات، y عمق جریان، u_{*c} سرعت برشی و Fr عدد بی بعد فرود می‌باشد.

لازم به توضیح است که مقادیر عمق جریان y، در جدول ۱ آمده است. در مقطع بالادست (حدود ۲ متر قبل از اولین ردیف پایه‌ها) و در شرایط جریان یکنواخت اندازه‌گیری شده‌اند. این عمق‌ها برای هر دبی به صورت جداگانه و با تنظیم دریچه انتهایی فلوم بر روی مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر تثبیت گردید. سرعت متوسط جریان (U) نیز در همان مقطع و با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد:

$$U = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

نحوه انجام آزمایش

قبل از شروع هر آزمایش سطح رسوبات به وسیله ماله صاف و در اطراف پایه‌ها با استفاده از متر لیزری و تراز تسطیح شد. دریچه انتهایی فلوم را تا انتها بالا آورده تا از آبشستگی اولیه و تشکیل فرم بستر جلوگیری شود. سپس پمپ را با دبی کم راه‌اندازی کرده و پس از گذشت چند دقیقه و اطمینان از خیس شدن رسوبات، دبی را به تدریج زیاد کرده

تا به دبی مورد نظر برسد. سپس دریچه انتهایی که بسته شده بود را به آرامی باز کرده تا عمق مورد نظر تنظیم شود. چند ساعت پس از آزمایش و زمان به تعادل رسیدن آبشستگی در اطراف پایه‌ها پمپ را خاموش کرده و سپس به آرامی آب داخل فلوم تخلیه می‌شود. بعد از تخلیه جریان، توپوگرافی در اطراف گروه پایه برای دقت در اندازه‌گیری و سنجش دقیق توپوگرافی از دستگاه لیزری برداشت پروفیل بستر (Bed Profiler) مطابق شکل ۵، بدون هیچگونه تماس با بستر به صورت سه بعدی و با دقت ۰/۰۰۰۱ میلی‌متر برداشت شد.



شکل ۵- دستگاه لیزری برداشت پروفیل بستر

آزمایش‌ها شامل آزمایش شاهد (بدون جسم شناور) و با جسم شناور با دبی‌های مختلف انجام شد. هدف از آزمایش تخمین عمق آبشستگی برای گروه‌های پایه با تعداد ۳، ۵ و ۶ تایی است. در اینجا ۱۸ آزمایش برای سه گروه پایه انجام شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، برای بررسی تاثیر گروه پایه‌ها در الگوی آبشستگی ۱۸ آزمایش مطابق جدول ۲ انجام شد. آزمایش‌ها در دو بخش بدون اجسام شناور و با اجسام شناور با دانه‌بندی یکسان بررسی شد. بیشینه عمق آبشستگی در جلوی هر گروه پایه با دبی‌ها و عمق‌های مختلف آورده شده است.

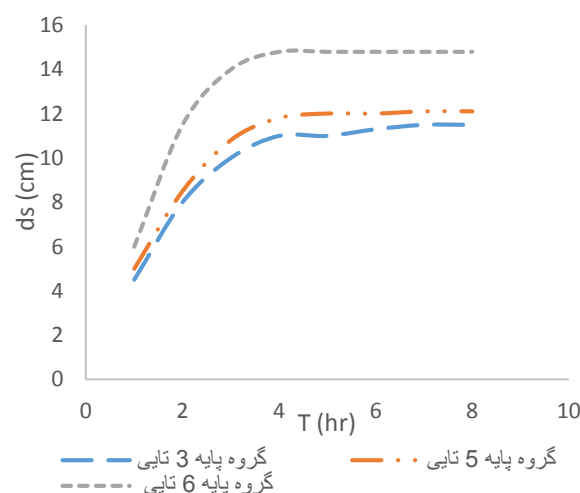
جدول ۲- عمق آبشستگی گروه پایه‌های ۳، ۵ و ۶ تایی با و بدون اجسام شناور

Model	H(cm)	Q(lit/s)	Fr	d ₅₀ (mm)	U _c (m/s)	ds ₁ (cm)	ds ₂ (cm)	ds ₃ (cm)	T(min)
گروه پایه A بدون اجسام شناور	۱۰	۲۴	۰/۴	۰/۷۵	۰/۲	۸/۷	۹/۷	۹/۹	۲۴۰
	۱۵	۳۹	۰/۳۵	۰/۷۵	۰/۲۲	۹/۱۲	۱۰/۷	۱۱/۵	۲۴۰
	۲۰	۵۴	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۲۳	۱۱/۵	۱۲/۱	۱۴/۸	۲۴۰
گروه پایه B با اجسام شناور	۱۰	۲۴	۰/۴	۰/۷۵	۰/۲	۸/۴	۹/۲	۱۰/۳	۲۴۰
	۱۵	۳۹	۰/۳۵	۰/۷۵	۰/۲۲	۱۱	۱۲/۷	۱۲/۵	۲۴۰
	۲۰	۵۴	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۲۳	۱۳/۷	۱۴/۴	۲۰	۲۴۰

ds₁ گروه پایه ۳ تایی، ds₂ ۵ گروه تایی و ds₃ گروه ۶ تایی است

مدت زمان انجام آزمایش

Kumar and Rajou, (1999) بر اساس تحقیقات خود، زمان تعادل را آن مدت زمانی تعریف کردند که در ۳ ساعت متوالی عمق آبشستگی بیش از یک میلی‌متر نباشد. همچنین، بر اساس معیار Raudkivi and Ettema (1983) مدت زمان انجام آزمایش زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در یک بازه ۴ ساعته کمتر از ۱ میلی‌متر باشد (Ghanbariadi and Khosravi, 2026). لذا بر اساس نتایج بدست آمده، در این پژوهش مدت زمان انجام آزمایش‌ها ۴ ساعت در نظر گرفته شد. شکل ۶، روند زمانی آبشستگی را طی ۴ ساعت برای ۳ گروه پایه نشان می‌دهد.



شکل ۶- منحنی توسعه زمانی حفره آبشستگی

مشاهده می‌شود که تغییرات عمق آبشستگی در ابتدا زیاد بوده و به تدریج کم شد، همانطور که مشاهده می‌شود ۷۵ درصد آبشستگی در ساعات اولیه رخ می‌دهد و پس از آن با روند کمی ادامه پیدا می‌کند. تا دقیقه ۲۴۰ تغییرات آبشستگی در حد میلی‌متری (۱ میلی‌متر) می‌باشد.

عمق آبشستگی

یکی از مهمترین ابعاد در موضوع آبشستگی، بررسی عمق آبشستگی و پارامترهای موثر بر آن می‌باشد. دانه‌بندی رسوبات و

همچنین شکل و تعداد پایه‌ها از مهمترین عوامل موثر بر میزان آبشستگی پایه پل می‌باشد. بنابراین در این پژوهش میزان عمق آبشستگی در دو حالت با اجسام شناور و بدون اجسام شناور در ۳ گروه پایه استوانه‌ای با عمق‌ها و دبی‌های مختلف بررسی شد. شکل ۷ آبشستگی پیرامون گروه پایه ۵ تایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود آبشستگی در جلو پایه‌های جلویی نسبت به پایه‌های پشتی بیشتر است. دلیل این مشاهده آن است که جریان هنگام برخورد به اولین ردیف پایه‌ها، یک گرداب نعل اسبی قوی در جلوی آن‌ها ایجاد می‌کند. این گرداب با حرکت رو به پایین، رسوبات را از جلوی پایه جلویی شسته و به سمت پایین دست حمل می‌کند. پس از برخورد جریان به پایه جلویی، بخشی از انرژی آن کاهش یافته و گرداب‌های پشت پایه جلویی، سرعت جریان رسیده به پایه‌های پشتی را کم می‌کنند. بنابراین پایه‌های پشتی جریان‌های ضعیف‌تری را تحمل می‌کنند و عمق آبشستگی اطراف آن‌ها کمتر از پایه جلویی می‌شود. این الگو با یافته‌های Hosseini and Amini, (2015) و Okhravi and Gohari, (2020) همخوانی دارد که گزارش کردند، در گروه پایه، پایه جلویی بیشترین آبشستگی را تجربه می‌کند.



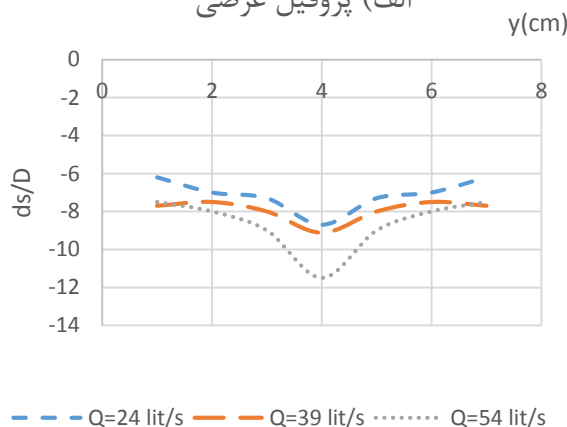
شکل ۷- نمونه‌ای از آبشستگی اطراف گروه پایه

بررسی عمق آبستگي برای گروه‌های پایه بدون اجسام شناور

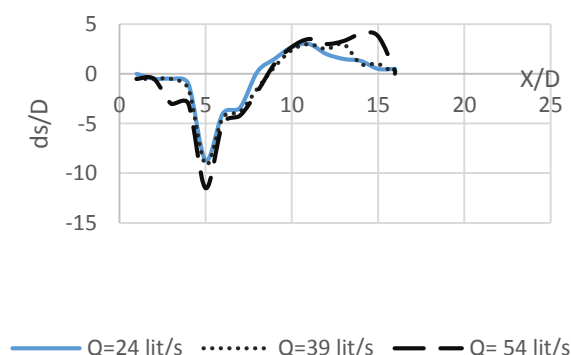
گروه پایه ۳ تایی

در این گروه پایه، تعداد ۳ آزمایش با ۳ دبی ۲۴، ۳۹ و ۵۴ لیتر بر ثانیه برای حالت بدون جسم شناور (نمونه شاهد) انجام شد. پس از پایان آزمایش داده برداری انجام شد. در شکل ۸ منحنی تغییرات رخ داده در گروه پایه ۳ تایی بدون اجسام شناور رسم شده است. قسمت الف، پروفیل عرضی و ب، پروفیل طولی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است حداکثر عمق آبستگي در گروه پایه ۳ تایی بدون اجسام شناور برابر با ۱۱/۵ سانتی‌متر است. برای دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه بیشینه عمق آبستگي برابر با ۸/۷ سانتی‌متر می‌باشد. در محدوده دبی مورد بررسی، افزایش ۶۲/۵ درصدی دبی منجر به افزایش ۵ درصدی میزان آبستگي می‌شود. همچنین با افزایش ۱۲۵ درصدی دبی مورد نظر میزان آبستگي نیز به ۳۲/۲ درصد افزایش پیدا می‌کند.

الف) پروفیل عرضی



پروفیل طولی



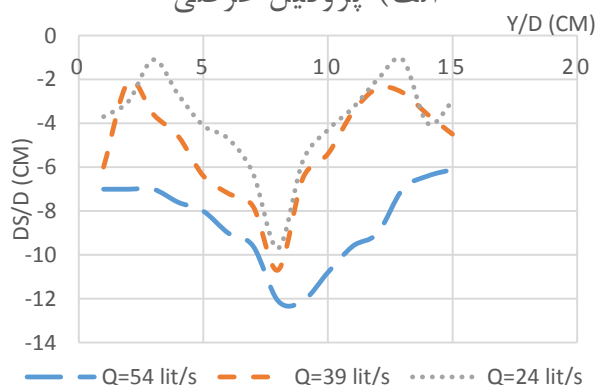
شکل ۸- میزان آبستگي گروه پایه ۳ تایی

آبستگي در اطراف گروه پایه ۵ تایی

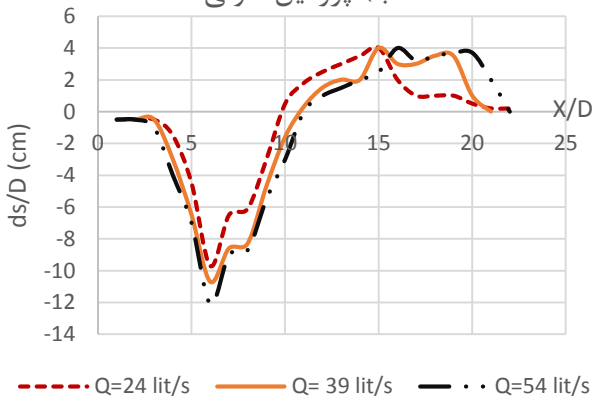
در این گروه پایه، تعداد ۳ آزمایش با ۳ دبی ۲۴، ۳۹ و ۵۴ لیتر بر ثانیه انجام شد. در شکل ۹ منحنی تغییرات انجام شده در گروه

پایه ۵ تایی برای پروفیل عرضی و طولی رسم شده است. شکل ۹- الف، پروفیل عرضی آبستگي را در گروه پایه ۵ تایی با ۳ دبی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، عمق و پهنای حفره آبستگي افزایش می‌یابد. در دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه، حداکثر عمق آبستگي در گروه پایه ۵ تایی ۱۲/۱ سانتی‌متر می‌باشد. برای دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه بیشینه عمق آبستگي برابر با ۹/۷ سانتی‌متر است. با افزایش دبی از ۲۴ به ۵۴ لیتر بر ثانیه، پهنای حفره از حدود ۳۰ به ۵۰ سانتی‌متر افزایش یافته است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، با افزایش دبی، عمق جریان نیز افزایش یافته است (جدول ۱). بنابراین افزایش عمق آبستگي ناشی از اثر توأم هر دو پارامتر می‌باشد و تفکیک سهم هر یک به تنهایی امکان پذیر نیست. دلیل این افزایش، بالا رفتن سرعت جریان و در نتیجه افزایش تنش برشی بستر است. در محدوده دبی مورد بررسی افزایش ۶۲/۵ درصدی دبی، منجر به افزایش ۱۰/۷ درصدی میزان آبستگي می‌شود. همچنین با افزایش ۱۲۵ درصدی دبی مورد نظر میزان آبستگي نیز به ۲۵ درصد افزایش پیدا می‌کند.

الف) پروفیل عرضی



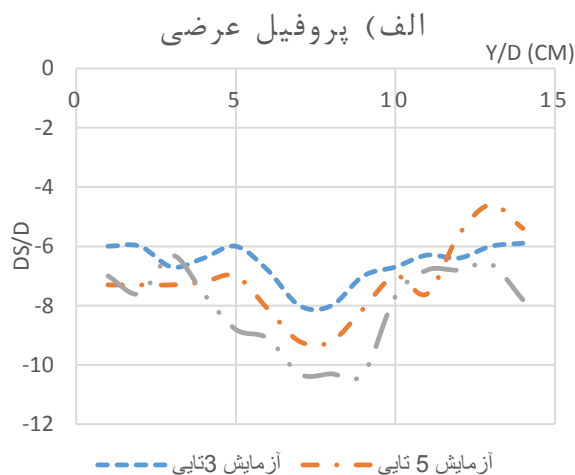
ب) پروفیل طولی



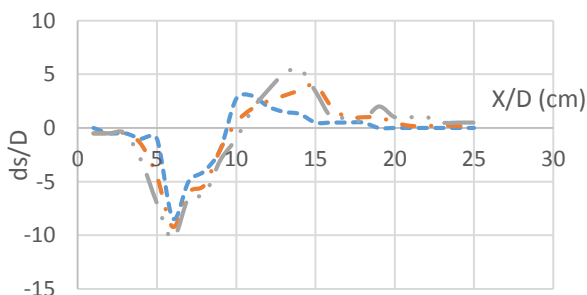
شکل ۹- میزان آبستگي گروه پایه ۵ تایی

۱۱*۱۰*۲ انجام شد. در شکل ۱۱ منحنی تغییرات انجام شده در ۳ گروه پایه در دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است حداکثر عمق آبشستگی در گروه پایه ۳ تایی برابر است با ۱۳/۷ سانتی‌متر، در گروه پایه ۵ تایی ۱۴/۴ سانتی‌متر و در گروه پایه ۶ تایی ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که نسبت به حالت بدون جسم شناور بیشتر می‌باشد. به‌خوبی مشخص است که با افزایش تعداد پایه، حجم آبشستگی بیش‌تر می‌شود. به عبارتی دیگر، حجم آبشستگی با گروه پایه ۶ تایی از آرایش گروه پایه ۵ تایی، و گروه پایه ۵ تایی از گروه پایه ۳ تایی بیش‌تر است. نکته‌ی دیگر، میزان مساحت و پهنای حداکثر عمق آبشستگی است، که با افزایش تعداد پایه در آرایش گروه پایه، این اندازه بیش‌تر می‌شود.

در محدوده دبی مورد بررسی افزایش ۱۲۵ درصدی دبی منجر به افزایش ۱۳۸ درصد میزان آبشستگی گردید.



ب) پروفیل طولی

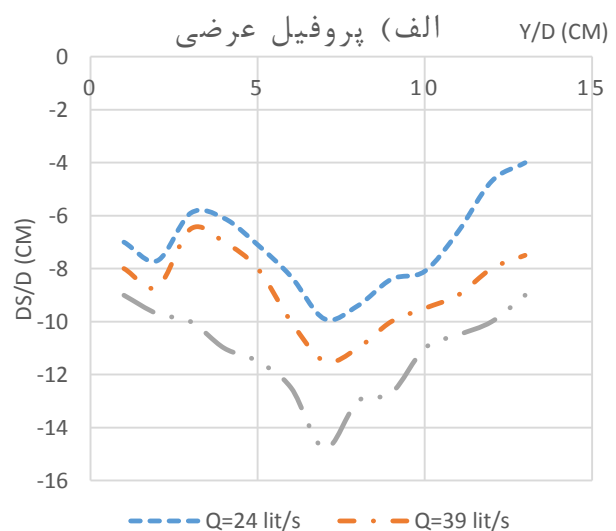


گروه پایه ۳ تایی
گروه پایه ۵ تایی
گروه پایه ۶ تایی

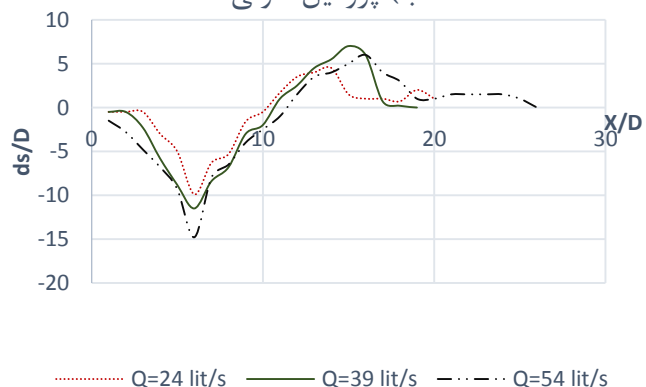
شکل ۱۱- میزان آبشستگی اطراف ۳ گروه پایه در دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه

آبشستگی در اطراف گروه پایه ۶ تایی

در این گروه پایه، تعداد ۳ آزمایش با ۳ دبی ۲۴، ۳۹ و ۵۴ لیتر بر ثانیه انجام شد. در شکل ۱۰ منحنی تغییرات انجام شده در گروه پایه ۶ تایی برای پروفیل عرضی و طولی رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است حداکثر عمق آبشستگی در گروه پایه ۶ تایی ۱۴/۸ سانتی‌متر می‌باشد. برای دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه بیشینه عمق آبشستگی برابر با ۹/۹ سانتی‌متر می‌باشد. در محدوده دبی مورد بررسی افزایش ۶۲/۵ درصدی دبی، منجر به افزایش ۱۷ درصدی میزان آبشستگی می‌شود. همچنین با افزایش ۱۲۵ درصدی دبی مورد نظر میزان آبشستگی نیز به ۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.



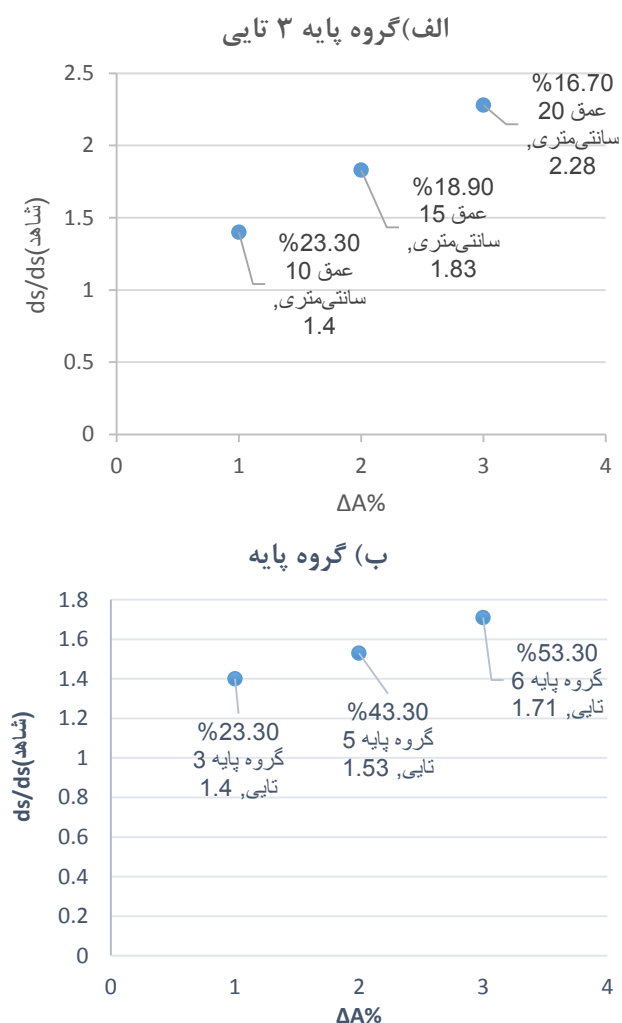
ب) پروفیل طولی



شکل ۱۰- میزان آبشستگی اطراف گروه پایه ۶ تایی

آبشستگی در اطراف گروه پایه ۳، ۵ و ۶ تایی در حضور اجسام شناور

در این گروه پایه، تعداد ۹ آزمایش با ۳ دبی ۲۴، ۳۹ و ۵۴ لیتر بر ثانیه در حضور جسم شناور به صورت مکعب مستطیل با ابعاد ۲۰*۱۵*۲ که در داخل آن مکعبی با ابعاد



شکل ۱۲- درصد انسداد ایجاد شده توسط اجسام شناور (الف)

درصد انسداد در عمق ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متری گروه پایه ۳ تایی
(ب) درصد انسداد سه گروه پایه

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود حضور اجسام شناور تاثیر قابل توجهی بر میزان آبشستگی دارد. این موضوع به خصوص در حجم و شدت آبشستگی در پیرامون پایه های پل ها و همچنین پایه های بالادست در مقایسه با پایه های پایین دست تغییر شکل یافته، قابل توجه است. یعنی مورفولوژی بستر، در حضور اجسام شناور، پستی و بلندی های بیشتری دارد. این موضوع به دلیل جریان پیچیده تر و سرعت بیش تر ناشی از حضور اجسام شناور قابل توجیه است. حضور اجسام شناور، سطح مقطع موثر عبور جریان را کاهش می دهد، در نتیجه سرعت جریان افزایش و الگوی آن پیچیده تر می شود. این موضوع بدون شک افزایش آبشستگی و فرسایش را به دنبال خواهد داشت.

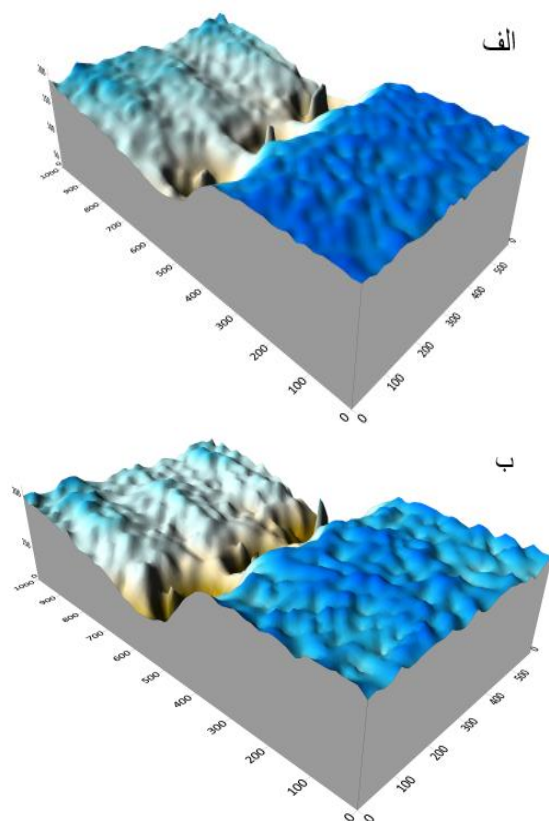
تاثیر عمق آب و میزان درصد انسداد ناشی از اجسام شناور

درصد انسداد ناشی از پایه ها و اجسام شناور یکی از پارامترهای موثر بر افزایش سرعت جریان و در نتیجه تشدید آبشستگی می باشد. در این پژوهش، درصد انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور در اطراف گروه پایه محاسبه گردید. در شکل ۱۲، رابطه بین عمق جریان و درصد انسداد برای گروه پایه ۳ تایی در حضور جسم شناور نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش عمق جریان از ۱۰ به ۲۰ سانتی متر، درصد انسداد از ۲۳/۳ به ۱۶/۷ درصد کاهش می یابد. به دلیل اینکه با افزایش عمق، سطح مقطع کل افزایش می یابد. در حالی که سطح مقطع اشغال شده ثابت می ماند، بنابراین درصد انسداد کاهش می یابد. هر چه درصد انسداد بیشتر باشد (در عمق کمتر)، کاهش سطح مقطع موثر جریان شدیدتر بوده و سرعت جریان افزایش می یابد. این موضوع باعث تشدید آبشستگی در عمق های کمتر می شود. همان طور که در نتایج مشاهده شد، در دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه (عمق ۱۰ سانتی متری) درصد انسداد ۲۳/۳ درصد و در دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه (عمق ۲۰ سانتی متر) درصد انسداد ۱۶/۷ درصد است. این کاهش ۶/۶ درصدی انسداد، تاثیر مستقیمی بر کاهش نرخ افزایش آبشستگی دارد.

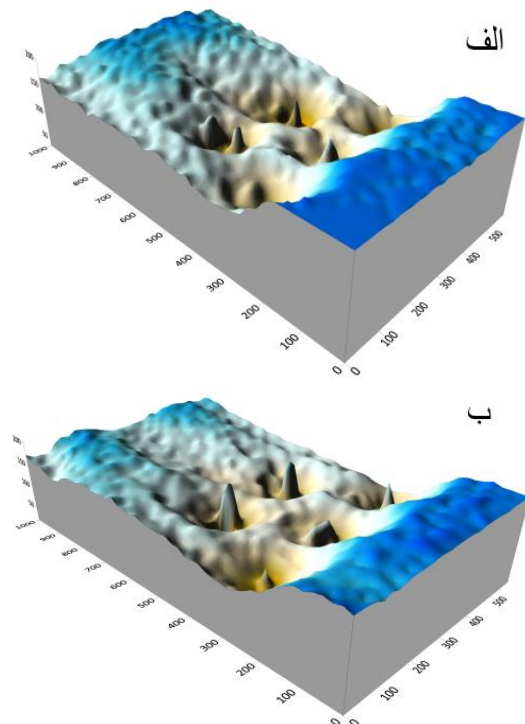
در شکل ۱۲- ب، در صد انسداد برای گروه پایه های ۳، ۵ و ۶ تایی در عمق ۲۰ سانتی متر و در حضور اجسام شناور مقایسه شد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش تعداد پایه از ۳ به ۶، درصد انسداد از ۲۳/۳ به ۵۳/۳ درصد افزایش می یابد. علت افزایش سطح مقطع اشغال شده توسط پایه ها، افزایش تعداد پایه ها در سطح مقطع ثابت است. افزایش درصد انسداد باعث کاهش شدیدتر سطح مقطع موثر جریان و افزایش سرعت موضعی می شود. هر چه درصد انسداد بیشتر باشد، تاثیر اجسام شناور بر میزان آبشستگی بیشتر خواهد بود.

توپوگرافی بستر گروه پایه ۳، ۵ و ۶ تایی با و بدون اجسام شناور

در پایان هر آزمایش، تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف گروه پایه به صورت نمایش سه بعدی با استفاده از نرم افزار Surfer در شکل های ۱۲ تا ۱۴ با و بدون اجسام شناور رسم شده است.



شکل ۱۳- آبشستگی گروه پایه ۳ تایی (الف) بدون جسم اجسام شناور (ب) با اجسام شناور



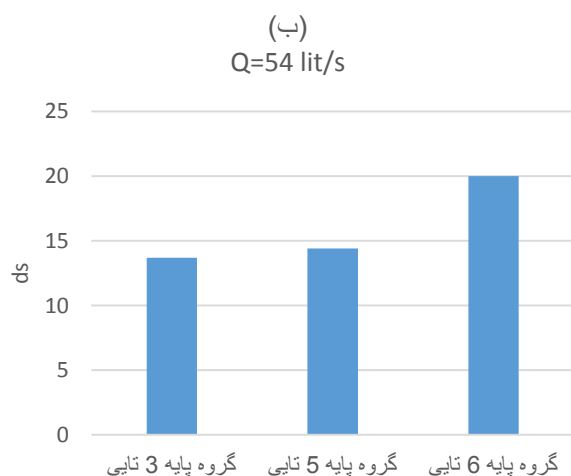
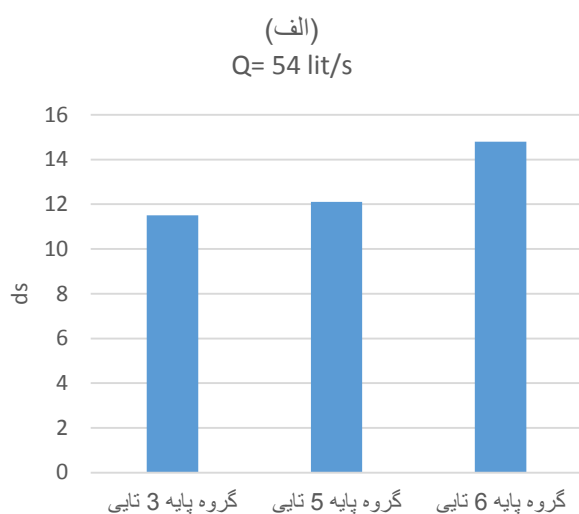
شکل ۱۴- آبشستگی گروه پایه ۵ تایی (الف) بدون اجسام شناور (ب) با اجسام شناور

برای گروه پایه ۵ تایی همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، میزان تغییر حجم کم‌تر است. نکته مهم این است که با افزایش تعداد پایه‌ها در آرایش گروه پایه، پایه‌های پل، مکانیزم غالب کنترل کننده آبشستگی هستند. لازم به ذکر است که آبشستگی در حضور اجسام شناور افزایش داشته است.

برای گروه پایه ۶ تایی همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پایه‌ها، با حضور اجسام شناور، در مقایسه با تعداد پایه‌های کمتر در سطح مقطع کلی یکسان، سطح مقطع موثر عبور جریان تغییر چندانی نمی‌کند. به صورت کلی، هرچه نسبت سطح مقطع موثر عبور جریان به سطح مقطع کلی بیشتر باشد، تاثیر اجسام شناور بیش‌تر است. به عنوان مثال، اگر در آرایش گروه پایه ۳ تایی، ۳۰ درصد کل مقطع عبور آب اشغال شود (سطح مقطع موثر ۷۰ درصد) و در آرایش ۵ تایی، ۵۰ درصد کل مقطع عبور آب اشغال شود (سطح مقطع موثر ۵۰ درصد)، از آنجا که سطح مقطع موثر در آرایش ۳ تایی بیش‌تر است، این آرایش تاثیر بیشتری از اجسام شناور می‌پذیرد. دلیل این امر آن است که در گروه پایه ۳ تایی، فضای بیش‌تری بین پایه‌ها وجود دارد. این فضاها به اجسام شناور اجازه می‌دهند که به راحتی بین پایه‌ها نفوذ کرده و در جلوی پایه‌ها تجمع یابند. در مقابل در گروه پایه با تراکم بالاتر (مثلاً گروه پایه ۶ تایی با سطح مقطع موثر کمتر)، فاصله بین پایه‌ها آنقدر کم است که اجسام شناور زودتر به دام افتاده و سطح مقطع موثر را بیش‌تر کاهش می‌دهند، اما به دلیل نبود فضای کافی برای حرکت، تاثیر نسبی کمتری بر هر پایه دارند. دلیل افزایش آبشستگی در گروه پایه ۶ تایی، کاهش فاصله مؤثر بین پایه‌ها و هم‌پوشانی میدان‌های گردابی است. در آرایش ۶ تایی، گرداب‌های نعل‌اسبی پایه جلویی با گرداب‌های برخاستگی پایه‌های پشتی تداخل کرده و یک ناحیه جریان چرخشی قوی ایجاد می‌کنند که رسوبات را از بین پایه‌ها به سمت پایین دست منتقل می‌کند. (در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نقاط مرتفع مشاهده شده در محل پایه‌ها مربوط به خود پایه بوده و نباید به عنوان رسوب‌گذاری یا برآمدگی بستر تلقی شوند).

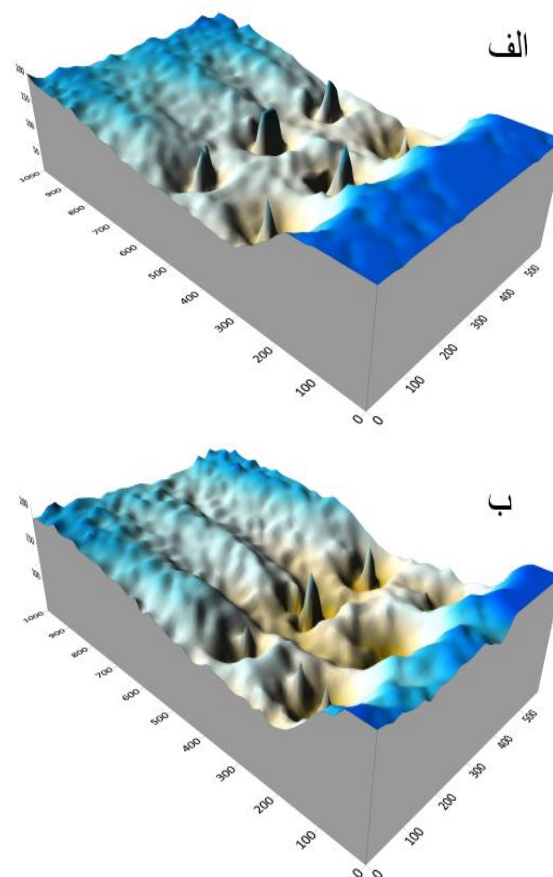
بیشتر است. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت نسبی جریان (سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت)، عمق و حجم گودال آبشستگی افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان آبشستگی مربوط به گروه پایه ۶ تایی و کمترین میزان آن مربوط به گروه پایه ۳ تایی است. به همین ترتیب برای گروه پایه همراه با اجسام شناور از نظر میزان آبشستگی گروه پایه ۶ تایی بیشترین و گروه پایه ۳ تایی کمترین میزان آبشستگی را دارند.



شکل ۱۶- (الف) حداکثر عمق آبشستگی بدون اجسام شناور
(ب) حداکثر عمق آبشستگی با اجسام شناور

در آزمایش‌های محدوده دبی مورد بررسی، با افزایش دبی از ۲۴ به ۵۴ لیتر بر ثانیه (معادل ۱۲۵ درصد افزایش) و با توجه به نتایج جدول ۳، نشان داده شده است که میزان آبشستگی در حضور و عدم حضور اجسام شناور، وابسته به تعداد پایه در گروه پایه‌ها است. گروه پایه‌های متعدد بیشترین آسیب را در برابر تشدید آبشستگی دارند. گروه



شکل ۱۵- آبشستگی گروه پایه ۶ تایی (الف) بدون اجسام شناور
(ب) با اجسام شناور

مقایسه میزان عمق آبشستگی اطراف ۳ گروه پایه

مشخص شد که در دبی‌های کم، میزان آبشستگی کمتر است و با افزایش دبی حجم و عمق گودال آبشستگی در ۳ گروه پایه افزایش می‌یابد. حداکثر آبشستگی در آرایش ۶ تایی می‌باشد. به عبارتی، در دبی‌های کم‌تر، آرایش ۵ تایی عملکرد بهتری داشت، یعنی حجم و گودال آبشستگی کمتر بود اما در دبی بالاتر، آرایش ۳ تایی منظم‌تر بود. به عبارت دیگر، در آرایش ۵ تایی، یک قسمت باریک و عمیق وجود دارد، اما در آرایش‌های ۳ تایی و ۶ تایی، این قسمت عمیق پهن‌تر است.

همچنین می‌توان گفت، محل حداکثر عمق در دبی‌های مختلف آرایش گروه پایه ۳ تایی، تقریباً در یک محل بوده است، در حالی که در گروه پایه ۵ تایی، محل حداکثر عمق آبشستگی متغیر است، نتایج نشان می‌دهد که این پدیده به الگوی پیچیده‌تر جریان در آرایش‌های با تعداد پایه‌های بیش‌تر مرتبط است، به عبارت دیگر، با توجه به تعداد پایه‌ی بیشتر، در دبی‌های مختلف جریان، الگوی جریان هم تغییر خواهد کرد. همچنین در گروه پایه ۶ تایی، میزان آبشستگی بیشتر می‌باشد در نتیجه حجم و عمق گودال آبشستگی هم

رسوبات از اطراف پایه می‌شود. در محدوده دبی مورد بررسی افزایش ۱۲۵ درصدی دبی منجر به افزایش ۹۴/۱۷ درصد میزان آبشستگی گردید.

جدول ۳- میزان آبشستگی با افزایش دبی از ۲۴ تا ۵۴ لیتر بر ثانیه

پایه	بدون جسم شناور	با جسم شناور
گروه پایه ۳ تایی	۳۲/۱۸	۶۳/۱۰
گروه پایه ۵ تایی	۲۴/۷۴	۵۶/۵۲
گروه پایه ۶ تایی	۴۹/۴۹	۹۴/۱۷

جدول ۴، نسبت‌های بی بعد تغییرات حداکثر عمق آبشستگی به قطر پایه در مقابل عدد بی بعد فرود، سرعت متوسط جریان به سرعت آستانه حرکت و همچنین سه عمق مختلف آزمایش شده به قطر پایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود برای بستر زنده عدد فرود و سرعت متوسط جریان به سرعت آستانه حرکت رسوبات برای ۳ دبی مختلف (۲۴، ۳۹ و ۵۴ لیتر بر ثانیه)، تقریباً برابر است با این تفاوت که با افزایش دبی میزان آبشستگی به قطر پایه افزایش یافته است. همچنین برای عمق‌های مختلف (۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر)، هر چه نسبت عمق به قطر پایه افزایش پیدا کند، میزان حداکثر عمق آبشستگی به قطر پایه نیز افزایش می‌یابد.

پایه ۶ تایی بیشترین درصد میزان آبشستگی را با اجسام شناور ۹۴/۱۷ درصد و بدون اجسام شناور ۴۹/۴۹ درصد افزایش داده است. علت اصلی این امر تراکم پایه‌ها و ایجاد فضاهای مسدود شده بین آن‌ها است که هنگام وجود جسم شناور، جریان را مجبور به کانالی شدن شدید در اطراف یا بین پایه‌ها می‌کند. این امر منجر به تولید گردابه‌های قوی‌تر و فرسایش سریع‌تر بستر می‌شود. با افزایش تعداد پایه، به خوبی مشخص است که حجم آبشستگی بیشتر می‌شود، به عبارتی، حجم آبشستگی با گروه پایه ۶ تایی از آرایش گروه پایه ۵ تایی، و گروه پایه ۵ تایی از گروه پایه ۳ تایی بیش‌تر است. نکته‌ی دیگر، میزان مساحت و پهنای حداکثر عمق آبشستگی است، که با افزایش تعداد پایه در آرایش گروه پایه، افزایش می‌یابند. اما این نکته را باید در نظر داشت که با افزایش تعداد پایه‌ها، به دلیل پیچیدگی بیشتر الگوی جریان و افزایش سرعت جریان (ناشی از کاهش مقطع جریان) و همچنین انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور، عمق آبشستگی در آرایش‌های با تعداد پایه بالاتر بیشتر خواهد بود. همچنین برخورد جریان به اجسام شناور باعث تشکیل گرداب نعل اسبی به سمت بستر در جلو پایه و رو به پایین می‌شود که در نهایت باعث شسته شدن بیشتر

جدول ۴- نسبت‌های بی بعد ۳ گروه پایه

نوع پایه	$\frac{U}{U_c}$	$\frac{y}{D}$	Fr	$\Delta A\%$	$\frac{d_s}{D}$
گروه پایه ۳ تایی	۲	۱/۶۶	۰/۴	۲۳/۳	۱/۴
گروه پایه ۳ تایی	۱/۹۵	۲/۵	۰/۳۵	۱۸/۹	۱/۸۳
گروه پایه ۳ تایی	۱/۹۵	۳/۳۳	۰/۳۲	۱۶/۷	۲/۲۸
گروه پایه ۵ تایی	۲	۱/۶۶	۰/۴	۴۳/۳	۱/۵۳
گروه پایه ۵ تایی	۱/۹۵	۲/۵	۰/۳۵	۳۸/۹	۲/۱۱
گروه پایه ۵ تایی	۱/۹۵	۳/۳۳	۰/۳۲	۳۶/۷	۲/۴
گروه پایه ۶ تایی	۲	۱/۶۶	۰/۴	۵۳/۳	۱/۷۱
گروه پایه ۶ تایی	۱/۹۵	۲/۵	۰/۳۵	۴۸/۹	۲/۰۸
گروه پایه ۶ تایی	۱/۹۵	۳/۳۳	۰/۳۲	۴۶/۷	۳/۳۳

این وجود قرار گرفتن نتایج این پژوهش در محدوده کلی مطالعات پیشین، نشان‌دهنده اعتبار نسبی روش آزمایشگاهی به کار رفته است.

به‌طور کلی، اگرچه مقایسه کمی اعداد به دلیل تفاوت در شرایط آزمایش با محدودیت مواجه است، اما روند کلی افزایش آبشستگی در حضور اجسام شناور در این پژوهش با یافته‌های قبلی همخوانی دارد.

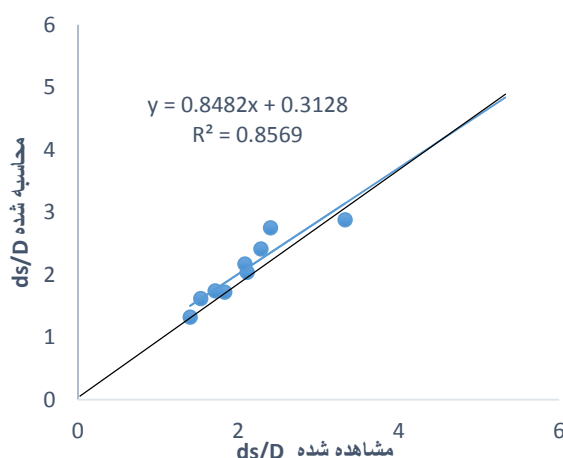
نتایج افزایش عمق آبشستگی ناشی از تجمع اجسام شناور در این پژوهش با سه مطالعه معتبر دیگر در جدول ۵، آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، افزایش آبشستگی در گروه پایه ۶ تایی، ۳۵/۱ درصد و در گروه پایه ۳ تایی، ۱۹ درصد است. البته مقایسه مستقیم اعداد به دلیل تفاوت در نوع پایه (تک پایه در مقابل گروه پایه)، شرایط هیدرولیکی و ابعاد اجسام شناور باید با احتیاط انجام شود. با

جدول ۵- مقایسه افزایش عمق آبشستگی ناشی از تجمع اجسام شناور در پژوهش‌های مختلف با پژوهش حاضر

منبع	نوع پایه	عدد فرود (Fr)	ابعاد اجسام شناور	افزایش آبشستگی %
Lagasse et al. (2010)	تک پایه استوانه‌ای	۰/۳۵ - ۰/۲۵	مکعب متوسط	تا ۴۰
Panici et al. (2020)	تک پایه استوانه‌ای	۰/۳۰ - ۰/۲۰	چوب و کنده	۵۵ - ۲۵
Ma & Zhang (2022)	تک پایه مربعی	۰/۴۰ - ۰/۳۰	مکعب بزرگ	۶۰ - ۳۰
پژوهش حاضر	گروه پایه ۳ تایی	۰/۴۰	۲۰*۱۵*۲	۱۹
پژوهش حاضر	گروه پایه ۶ تایی	۰/۴۰	۲۰*۱۵*۲	۳۵/۱

لازم به تاکید است که محدوده‌های فیزیکی، هیدرولیکی و هندسی موجود در این آزمایش‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. این محدوده‌ها شامل بازه تغییرات نسبت عمق جریان به قطر پایه h/D (از ۱/۶۷ تا ۳/۳۳)، عدد فرود Fr (از ۰/۳۲ تا ۰/۴۰)، نسبت سرعت U/U_c (از ۱/۹۵ تا ۲)، درصد انسداد اجسام شناور (۱۶/۷ تا ۵۳/۳ درصد) و همچنین قید مربوط به یکنواخت بودن رسوبات و نوع هندسه اجسام شناور می‌باشد. همچنین تأکید می‌شود که این رابطه مختص بستر در شرایط بیش از آستانه حرکت (بدون تزریق رسوب) بوده و برای شرایط آب زلال اعتبار ندارد.

شکل ۱۷، حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده در برابر حداکثر عمق آبشستگی 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 آبشستگی برای تخمین عمق آبشستگی برای سه گروه پایه از دقت بالایی برخوردار بوده و به درستی به کار رفته است.



شکل ۱۷- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برآورده شده از مدل و حداکثر عمل آبشستگی مشاهده شده در آزمایش

برازش ریاضی داده‌های عمق آبشستگی در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی این پژوهش

در اینجا هدف یافتن رابطه مناسب برای پیش‌بینی عمق آبشستگی با استفاده از آنالیز ابعادی در جلو ۳ گروه پایه استوانه‌ای است. با استفاده از نرم افزار SPSS و رگرسیون خطی رابطه (۸) به دست آمد که بیشترین R^2 (۰/۸۵) و کمترین خطا را نشان می‌دهد. میزان R^2 در این رابطه نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی در محدوده قابل قبول برای پیش‌بینی عمق آبشستگی قرار دارد.

$$\frac{ds}{D} = 0.100 \left(\frac{U}{U_c} \right)^{0.888} + 0.100 \left(\frac{y}{D} \right)^{2.271} + 2.667 (Fr)^{17.098} + 16.804 (\Delta A\%)^{0.497} \quad (8)$$

برای ارزیابی دقت مدل و بررسی وجود سوگیری در پیش‌بینی‌ها از روابط (۹) و (۱۰) استفاده شده است.

$$MFE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{\wedge}) \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{\wedge})^2} \quad (10)$$

در روابط بالا MFE بیانگر میانگین خطای پیش‌بینی شده و RMSE بیانگر ریشه میانگین مربعات خطا، y_i بیانگر حداکثر عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده و $y_i^{\wedge}$ بیانگر حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط مدل و n تعداد مشاهدات است. هرچه MFE و RMSE به صفر نزدیکتر باشند یعنی مدل از دقت بالاتری برخوردار است. اگر مقدار این دو پارامتر صفر شود، یعنی مدل بدون خطا بوده است. در این مدل مطابق با جدول ۶، مقدار هر دو پارامتر مذکور نزدیک صفر و برابر با ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۱ به دست آمده که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است.

جدول ۶- میزان خطای محاسبه شده

نوع پایه	R^2	MFE	RMSE
گروه پایه	۰/۸۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میزان آبشستگی با ۱۸ آزمایش اطراف گروه پایه بررسی و سپس نتایج به دست آمده تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که حضور اجسام شناور در اطراف پایه‌های پل اثر قابل توجهی بر فرآیند آبشستگی دارد. در حالت کلی، افزایش تعداد پایه‌ها و پیچیده‌تر شدن آرایش آن‌ها سبب تغییر الگوی جریان و افزایش گستره و حجم آبشستگی می‌شود، هرچند شدت این افزایش در آرایش‌های متراکم‌تر (۵تایی و ۶تایی) کمتر از آرایش‌های ساده‌تر (۳تایی) بوده است. به عبارت دیگر، در تعداد پایه‌های بیشتر، مکانیزم غالب کنترل‌کننده آبشستگی خود پایه‌ها هستند و تاثیر اجسام شناور بر الگوی جریان کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که اجسام شناور بسته به شرایط می‌توانند نقش متضادی ایفا کنند، به گونه‌ای که در برخی موارد با کاهش سطح مقطع عبور جریان و تشدید گردابه‌های موضعی باعث افزایش عمق آبشستگی شدند. با بررسی گروه پایه در دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه بیشترین آبشستگی برای گروه پایه ۶ تایی با و بدون اجسام شناور و کمترین آبشستگی مربوط به گروه پایه ۳ تایی بوده است.

محدودیت‌های پژوهش

از محدودیت‌های اصلی این پژوهش، عدم وجود سیستم تزریق در بالادست است. بنابراین نتایج برای شرایط جریان بیش از آستانه حرکت با بستر متحرک محدود معتبر بوده و تعمیم آن به بستر زنده استاندارد نیازمند مطالعات تکمیلی با تزریق رسوب می‌باشد. همچنین با توجه به عدم تکرار آزمایش‌ها امکان تحلیل آماری پیشرفته (مانند ANOVA) وجود ندارد. بنابراین تنها آمار توصیفی (میانگین و درصد افزایش) گزارش شده است. بنابراین تعمیم دقیق عددی آن نیازمند احتیاط است. از آنجا که اندازه‌گیری میدان سرعت انجام نشد، تحلیل بر اساس توپوگرافی بستر، عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده و سرعت متوسط جریان صورت گرفته است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از کارشناسان مجله پژوهش آب ایران برای همکاری در روند انتشار مقاله قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: انجام مراحل آزمایشگاهی

نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

نویسنده سوم: مشاوره و بازبینی متن مقاله

نویسنده چهارم: مشاوره و بازبینی متن مقاله

نویسنده پنجم: تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها و بازبینی متن مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

- 1-Ahadiyan, J., Adeli, A., Bahmanpouri, F., and Gualtieri, C., 2018. Numerical Simulation of Flow and Scour in a Laboratory Junction. *Geosciences*, 8(5), 162. <https://doi.org/10.3390/geosciences8050162>
- 2-Badir, Z., Asadi-Aghbolaghi, M., and Ghanbari Adivi, E., 2025. Experimental investigation of the effect of wedge-shaped debris on scour depth of square-shaped bridge piers. *Iranian Water Research Journal*, 19(4), 19-38. [in Persian] . <https://doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15163.2675>
- 3- Chiew, Y. M. and Melville, B. W., 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 25(1), pp.15-26. <https://doi.org/10.1080/00221688709499285>
- 4-Ghanbari Adivi, E. and khosravi, M., 2026. A Comprehensive Review of Bridge Pier Scouring: Analysis of Mechanisms and Flow Patterns, Key Factors, Challenges, and Protective Measures *Iranian Water Research Journal*, e116690. [in Persian] <https://doi.org/10.22034/iwrj.2026.14891.2628>
- 5-Hosseini, R. and Amini, A., 2015. Scour depth estimation methods around pile groups. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(7), pp.2144-2156. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0594-7>
- 6-Hosseini Matin, S.M., Bahrami Yarahmadi, M., Ghomeshi, M. and Shafai Bejestan, M., 2024. Experimental study of the effect of transverse distance between the rectangular piers on local scour around them. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(2), pp. 43-58. <https://doi.org/10.22126/ATWE.2024.10621.1123>

- 52(109), pp. 215-224.
<https://doi.org/10.22034/jcee.2020.11225>.
- 20- Dastourani, M. and Shirzadi, F., 2024 'Experimental investigation of the threshold of sediment motion on rough bed and the effect of temperature on the Shields diagram', *Iranian Water Research Journal*, 17(4), pp. 31-39. [in Persian]
<https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2023.14396.2530>
- 21- Shafaei Bejestan, M., 2015. Theoretical and Practical Foundations of Sediment Transport Hydraulics, Shahid Chamran University of Ahvaz Press. [in Persian].
- 22- Oliveto, G. and Hager, W.H., 2005. Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), pp. 97-105. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(97))
- 23- Tamoradi, Z. and Ahadiyan, J., 2022. The Effect of Injection Discharge to Reduce the Bend Scour Using the Water Injection Technique. *Water Resources*, 49, pp. 422-428. <https://doi.org/10.1134/S0097807822030150>.
- 24- Tamoradi, Z. and Ahadiyan, J., 2021. Effect of water and air injection on the reduction of bend scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(7): pp.740-748. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0429>.
- 25- Tamoradi, Z., Ahadiyan, J., Najarchi, M., Hasounizadeh, H. and Najafizadeh, M.M., 2019a. Reducing bend scour using in-phase and out-of-phase hydraulic jets. *Water Supply*, 19(5), pp.1446-1453. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.014>.
- 26- Tamoradi, Z., Ahadiyan, J., Najarchi, M., Hassoni, H. and Najafizadeh, M.M., 2019b. Effect of same phase hydraulic jet on reduction of scour in 180-degree bend. *Journal of Hydraulics*, 13(4), pp. 57-68. [in Persian] <https://doi.org/10.30482/jhyd.2019.82711>.
- 27- Okhravi, S. S. and Gohari, S., 2020. Local Scour Around Single-Column Bridge Piers. *Water and Soil Science (Agricultural and Natural Resources Sciences and Technologies)*, 24(4), pp.57-73. <https://sid.ir/paper/386430/fa>
- 28- Parchami, L., Asghari Pari, S.A. and Shafai Bajestan, M., 2017. Experimental investigation of submerged vanes shape effect on bridge pier scouring. *Water and Soil Science (University of Tabriz)*, 27(1), pp. 29-41. [in Persian].
https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_6203_en.html
- 29- Panici, D., Kripakaran, P., Djordjević, S. and Dentith, K., 2020. A practical method to assess risks from large wood debris accumulations at bridge piers. *Science of the Total Environment*, 728, 138575. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138575>
- 30- Raudkivi, A. J. and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic engineering*, 109(3), pp.338-350. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))
- 7- Jalili, A., 2013. Effect of using netted collar on bridge piers scouring. *Shahid Chamran University of Ahvaz*. [in Persian]. <https://library.scu.ac.ir>
- 8- Jalaeeqar, P., Aghaee-Shalmani, Y. and Basirat, S., 2025. Investigation of the effect of compaction and non-uniformity of Non-adhesive sediments on scour downstream of the triangular labyrinth weir. *Iranian Water Research Journal*, 56, pp. 103-114. [in Persian]. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15106.2666>
- 9- Jame, M., Ahadian, J. and Solamani, M.B., 2013. Experimental study of scouring pattern due to circular submerged jet in shallow ambient fluid. *Bulletin of Environmental Pharmacology and Life Sciences*, 3(1), pp. 103-108. <https://bepls.com/dec2013/19.pdf>
- 10- Johnson, P.A., Clopper, P.E., Zevenbergen, L.W. and Lagasse, P.F., 2015. Quantifying uncertainty and reliability in bridge scour estimations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(7), pp. 04015013. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001017](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001017)
- 11- Kayaturk, S.Y., 2005. *Scour and scour protection at bridge abutments* (Doctoral dissertation, Middle East Technical University (Turkey)). <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12605834/index.pdf>
- 12- Kumar, V. and Raju, K.G.R., 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), pp. 1302-1305. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:12\(1302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:12(1302))
- 13- Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Zevenbergen, P.E., Spitz, W.J. and Girard, L.G., 2010. Effects of Debris on Bridge Pier Scour. *Transportation Research Board*, 10, pp.854-863. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)85](https://doi.org/10.1061/41147(392)85)
- 14- Laursen, E. M. and Toch, A., 1956. Scour around bridge piers and abutments. *Ames, IA: Iowa Highway Research Board*.
<http://publications.iowa.gov/id/eprint/20237>
- 15- Liaghatian, S.H. and Zolfaghari Far, S.Y., 2022. Investigation of local scour control methods around bridge piers located in the Pirzal Gorge area of Charam. *The Ninth International Conference on New Researches in Civil Engineering, Architecture, Urban Management, and Environment, Tehran*. [in Persian]. <https://civilica.com/doc/1488076>
- 16- Ma, X. and Zhang, W., 2022. Dynamic amplification responses of short span bridges considering scour and debris impacts. *Engineering Structures*, 252, 113644. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113644>
- 17- Grimaldi, C., Cardoso, A.H., 2010. Methods for local scour depth estimation at complex bridge piers. In *Proceedings of 1st IAHR European Division Congress*, pp. 1-6. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=10905>
- 18- Maleki, P., Ahadiyan, J., Aleixo, R., Azizi Nadian, H., Tamoradi, Z., Kashefipour, S. M., Schleiss, A. J. and Fathi Moghadam, M., 2025. Scour Control in a 90° Bend by Means of an Air Bubble Screen. *Water*, 17(18), 2693. <https://doi.org/10.3390/w17182693>.
- 19- Maleki, P., Ahadiyan, J., Kashefipour, S. M., Fathi Moghadam, M. and Schleiss, A., 2023. The Effect of the an Air-bubble Screen on Flow Pattern and Secondary Flow Strength and Bed Shear Stress in a 90 Degree Mild Bend. *Journal of Civil and Environmental Engineering*,

