

Experimental investigation of the effect of wedge-shaped debris on scour depth of square-shaped bridge piers

Z. Badir¹, M. Asadi-aghbolaghi^{2*} and E. Ghanbari-adivi³

Extended Abstract

Introduction:

Scour around bridge piers is the main reason of bridges destruction. Hydraulic structures act as obstacles to the flow of water near the structure, so that the flow pattern changes and locally causes scour around the bridge pier. Moreover, floating debris are gradually carried by the flow and accumulate around the bridge piers. The shape of the channel as well as the position and the geometry of the bridge pier significantly affect the accumulation of floating debris and tree foliage in front of the bridge pier. The main parameters which affect the scour depth around bridge piers are flow intensity, characteristics of bed sediments, and bridge pier geometry. Previous researches indicated that the maximum scour depth for a sharp nose bridge pier located at the lateral corners of the base, between the nose and the corner. Also, wedge shape debris resulted in a lower scour depth than the rectangular ones due to the less deviation of the flow towards the base.

Materials and Methods:

The experiments were carried out in Shahrekord University laboratory. A rectangular flume was set up with galvanized floor and glass walls. The flume had a length of 20 meters, a width and height of 60 cm, and a constant bed slope of 0.1%. A total number of 52 experiments were conducted under clear water conditions, with and without debris (control sample). A square shape pier with 9 cm side was applied. The bed was covered with 160 mm of sand, with an average sediments particle size of 0.75 mm. The flow depth was kept constant at 20 cm with flow rates of 10, 20, 30 and 40 Lit/s. To simulate wedge-shaped debris, pieces of wood were placed in wedge-shaped net racks in four different sizes (varying in length and width, with a constant height). These debris were installed in front of the square base at three positions: above, below, and at the water surface. Scour depth was measured using a caliper to ensure accuracy. A dimensional analysis was conducted using the Buckingham π theorem to develop a predictive equation for scour depth around a sharp-nose square bridge pier in presence of wedge shape debris.

Results and discussions:

The duration of all experiments in this research was seven hours. To achieve the goals of the research and facilitate better analysis of the results, the initial tests were conducted without floating objects by the flow rates of 10, 20, 30 and 40 Lit/S. Subsequent experiments were carried out in the presence of floating objects in different dimensions and positions (above, below and at the water surface), in front of the square base. It was observed that the floating objects increased the length, width, and depth of the scour hole, and consequently its volume. The level and dimensions of the floating objects in front of the pier had a great impact on the maximum scour depth. Comparison of the three positions of the floating objects in front of the pier indicated that the objects above the water surface created the minimum scour depth, while in cases of the floating objects below the water surface the maximum scour depth occurred. This trend was observed for all the experiments with different debris dimensions. According to the longitudinal and transverse profile of the scour, when the

1- Master's student in water structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran.

3- Associated Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran.

*- Corresponding author: asadi.mehdi@sku.ac.ir

Received: 2025/04/13

Accepted: 2025/07/09

object was positioned under the water surface, the scour hole was formed upstream towards the pier, with a gradually steep slope. For the cases in which debris were located above the water level, the slope was formed more slowly. Also, according to the final changes of the bed profile, for objects with larger dimensions, a larger scour depth was obtained; therefore, more sedimentation happened across the channel. Finally, an equation was extracted to predict scour depth around bridge piers in presence of wedge shape debris, using the results of dimensional analysis and a linear regression with SPSS software. The results of the equation showed the highest R^2 and the lowest mean square error. Comparing the maximum measured scour depth with the calculated results by the equation confirmed the accuracy of the equation.

Conclusion:

In this study, the scour depth in front of a square pier was investigated without (control sample) and with floating debris in three positions. For different positions of floating objects (below, above and at the water surface level), scour development during time and equilibrium scour depth were measured. The results indicated that 75% of the scouring rate occurred in the first hour, after that the scour depth slowly increased until it stabilized at 420 minutes. Larger debris dimensions resulted in the greater scouring depth around the pier. The transverse dimension had the greatest effect for wedge-shaped objects. The lowest scour depth was observed in the control sample. The accumulation of debris at the three positions of above the surface, at the same level and below the water surface were 1.4, 1.3 and 3.6 times that of the control sample, respectively. The maximum scour depth occurred in the position in which the debris were located below the water surface.

Keywords: Bridge pier, Clear water scour, Dimensional analysis, Debris accumulation, Laboratory study.

Citation: Badir, Z., Asadi-agholaghi, M., Ghanbari-adivi, E., 2026. Experimental investigation of the effect of wedge-shaped debris on scour depth of square-shaped bridge piers. *Iranian Water Research Journal*. 19(59). pp: 19-38. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15163.2675>

Copyright:

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



بررسی آزمایشگاهی تاثیر اجسام شناور گوه‌ای شکل بر روی آبشستگی پایه پل مربعی

زینب بدیر^۱، مهدی اسدی آقبلاغی^{*} و الهام قنبری عدیوی^۳

چکیده

پل‌ها یکی از مهمترین سازه‌ها در چرخه حمل و نقل می‌باشند و آبشستگی در اطراف پایه‌های پل یکی از مهمترین عوامل خرابی پل‌ها به شمار می‌رود. پل‌های زیادی در سراسر جهان به دلیل آبشستگی در اطراف پایه‌ها تخریب شده‌اند. بنابراین، تخمین عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها اهمیت زیادی دارد. هدف از این پژوهش، تحلیل و بررسی تاثیر اجسام شناور گوه‌ای شکل روی آبشستگی پایه مربعی است. بررسی آزمایشگاهی اثر اجسام شناور گوه‌ای شکل با طول و عرض متفاوت و ارتفاع ثابت در جلوی پایه مربعی با عرض نسبی (عرض پایه به عرض کانال) ۰/۱۵ انجام شد. ۵۲ آزمایش در دو حالت با اجسام شناور و بدون حضور اجسام شناور (نمونه شاهد) در شرایط آب زلال با دبی‌های مختلف و با سرعت نسبی (سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت)، ۰/۲۱۳، ۰/۴۲۷، ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۸ و در ۳ موقعیت (زیر سطح آب، هم سطح آب و بالای سطح آب) انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت نسبی جریان، عمق و حجم گودال آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین تجمع اجسام شناور در اطراف پایه پل باعث افزایش عمق و حجم گودال آبشستگی نسبت به عدم حضور اجسام شناور (نمونه شاهد) می‌شود. افزایش عرض جسم شناور باعث افزایش میزان آبشستگی در اطراف پایه پل می‌شود. قرار گرفتن جسم شناور در زیر سطح آب بیشترین آبشستگی را نسبت به جسم شناور بالای سطح آب ایجاد می‌کند. بیشینه عمق آبشستگی برای جسم در موقعیت زیر سطح آب ۳/۶، جسم در موقعیت هم سطح آب ۳/۱ و در موقعیت بالای سطح آب ۱/۴ برابر نسبت به نمونه شاهد است. همچنین با استفاده از تحلیل ابعادی معادله جدیدی برای پیش‌بینی عمق آبشستگی با تجمع اجسام شناور در جلوی پایه مربعی ارائه شد.

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

ارجاع:

بدیر، ز.، اسدی آقبلاغی، م.، قنبری عدیوی، ا.، ۲۰۲۶. بررسی آزمایشگاهی تاثیر اجسام شناور گوه‌ای شکل بر روی آبشستگی پایه پل مربعی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹ (۵۹) ص: ۳۸-۱۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15163.2675>

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

^{*} نویسنده مسئول: asadi.mehdi@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

مقدمه

آبشستگی عامل اصلی تخریب پل‌ها می‌باشد. بحث آبشستگی با توجه به شرایط و پیچیدگی‌های متعدد و نبودن رابطه‌ی مناسب برای تمام شرایط آن از سال‌های قبل مورد توجه و بررسی محققین علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه می‌باشد. سازه‌های هیدرولیکی به‌صورت مانعی در برابر جریان آب قرار می‌گیرند و در نزدیکی سازه الگوی جریان تغییر کرده و به‌صورت موضعی باعث آبشستگی در اطراف سازه می‌شوند (Vice president for strategic planning and supervision., 2016).

مطالعات صورت گرفته روی ۵۰۰ پل در ایالات متحده بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۰ نشان می‌دهد که بیشترین علت شکست پل، سیل و آبشستگی بوده است (Wardhana and Hadipriono (2003). ۷۰ درصد هزینه‌های شکست پل در نیوزلند مربوط به آبشستگی در اطراف پایه بوده است (Melvill (1997). با توجه به مطالعات (Kayaturk (2005 عامل اصلی تخریب پل، آبشستگی می‌باشد. 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).

بررسی پارامترهای شدت جریان، مشخصات رسوبات بستر، هندسه پایه پل و میزان توسعه آبشستگی موضعی توسط (Melvill (1997 نشان داد این پارامترها بر میزان عمق آبشستگی تاثیر زیادی دارند. در جریان‌های عمیق‌تر قدرت گرداب نعل اسبی بیشتر می‌شود. جریان رو به پایین مرتبط با عرض پایه می‌باشد در کل عمق آبشستگی به عرض پایه بستگی دارد. در بررسی اثر زبری رسوبات یکنواخت می‌توان گفت که زبری تاثیری بر میزان عمق آبشستگی ندارد مگر آنکه اندازه رسوبات نسبتاً زیاد باشد. غیر یکنواختی رسوبات اثر اندکی روی آبشستگی دارد. عمق آبشستگی برای همه اشکال پایه به جز استوانه‌ای، وابسته به راستای جریان می‌باشد (Melvill., 1997).

اثر متقابل مقطع مرکب و تغییر وضعیت همگرایی سیلاب‌دشت توسط تکیه‌گاه‌های پل و همچنین اثر پوشش گیاهی بر میزان آبشستگی پایه میانی پل در مقطع اصلی جریان توسط (Saneie and Nokhbe Zaeim (2022 مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. نتایج آنها نشان داد با افزایش درصد پوشش گیاهی عمق آبشستگی پایه‌ی پل افزایش یافته و به عنوان مثال در طول تکیه‌گاه ۸ سانتی‌متر از ۱ به ۲ درصد و از ۲ به ۴ درصد، به ترتیب، افزایش پوشش گیاهی سبب افزایش

۱۴ و ۵۷ درصدی در عمق آبشستگی می‌شود. Izadinia and Heidarpour (2019) با برداشت پروفیل‌های سرعت در اطراف پایه پل و با بهره‌گیری از آنالیز کودرانت به بررسی ساختار جریان، چگونگی حرکت و انتقال رسوبات پرداختند. نتایج آنها نشان داد در جلوی پایه و نزدیک بستر بیشترین احتمال وقوع مربوط به برهمکنش بیرونی و برهمکنش درونی و در حدود ۳۰ تا ۳۳ درصد است. بنابراین در داخل گودال، جریان در نزدیک بستر انرژی کافی را برای انتقال رسوبات ندارد.

اجسام شناور به مرور توسط جریان حمل می‌شوند و در اطراف پایه‌های پل تجمع پیدا می‌کنند. شکل کانال، موقعیت آن و هندسه پایه‌های پل تاثیر چشمگیری بر تجمع اجسام شناور مانند کنده و شاخ و برگ درختان در جلو پایه را دارند. جریان با سرعت بالا اجسام شناور بیشتری را حمل می‌کند اما جریان‌های کم عمق بیشترین تاثیر را در تجمع اجسام شناور دارند (Lyn et al. (2003. تجمع اجسام شناور باعث انسداد جریان و شدت گرداب‌های نعل اسبی می‌شود. شکل اجسام شناور بسیار متفاوت است و تاثیر زیادی بر میزان آبشستگی اطراف پایه دارد. اجسام شناور مستطیلی و بلوکی تمایل به ایجاد بیشترین آبشستگی را دارند. برای اجسام مستطیلی بعد طولی تاثیر بیشتری دارد در حالیکه برای اجسام مثلثی شکل مقطع عرضی تاثیر بیشتری بر میزان آبشستگی دارد. زبری و تخلخل تاثیر قابل توجهی بر میزان آبشستگی ندارند (Zevenbergen et al., 2006).

(Rahimi et al. (2017 در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی تاثیر تجمع اجسام شناور بر آبشستگی موضعی اطراف پایه پل پرداختند. با انجام ۴۵ آزمایش اثر دبی جریان، عمق آب روی سطح بستر، ضخامت اجسام شناور و موقعیت قرارگیری اجسام شناور را بررسی کردند. آنها دریافتند که هرچه عمق آب روی بستر بیشتر باشد باعث کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل می‌شود. با افزایش دبی، فرسایش بستر و آبشستگی اطراف پایه بیشتر می‌شود. اجسام شناور با شکل‌های مستطیلی، استوانه‌ای و مثلثی به‌ترتیب باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شوند.

(Abu Saidi et al. (2017 به‌بررسی تاثیر تجمع اجسام شناور بر آبشستگی پایه و تکیه‌گاه در شرایط آب زلال پرداختند. آنها دریافتند اگر فاصله بین پایه‌ها و تکیه‌گاه کمتر باشد باعث افزایش عمق آبشستگی در اطراف پایه و تکیه‌گاه می‌شود.

همچنین هرچه ضخامت و طول اجسام شناور بیشتر باشد عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. شکل اجسام شناور بر میزان آبشستگی مؤثرتر می‌باشد، اجسام شناور با شکل‌های

اجسام شناور با حداقل طول و عرض ۱۰ و ۱۹ و حداکثر طول و عرض ۱۸ و ۳۲ سانتی‌متر انجام شد. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که تجمع اجسام شناور ضخیم باعث انسداد بیشتر و افزایش طول، عرض و عمق گودال آبشستگی و حرکت بیشتر رسوبات می‌شود. حجم گودال آبشستگی ۳ تا ۴ برابر نمونه شاهد (بدون تجمع اجسام شناور) بود.

Lagasse et al. (2010) به بررسی تجمع اجسام شناور چوبی بر میزان عمق آبشستگی در اطراف پایه پل پرداختند. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۶۰ متر و عرض ۲/۴ متر با بستر ماسه‌ای به ضخامت ۰/۵ متر و ۴ پایه با ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر و دبی ۵۵ فوت مکعب بر ثانیه با شیب فلوم ۱ درصد و عمق آب ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. آنها اجسام شناور را در سه حالت روی بستر، زیر سطح آب و روی سطح آب قرار دادند و مشاهده کردند که عمق جریان بر میزان تاثیر اجسام شناور بر عمق آبشستگی مؤثر می‌باشد، یعنی هر چه عمق جریان بیشتر باشد تاثیر اجسام شناور بر میزان آبشستگی بیشتر است. همچنین قرار گرفتن اجسام شناور روی بستر آبشستگی کمتری نسبت به حالت بدون اجسام شناور به وجود می‌آورد. آبشستگی در اطراف پایه بستگی به ضخامت توده اجسام شناور دارد و میزان زبری و نفوذپذیری اجسام شناور بر میزان آبشستگی تاثیری ندارد. پایه‌های باریک، آبشستگی کمتری نسبت به پایه‌های عریض دارند. اجسام مستطیلی و بلوکی آبشستگی بیشتری دارند ولی اجسام مثلثی آبشستگی کمتر و مشخص‌تری را در اطراف پایه به وجود می‌آورند (Lagasse et al., 2010).

Ebrahimi et al. (2018) آزمایش‌هایی روی پایه دماغه تیز انجام دادند که نتایج نشان داد بیشینه عمق آبشستگی برای پایه دماغه تیز در گوشه‌های جانبی پایه بین دماغه و گوشه است. اما برای پایه دایره‌ای و مستطیلی حداکثر عمق آبشستگی در وجه بالادست است. همچنین کم عمق‌تر شدن جریان منجر به افزایش ۹ درصدی در حداکثر عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور نسبت به جریان عمیق بدون اجسام شناور شده است. بیشترین آبشستگی زمانی مشاهده شد که اجسام شناور زیر سطح آب قرار داشتند اما قرارگیری آنها در سطح بستر آبشستگی را کاهش داد. اجسام شناور استوانه‌ای وقتی روی بستر قرار بگیرند تا حدی از بستر محافظت می‌کنند و حداکثر عمق آبشستگی را همانند حالت بدون اجسام شناور کاهش می‌دهند. افزایش طول اجسام شناور در جهت جریان تا حدود ۱/۸ برابر عمق جریان می‌تواند از بستر محافظت کند و آبشستگی را تا حدود ۵۰ درصد نسبت به حالت بدون اجسام

مستطیلی، استوانه‌ای و مثلثی به ترتیب بیشترین آبشستگی را به وجود می‌آورند. بنابراین در حضور اجسام شناور عمق آبشستگی ۶/۴۷ درصد نسبت به عدم حضور اجسام شناور (نمونه شاهد) افزایش می‌یابد.

پل‌های تک پایه چندین برابر بیشتر از پل‌های دو پایه در معرض تجمع اجسام شناور قرار دارند (Diehl (1997). اجزای ساختاری پل می‌تواند اجسام شناور را به دام بیاورد و باعث تجمع آنها شود. تجمع اجسام شناور می‌تواند به بستر رودخانه برسد و همان‌جا ته‌نشین شود یا توسط جریان رو به پایین در اطراف پایه تجمع یابد، روی بستر ته‌نشین شوند و در جریان‌های بعدی به علت سیل، مجدداً شناور شوند و دوباره اجسام دیگر روی آنها تجمع پیدا کند و تشکیل یک پایه برای تجمع بیشتر اجسام شناور دهند (Lagasse et al., 2010).

Melville and Dangel (1992) آزمایش‌هایی روی تجمع اجسام شناور در جلوی پایه استوانه‌ای انجام دادند و نتیجه گرفتند که برای در نظر گرفتن اثر تجمع اجسام شناور می‌توان قطر پایه را افزایش داد. ایشان رابطه ۱ را برای قطر پایه پیشنهاد دادند:

$$D_e = \frac{[0.52Td_d + (h - 0.52T)D]}{h} \quad (1)$$

که در این رابطه، D_e قطر پایه‌ی معادل یا هم ارز است که در معرض تجمع اجسام شناور قرار دارد، h و D به ترتیب عمق جریان و قطر پایه پل، T_d و dd هم به ترتیب فاصله سطح آب تا کف اجسام شناور چوبی و عرض اجسام شناور هستند.

Schmocker and Hager (2010) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی تجمع اجسام شناور در جلو پایه پل‌ها پرداختند و فاکتورهای مهم مؤثر بر گرفتگی و انسداد پایه پل‌ها در هنگام جریان را ارزیابی کردند. بر اساس آزمایش‌های انجام شده آنها نتیجه گرفتند که انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور در جلو پایه پل موجب کاهش سطح مقطع و افزایش پس رفت آب می‌شود.

Pagliara and Carnacina (2010-a) به بررسی روند تکامل آبشستگی در تجمع اجسام شناور پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که پارامتر اصلی مؤثر بر میزان تغییر شکل آبشستگی، شدت جریان و نسبت انسداد است. Pagliara and Carnacina (2010-b) به بررسی آزمایشگاهی شکل آبشستگی و مورفولوژی ریگ‌های روان در حضور اجسام شناور چوبی در جلو پایه پرداختند. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال با

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تاثیر تجمع اجسام شناور گوه‌ای شکل در موقعیت‌های مختلف (زیر سطح، هم سطح و بالای سطح) بر میزان آبستگي در جلوی پایه مربعی می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون به این موضوع پرداخته نشده است. با توجه به اینکه اغلب تجمع اجسام شناور در اطراف پایه‌ها به صورت گوه‌ای شکل گزارش شده است (Lagasse et al., 2010). لذا در این تحقیق اجسام شناور گوه‌ای شکل در نظر گرفته شدند.

مواد و روش‌ها

مشخصات فلوم آزمایشگاهی

به منظور انجام این پژوهش از فلوم آزمایشگاهی با کف گالوانیزه و دیوار شیشه‌ای مستقر در آزمایشگاه تحقیقات مهندسی هیدرولیک و سازه‌های آبی بخش مهندسی آب دانشگاه شهرکرد استفاده شد. کانال اصلی دارای مقطع مستطیلی با عرض داخلی ۶۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، طول ۲۰ متر و شیب کف ثابت و برابر با ۰/۱ درصد بود. یک پمپ در بالای کانال قرار دارد که بیشترین توان تخلیه آن ۷۰ لیتر بر ثانیه است. شکل ۱- الف نمای فلوم، شکل ۱- ب پلان و شکل ۱- ج عکس فلوم آزمایشگاهی را نمایش می‌دهند.

شرایط آزمایش

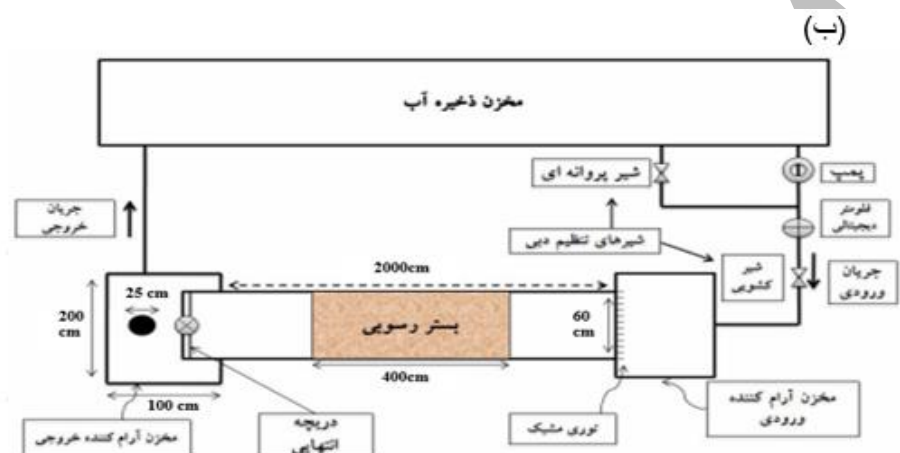
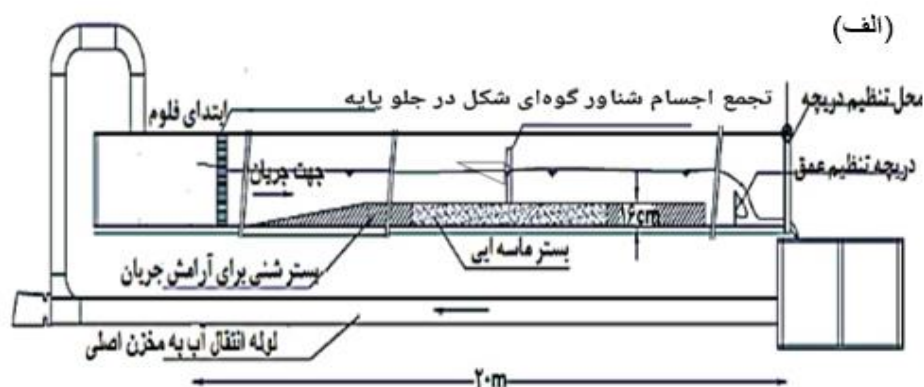
همه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شد. بستر ماسه‌ای به ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر در کف کانال قرار گرفت. اندازه متوسط دانه‌های ماسه $d_{50} = 0.75$ میلی‌متر است. در همه آزمایش‌ها عمق جریان در بالای بستر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها با دبی‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. برای جلوگیری از اثر دیوارهای جانبی با توجه به تحقیقات پیشین (Melville and Chiew, 1999)، Raudkivi and Ettema (1983) نسبت عرض آبراهه به قطر پایه باید بزرگتر از ۶/۲۵ باشد، در این آزمایش‌ها نیز از یک پایه مربعی به ضلع ۹ سانتی‌متر (عرض نسبی ۱۵ درصد) استفاده شد.

شناور کاهش دهد. افزایش بیش از حد ذکر شده در طول اجسام، تاثیری بر آبستگي ندارد (Ebrahimi et al., 2018). اجسام شناور وقتی در سطح بستر قرار می‌گیرند طی آبستگي به سمت پایین می‌روند که در این حالت شکل محافظت از بستر را می‌گیرند. اجسام شناور مثلی به دلیل انحراف کمتر جریان به سمت پایه نسبت به اجسام مستطیلی عمق آبستگي کمتری دارند (Ebrahimi et al., 2020).

مدیریت عملی پل و شناسایی پل‌های در معرض تجمع اجسام شناور به دو روش انجام می‌گیرد، روش مستقیم به وسیله تصاویر هوایی و ماهواره‌ای و روش غیر مستقیم که شامل شناسایی موقعیت جغرافیایی است که زمانبر و دقت کمتری دارد. روش مستقیم دقت بیشتر و قابل اعتمادتری دارد. ۸۴ درصد از پل‌ها به روش مستقیم و ۱۶ درصد به روش غیر مستقیم در معرض انباشته شدن اجسام شناور می‌باشند که در طراحی پل باید به این موضوع پرداخته شود. همچنین برای کاهش تجمع اجسام شناور باید سیستم‌های به دام اندازی اجسام شناور با توجه به موقعیت آن طراحی شود تا از میزان آبستگي ناشی از تجمع اجسام شناور کاسته شود (Panici et al., 2020).

روند زمانی تکامل بیشترین میزان آبستگي در اطراف پایه پل به وسیله پژوهشگران متعددی بررسی شده است که هر یک معادلات متعددی را با توجه به مشاهدات خود مطرح کرده‌اند (Richardson and Melville and Chiew., 1999)، (Davis., 2001)، (Oscar et al., 2008).

تحقیقات تجربی و میدانی متعددی به موضوع تجمع اجسام شناور و آبستگي اطراف پایه پل‌ها پرداخته‌اند Zevenbergen, Zevenbergen et al. (2006)، Kattel and Melville and Dangol (1992)، (2000)، Erikson (1998)، Mueller and Parola et al. (1998)، Bradley et al. (2005)، Briaud et al. (2006)، Lagasse et al. (2009)، Pagliara and Carnacina، (2010-a)، Elliot et al. (2012). ولی تنها تعداد کمی به بررسی آزمایشگاهی آن پرداخته‌اند؛ بنابراین در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی آبستگي در اطراف پایه پل پرداخته شده است.



شکل ۱- الف، نمای کلی از فلوم آزمایشگاه و نحوه قرارگیری اجسام شناور در جلوی پایه ب، پلان فلوم آزمایشگاهی و ج، فلوم آزمایشگاهی

شناور (نمونه شاهد) با استفاده از عمق سنج (کولیس) اندازه‌گیری شد. این دستگاه عمود بر کف کانال و روی لبه‌های بالایی کانال سوار شده و به راحتی در طول کانال حرکت می‌کند.

آزمایش‌ها با اجسام شناور گوه‌ای شکل با چهار اندازه متفاوت (طول و عرض متفاوت و ارتفاع ثابت) در جلوی پایه مربعی قرار گرفت و انجام شد. عمق آب‌سستگی در دو حالت با و بدون اجسام



شکل ۲- نمایی از پایه و جسم در آزمایشگاه

طراحی اجسام شناور گوه‌ای شکل و ویژگی مواد بستر

پژوهش‌های فراوانی در رابطه با تجمع اجسام شناور در اطراف پایه انجام شده است. پژوهشگرانی مانند Zevenbergen et al. (2006)، Diehl، Melvill and Dangol (1992)، Moshashii and Ebrahimi et al. (2020)، (1997)، Asadi (2014) اجسام شناور مستطیلی و مثلثی که بیشتر این اشکال در طبیعت یافت می‌شوند و توسط جریان در بالادست در جلو پایه تجمع می‌یابند و به سمت زیر سطح آب انباشته می‌شوند را بررسی کردند. در این پژوهش، تجمع اجسام شناور گوه‌ای شکل در جلو پایه مربعی بررسی شد. اجسام شناور گوه‌ای شکل به وسیله صفحه‌های توری شکل با عرض ۱/۲ سانتی‌متر با چهار مثلث متساوی الساقین به هم

نوک دستگاه عمق سنج تیز است که برای داده‌برداری دقت بالایی دارد. شکل ۲ نمایی از چگونگی قرارگیری پایه و اجسام شناور در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

برای تعیین سرعت آستانه حرکت از رابطه ۲ ارائه شده توسط Richardson and Davis (2001) استفاده شد:

$$U_c = \frac{K_s^{0.5} (S_s - 1)^{0.5} \cdot d_{50}^{0.5} \cdot y^{0.167}}{n} \quad (2)$$

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 ۳ استریکلر برابر با ۰/۰۳۱ به دست آمد. با توجه به پارامتر شیلدز که از رابطه ۴ (Vanoni 2006) مقدار عددی این پارامتر برای بستر به دست می‌آید.

$$n = 0.041(d_{50})^{1/6} \quad (3)$$

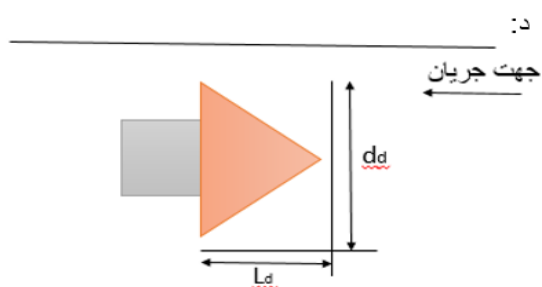
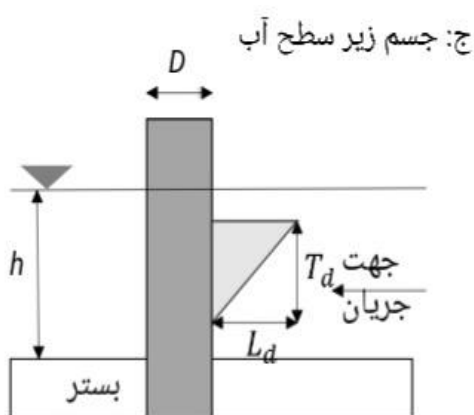
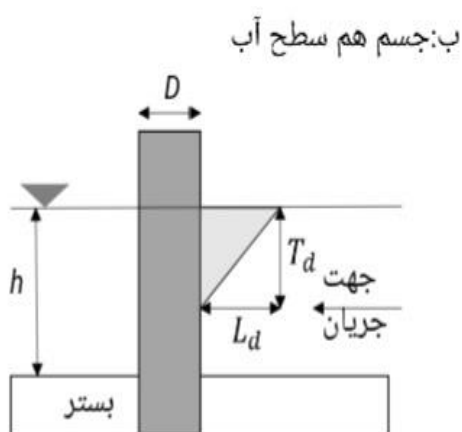
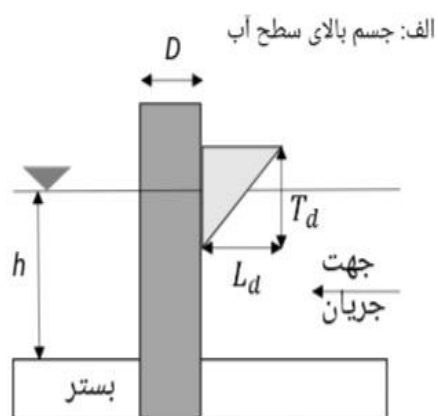
$$\frac{d_s}{v} \sqrt{0.1(S_s - 1)gd_s} \quad (4)$$

طبق جدول ۱ تمام آزمایش‌ها در عمق ثابت ۲۰ سانتی‌متری انجام و سرعت بحرانی (سرعت آستانه حرکت ذرات) برابر با ۰/۳۸۸ (m/s) محاسبه شد. رسوبات در بالادست با توجه به دبی‌های مختلف، حرکتی نداشته و همه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام گرفت. علاوه بر این رسوبات به صورت یکنواخت در کانال قرار گرفتند و با افزایش دبی، در جایی که رسوبات شروع به حرکت می‌کردند، سرعت آستانه حرکت اندازه‌گیری شد. جدول ۱ سرعت آستانه حرکت رسوبات در عمق ۲۰ سانتی‌متری را نشان می‌دهد. سرعت متوسط (U) از رابطه ۵ به دست می‌آید:

جدول ۱- سرعت آستانه حرکت رسوبات در عمق ۲۰ سانتی‌متری

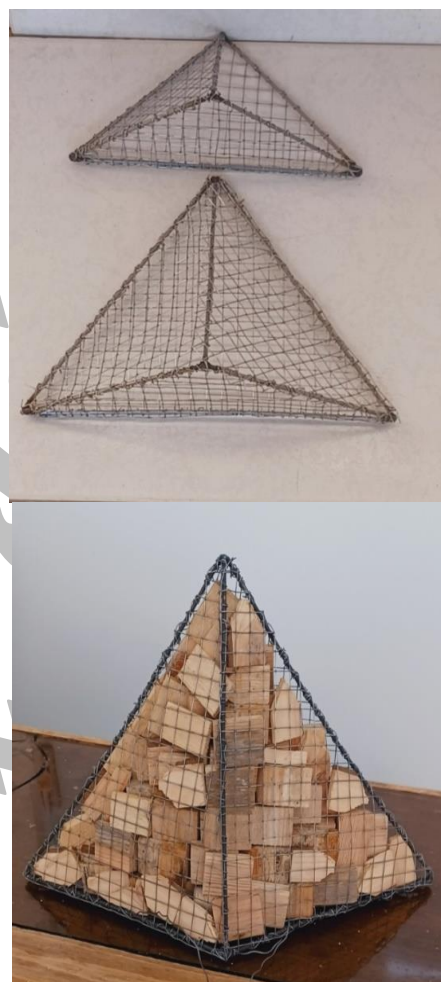
h (cm)	U (m/s)	U_c (m/s)	$\frac{U}{U_c}$	Q (lit/s)
۲۰	۰/۰۸۳	۰/۳۸۸	۰/۲۱۳	۱۰
۲۰	۰/۱۶۶	۰/۳۸۸	۰/۴۲۷	۲۰
۲۰	۰/۲۵	۰/۳۸۸	۰/۶۴۴	۳۰
۲۰	۰/۳۳۴	۰/۳۸۸	۰/۸۵۸	۴۰

$$U = \frac{Q}{A} \quad (5)$$



شکل ۴- موقعیت قرارگیری اجسام شناور در جلو پایه مربعی الف: جسم بالای سطح آب، ب: جسم هم سطح آب، ج: جسم زیر سطح آب و د: پلان کانال

دیگر متصل و به شکل گوه با طول و عرض‌های متفاوت و ارتفاع ثابت (با ۴ اندازه متفاوت) طراحی شدند که با چوب‌های یک اندازه با برش سه سانتی‌متری کنار یکدیگر چیده شده‌اند و به صورت آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد (شکل ۳).



شکل ۳- طراحی اجسام شناور گوه‌ای شکل

مشخصات اجسام شناور در جدول ۲ آورده شده است. D (cm) قطر پایه، t_d (cm) ارتفاع اجسام شناور ثابت، d_d (cm) عرض اجسام شناور و L_d (cm) طول اجسام شناور می‌باشد. اجسام طراحی شده در سه حالت متفاوت در جلوی پایه نصب و آزمایش‌ها انجام شد. موقعیت اجسام شناور، t_d (ارتفاع جسم) در حالت بالای سطح آب (۵ سانتی‌متر بالای سطح آب، ۲۵ درصد نسبت به عمق آب)، در حالت هم سطح آب، زیر سطح آب (با فاصله ۵ سانتی‌متری از بستر، ۲۵ درصد نسبت به عمق آب زیر سطح آب) قرار دارند (شکل ۴).

شد. دریچه انتهایی کانال به طور کامل بسته شد و اجازه داده شد سطح آب تا ارتفاع ۲۰ سانتی متر بالای کف کانال ثابت بماند (با تنظیم دریچه کنترل عمق). سپس میزان دبی با دبی سنج تنظیم شد. پس از شروع آزمایش، هر ۲۰ دقیقه یکبار میزان آبشستگی اندازه گیری شد. این فرآیند تا ۴۲۰ دقیقه پس از رسیدن آبشستگی به حالت تعادل ادامه یافت. در پایان، آزمایش متوقف شد و آب داخل فلوم به آرامی تخلیه گردید تا حفره آبشستگی اطراف پایه دست نخورده باقی بماند. پس از آن ابعاد و مشخصه های حفره آبشستگی اندازه گیری شد. بیشینه عمق آبشستگی و توپوگرافی بستر به وسیله عمق سنج (کولیس) اندازه گیری شد. مشخصات آبشستگی در حالت ها و دبی های مختلف اندازه گیری و نمودارهای مربوط به آنها رسم شد.

تحلیل ابعادی

آبشستگی یک پدیده بسیار پیچیده می باشد و تعداد پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایه پل بسیار زیاد است و در نظر گرفتن تمامی پارامترها مشکل و پیچیده می باشد، بنابراین با در نظر گرفتن پارامترهای مهم به صورت نسبت های بی بعد که بیشترین تاثیر را در پدیده مورد بررسی دارند، می توان رفتار جریان را در ایجاد آبشستگی اطراف مانع مورد بررسی، به صورت زیر فرموله کرد:

$$f(S_{hp}, D, b, h, U, \sigma_s, d_{50}, l_d, \mu, \rho, g, d_s, S_{hd}, d_d, h_d, Y_d, S_d) = 0 \quad (6)$$

که در این رابطه S_{hp} شکل پایه، D قطر پایه، b عرض فلوم، h عمق جریان، U سرعت متوسط جریان، σ_s انحراف معیار هندسی رسوبات بستر، d_{50} میانگین قطر ذرات، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، ρ چگالی، g شتاب گرانشی، d_s عمق آبشستگی، S_{hd} شکل اجسام شناور، d_d عرض اجسام شناور، h_d ارتفاع مستغرق اجسام شناور، Y_d محل قرارگیری اجسام شناور و S_d مساحت اجسام شناور است.

با تحلیل ابعادی و انتخاب پارامترهای h, U, ρ به عنوان متغیرهای تکراری رابطه γ به دست می آید.

$$\frac{d_s}{y} = f\left(S_{hp}, \frac{D}{h}, \frac{b}{h}, \sigma_s, \frac{d_{50}}{h}, \frac{\mu}{\rho U h}, \frac{\sqrt{hg}}{U}, S_{hd}, \frac{d_d}{h}, \frac{l_d}{h}, \frac{h_d}{h}, \frac{Y_d}{h}, \frac{S_d}{h}\right) \quad (7)$$

چون در این پژوهش هدف فقط پایه مربعی می باشد بنابراین اثر شکل پایه نادیده گرفته شد و همچنین چون فقط اجسام گوه ای مورد آزمایش می باشد، اثر شکل اجسام نیز نادیده گرفته شد. زمان تمامی آزمایش ها ثابت (۴۲۰ دقیقه) و برابر زمان تعادل

جدول ۲- مشخصات اجسام شناور (cm)

پارامتر	L_d	d_d	T_d	L_d/D	d_d/D	T_d/D
W_1	۱۵	۲۰	۱۰	۱/۶۶۷	۲/۲۲۳	۱/۱
W_2	۱۲	۲۵	۱۰	۱/۳۳۴	۲/۷۷۸	۱/۱
W_3	۲۰	۳۰	۱۰	۲/۲۲۳	۳/۳۳۴	۱/۱
W_4	۲۵	۴۰	۱۰	۲/۷۷۸	۴/۴۴۵	۱/۱

ضخامت رسوبات بستر ۱۶ سانتی متر در نظر گرفته شد. بستر مورد آزمایش به طول ۴ متر از فلوم با رسوبات غیرچسبنده با مشخصات جدول ۳ پر شد. در بالادست و پایین دست به منظور کنترل و حفاظت رسوبات در مقابل قدرت جریان از دو سطح شبیدار با مقدار قابل توجهی شن پوشیده شده برای آرامش جریان استفاده شد. انحراف معیار هندسی ذرات رسوب در مقدار عمق ایجاد شده تاثیرگذار است؛ به طوری که عدم یکنواختی ذرات باعث کاهش عمق تعادل آبشستگی می شود. برای برقراری شرط یکنواختی رسوبات، از دو الک با شماره ۱۶ و ۲۵ استفاده شد. به طوریکه رسوبات از الک ۱۶ عبور کرده و روی الک ۲۵ مانده باشند. مواد بستر تقریباً یکنواخت بوده و انحراف معیار هندسی رسوبات کمتر از ۱/۳ می باشد. بنابراین شرط یکنواختی برقرار است و آبشستگی موضعی رخ می دهد. اگر انحراف معیار هندسی بیشتر از این مقدار باشد رسوبات غیر یکنواخت بوده و رسوبات درشت تر روی رسوبات ریز را گرفته و آبشستگی موضعی اتفاق نمی افتد. در اینجا انحراف معیار هندسی و شرط یکنواختی برقرار می باشد.

جدول ۳- مشخصات رسوبات به کار رفته در آزمایش ها

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

نحوه انجام آزمایش

در ابتدای همه آزمایش ها، سطح رسوبات موجود در کف فلوم آزمایشگاهی به وسیله خط کش کاملاً مسطح شد و سپس جریان ورودی به کانال برقرار شد. آب با دبی کم و به آرامی به طوری که مصالح شسته نشوند و آبشستگی اولیه رخ ندهد وارد کانال شد (برای این کار بهتر است که آب از فواصل مساوی در پایین دست و بالادست به طور همزمان به طرف پایه هدایت شود). یک ورق فلزی در پایین دست حوضچه آرامش در فاصله ۳ متری از ابتدای بستر آزمایش برای آرامش جریان قرار داده

نتایج و بحث

تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه پل

در این پژوهش ابتدا آزمایش بدون اجسام شناور (نمونه شاهد) انجام شد تا مبنایی برای سنجش میزان آبشستگی در حضور اجسام شناور و تغییرات بستر باشد. همچنین زمان به تعادل رسیدن بر اساس این آزمایش ۴۲۰ دقیقه مشخص شد. Melvill and Chiew (1999) یک آزمایش ۲۴ ساعته روی پایه پل بدون جسم شناور و محافظت از پایه برای سرعت نسبی ۰/۶۸۷ انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که ۹۸ درصد آبشستگی در ۶ ساعت اول رخ می‌دهد. Ghorbani and kells (2008) نیز در آزمایش‌های ۲۴ ساعته روی آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که ۷۵ درصد از آبشستگی در ۷ ساعت اول رخ می‌دهد. 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. بر این اساس زمان تعادل آزمایش در این پژوهش ۷ ساعت برای تمامی آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

نمودار توسعه زمانی آبشستگی برای پایه پل نیز بدون اجسام شناور (نمونه شاهد) و با اجسام شناور بررسی شد (شکل ۵). شایان ذکر است که زمان تعادل تابعی از سرعت نسبی است و هر چه سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت نزدیک شود، زمان تعادل کمتر می‌شود.

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). 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:

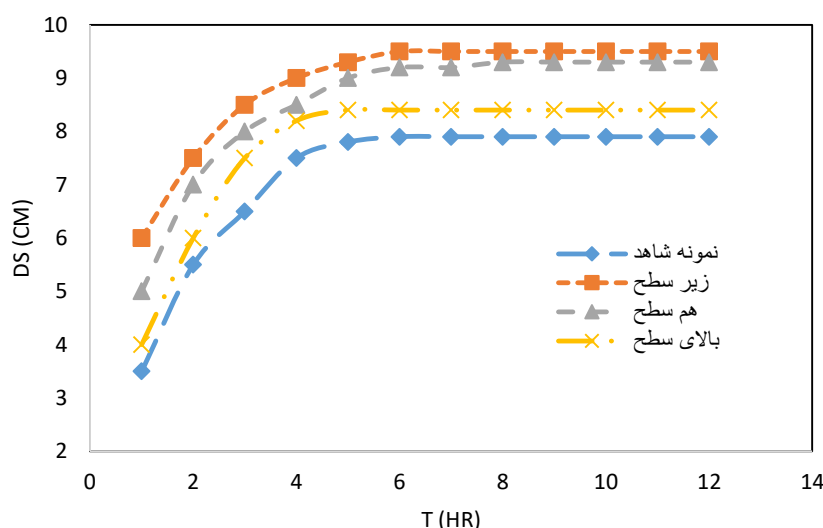
$$\frac{ds}{D} = f\left(\frac{U}{U_c} \cdot \frac{d_a}{b} \cdot \frac{h}{D} \cdot \frac{D}{d_{50}} \cdot \frac{l_d}{D} \cdot \Delta A\%\right) \quad (8)$$

طرفی چون عمق نسبی جریان و قطر نسبی ذرات ثابت هستند، آنها نیز حذف می‌شوند، و رابطه ۸ بدست می‌آید.

$$\frac{ds}{D} = f\left(\frac{U}{U_c} \cdot \frac{d_a}{b} \cdot \frac{l_d}{D} \cdot \Delta A\%\right) \quad (9)$$

در رابطه بالا، نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت آستانه حرکت مواد رسوبی U/U_c و درصد انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور برای اجسام گوه‌ای شکل در جلو پایه مربعی از رابطه ۹ محاسبه شد. برای حالت نمونه شاهد (بدون تجمع اجسام شناور) $\Delta A\% = 0$ و $T_d = 0$ می‌باشد.

$$\Delta A\% = \frac{(d_a - D)(d_a - D)T_d}{2(b - D) \cdot h \cdot d_a} \cdot 100 \quad (10)$$



شکل ۵- نمودار توسعه زمانی آبشستگی

دقیقه ۳۰۰ تا ۴۰۰ تغییرات آبشستگی در حد میلی‌متری (۱ میلی‌متر) می‌باشد.

مشاهده شد که تغییرات عمق آبشستگی در ابتدا زیاد بوده و رفته رفته کم شد؛ به طوری که ۷۵ درصد آبشستگی در ساعات اولیه رخ می‌دهد و پس از آن با روند کمی ادامه پیدا می‌کند. از

آبشستگی پایه پل بدون اجسام شناور

با توجه به اهداف تحقیق و تحلیل بهتر نتایج، ابتدا آزمایش بدون اجسام شناور انجام شد. برای نمونه شاهد پایه مربعی با دبی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه، بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب برابر با ۰/۵، ۲/۱، ۵/۸ و ۷/۹ سانتی متر بدست آمد. در تمامی آزمایش‌ها عمق جریان ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. بیشینه عمق آبشستگی ابتدا از دو گوشه جلو پایه به سمت بالادست آغاز شد و از کناره پایه مربعی بر اثر برخورد جریان با پایه شروع می‌شود و به سمت طرفین رفته رفته کاهش پیدا می‌کند تا به صفر برسد. به سمت پایین دست پشته‌ای بر اثر تجمع رسوبات شسته شده اطراف پایه تشکیل شد. میزان آبشستگی در ساعات اولیه بسیار زیاد و به تدریج کاهش یافت تا زمانی که به تعادل رسید و عمق آبشستگی ثابت شد. در ساعات آخر توسعه آبشستگی افزایش ناچیزی داشت. همچنین باتوجه به مطالعات Moshashii and Asadi (2014) و Aghbolaghi (2014) بیشینه عمق آبشستگی بدون تجمع اجسام شناور (نمونه شاهد) برای پایه مربعی ۸/۲۷ سانتی متر می‌باشد که با حضور اجسام شناور عمق گودال آبشستگی ۲/۵ تا ۳ برابر افزایش می‌یابد.

آبشستگی پایه پل در حضور اجسام شناور

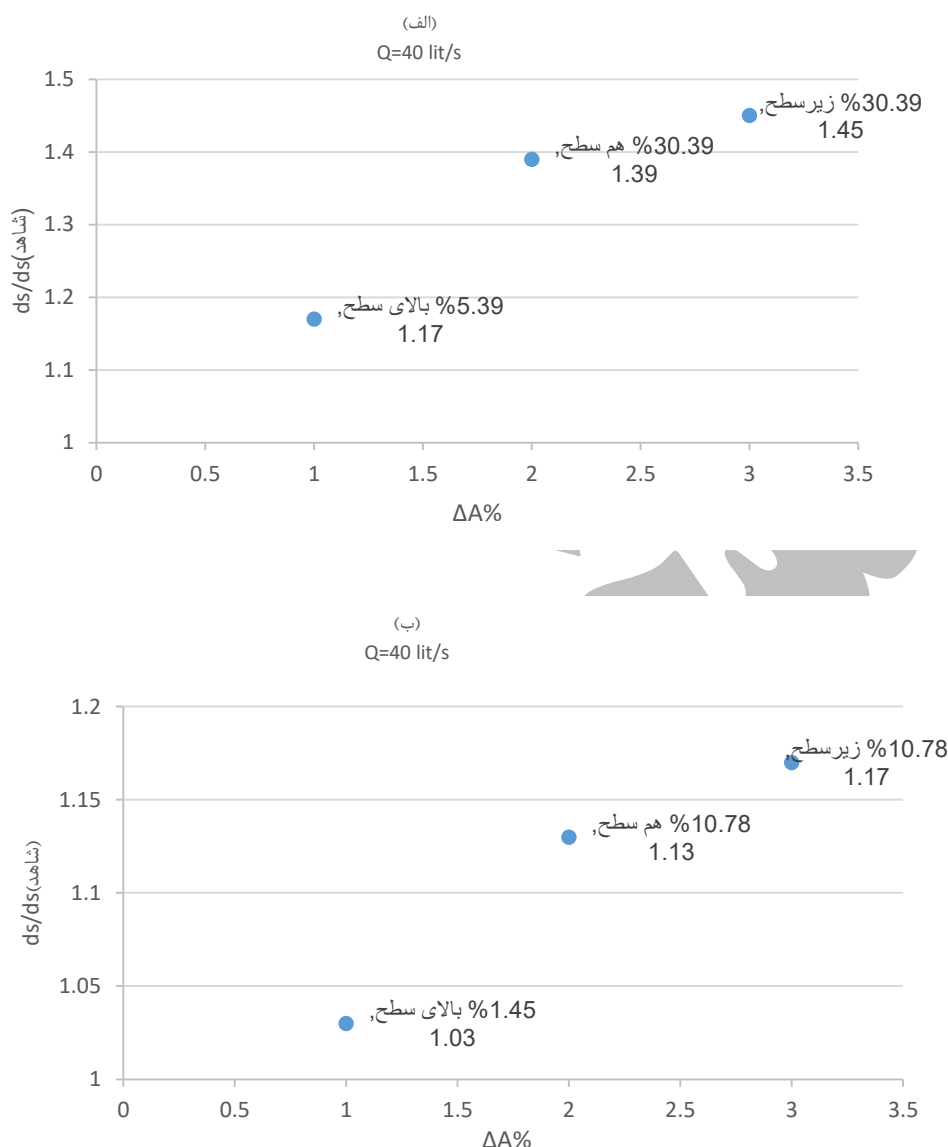
آبشستگی در حضور اجسام شناور در ابعاد و اندازه‌های مختلف در سه موقعیت زیرسطح، هم سطح و بالای سطح که در جلوی پایه مربعی نصب شدند، بررسی شد. در آزمایش‌های انجام شده مشاهده شد که عمق گودال آبشستگی در حضور اجسام شناور تغییر می‌کند. وقتی جریان به اجسام شناور برخورد می‌کند باعث کف‌کنی مواد بستر در زیر اجسام شناور در جلوی پایه می‌شود و توسط جریان رو به پایین از جلوی پایه شسته شده و در پشت پایه تجمع پیدا می‌کند. در نتیجه اجسام شناور باعث افزایش طول و عرض عمق گودال آبشستگی می‌شوند. وقتی اجسام شناور در زیر سطح آب (۲۵ درصد زیر سطح آب) جلوی پایه مربعی قرار گرفته باشند، میزان کف‌کنی در زیر اجسام شناور و جلوی پایه شدیدتر رخ می‌دهد. آبشستگی ابتدا از گوشه‌های جلو پایه مربعی شروع می‌شود تا به بیشینه عمق آبشستگی برسد. مواد بستر به تدریج در پشت پایه تجمع پیدا می‌کند و رفته رفته تا زمان رسیدن به تعادل (۴۲۰ دقیقه) به شکل یک تپه ماسه‌ای در پشت پایه تشکیل می‌شود.

وقتی جسم شناور در موقعیت هم سطح و بالای سطح در جلوی پایه مربعی قرار بگیرد، میزان آبشستگی نسبت به حالت زیر

سطح کمتر می‌باشد، بنابراین میزان کف‌کنی رسوبات کمتر و همچنین رسوبات کمتری در پشت پایه تجمع پیدا می‌کنند. ابعاد اجسام شناور تاثیر قابل توجهی بر میزان آبشستگی اطراف پایه دارند. با افزایش طول و عرض اجسام شناور میزان آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. برای سه موقعیت قرارگیری اجسام شناور در جلوی پایه مربعی، موقعیت بالای سطح کمترین میزان عمق آبشستگی و برای حالت زیرسطح بیشترین عمق آبشستگی را دارند. این موضوع برای تمامی آزمایش‌های انجام شده صادق است.

تاثیر ابعاد و موقعیت قرارگیری اجسام شناور

محل قرارگرفتن اجسام شناور در جلوی پایه تاثیر زیادی بر بیشینه عمق آبشستگی دارد. همچنین ابعاد اجسام شناور از نظر طول و عرض بر میزان آبشستگی مؤثر است. با افزایش طول و عرض اجسام شناور در حالت زیر سطح آب، آبشستگی از گوشه جلوی پایه در بالادست شروع می‌شود و با شیب تندتری شکل می‌گیرد و به سمت پایین دست این شیب رفته رفته کمتر می‌شود تا تجمع رسوبات در پایین دست رخ دهد. در بررسی موقعیت قرارگیری اجسام شناور برای حالت هم سطح و بالای سطح، عمق گودال آبشستگی از نظر طولی و عرضی کمتر است. به طور کلی بیشینه عمق آبشستگی برای موقعیت قرارگیری اجسام شناور زیر سطح رخ می‌دهد. همچنین میزان رسوبات بیشتری نیز در پشت پایه تجمع می‌یابد. با قرار گرفتن اجسام شناور در جلو پایه درصدی از مسیر جریان مسدود می‌شود. درصد انسداد برای اجسام شناور را با توجه به شکل ۶ قابل بررسی است. با افزایش درصد انسداد و موقعیت قرارگیری اجسام شناور میزان آبشستگی هم تغییر می‌کند. بیشترین درصد انسداد مربوط به جسم با طول، عرض و ارتفاع نسبی برابر با ۲/۷۷۸، ۴/۴۴۵ و ۱/۱ زیر سطح آب و با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه $\Delta A\% = 30.39$ می‌باشد. در این حالت $d_d/b = 0.75$ و بیشینه عمق آبشستگی با اجسام شناور نسبت به حالت بدون اجسام شناور (نمونه شاهد) نیز برابر با $d_s/d_{s(شاهد)} = 1.45$ است. کمترین درصد انسداد برای جسم با طول، عرض و ارتفاع نسبی به ترتیب ۱/۶۶۷، ۰/۲۲۳ و ۱/۱ در موقعیت بالای سطح می‌باشد که در این حالت $\Delta A\% = 1.45$ و $d_d/b = 0.33$ است. در این حالت بیشینه عمق آبشستگی با اجسام شناور نسبت به حالت بدون اجسام شناور (نمونه شاهد) $d_s/d_{s(شاهد)} = 1.03$ است.

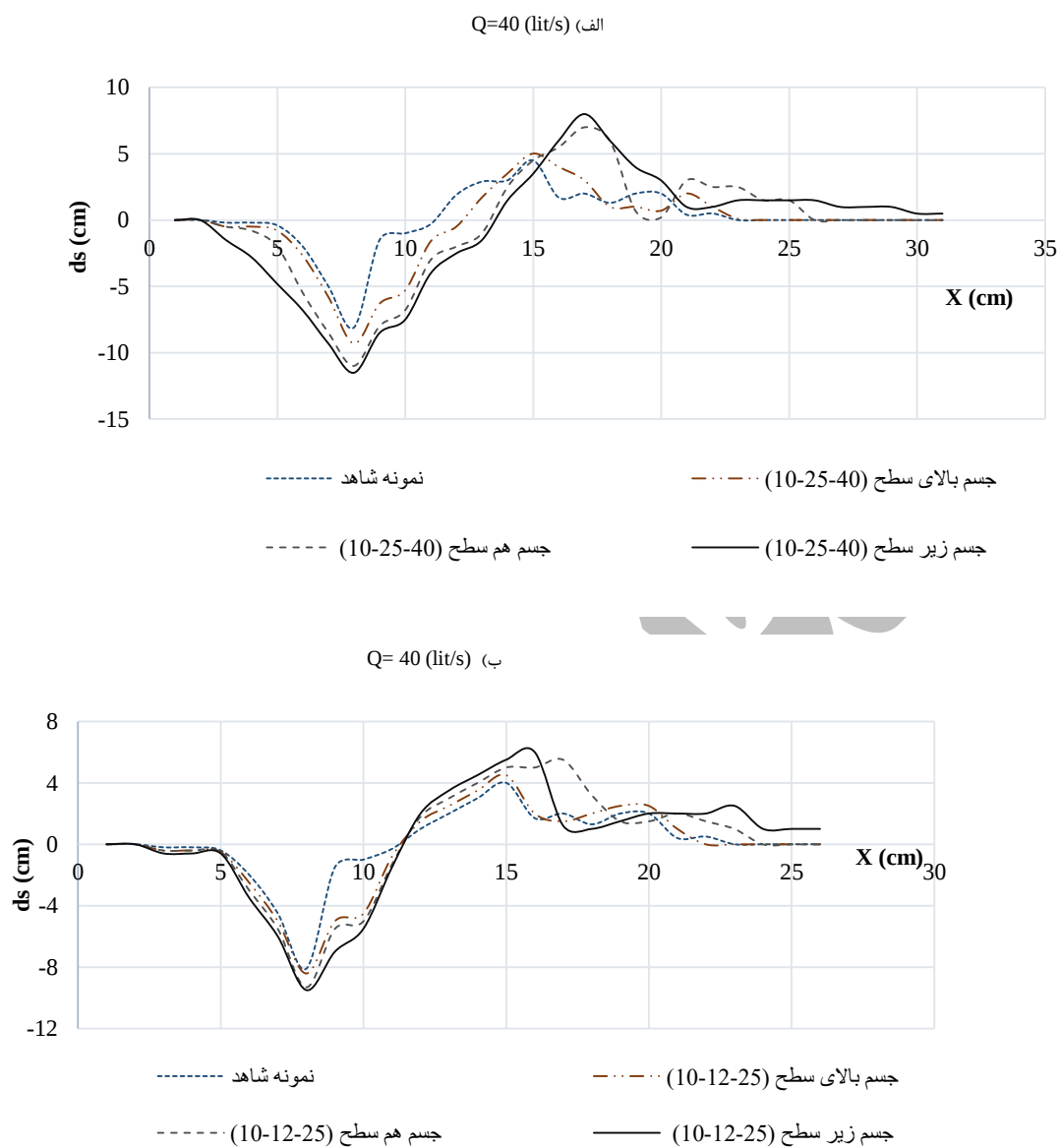


شکل ۶- درصد انسداد ایجاد شده توسط اجسام شناور الف: جسم با ابعاد نسبی ۲/۷۷۸، ۴/۴۴۵ و ۱/۱ و ب: جسم با ابعاد نسبی ۱/۶۶۷، ۰/۲۲۳ و ۱/۱

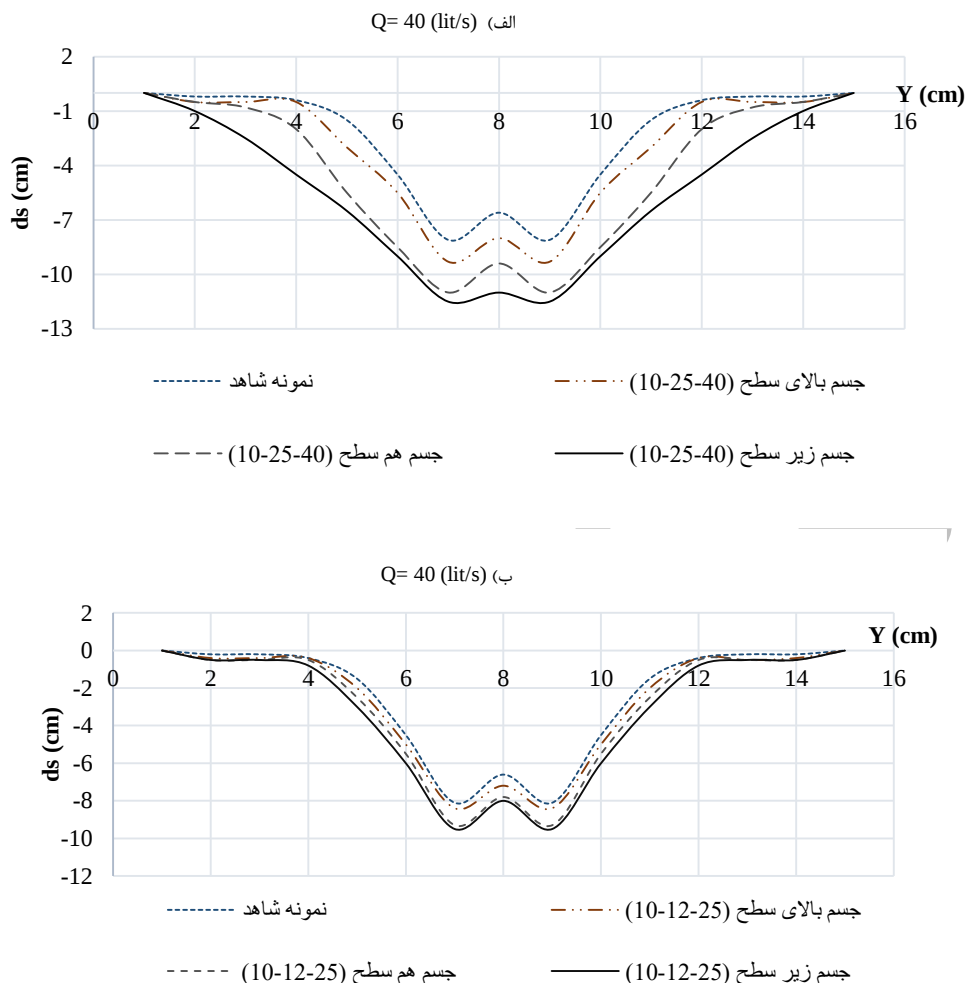
بررسی عمق آبشستگی در مقطع طولی و عرضی

با توجه به شکل ۷ و ۸ در بررسی پروفیل طولی و عرضی عمق گودال آبشستگی برای دو جسم با ابعاد مختلف مشاهده می‌شود که اجسام شناور با ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۴۰، ۲۵ و ۱۰ سانتی‌متر میزان آبشستگی بیشتری را از نظر پروفیل طولی و عرضی ایجاد کرده است. برای اجسام شناور گوه‌ای شکل، بیشتر عرض جسم بر میزان آبشستگی تاثیر دارد و طول تاثیر کمتری دارد. در شکل ۷ پروفیل طولی آبشستگی، در موقعیتی که جسم زیر سطح آب قرار گرفته است، گودال آبشستگی در بالادست به سمت پایه به تدریج با شیب تندی شکل می‌گیرد تا به بیشینه عمق آبشستگی در جلوی پایه برسد و در کناره‌های پایه به سمت پایین دست به تدریج عمق گودال آبشستگی کاهش می‌یابد. این شیب در موقعیت‌های هم

سطح و بالای سطح آهسته‌تر شکل می‌گیرد. در شکل ۸ پروفیل عرضی گودال آبشستگی مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، بیشینه عمق آبشستگی در دو گوشه جلو پایه به سمت بالادست شکل گرفته و به سمت کناره‌های کانال میزان آبشستگی رفته رفته کاهش یافته تا به صفر برسد. برای موقعیت قرارگیری اجسام شناور با ابعاد طول، عرض و ارتفاع ۴۰، ۲۵ و ۱۰ سانتی‌متر در حالت زیر سطح، هم سطح و بالای سطح آب به ترتیب برابر با ۳/۶، ۱/۴ و ۰/۵ برابر نمونه شاهد می‌باشد. به‌طور کلی بیشینه عمق آبشستگی برای اجسام در حالت زیرسطح و برابر با ۳/۶ برابر نمونه شاهد می‌باشد.



شکل ۷- پروفیل طولی عمق گودال آبشستگی با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه در حضور اجسام شناور الف: جسم (۴۰-۲۵-۱۰) و ب: جسم (۲۵-۱۲-۱۰)



شکل ۸- پروفیل عرضی عمق گودال آبشستگی با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه در حضور اجسام شناور الف: جسم با ابعاد ۰٫۲۵ و ۱۰ سانتی‌متر ب: جسم با ابعاد ۰٫۲۵، ۱۲ و ۱۰ سانتی‌متر

افزایش عرض اجسام شناور باعث تنگ‌شدگی جریان نسبت به کانال و بیشتر شدن رسوب‌زدایی در عرض کانال می‌شود در نتیجه تجمع رسوبات در پشت پایه با ارتفاع بیشتری تشکیل می‌شود. برای جسم با ابعاد کوچکتر (۲۵، ۱۲ و ۱۰ سانتی‌متر)، رسوب‌زدایی در عرض کانال کمتر و میزان تجمع رسوبات با ارتفاع کمتر می‌باشد به همین دلیل در ادامه پشته تشکیل شده آبشستگی دیده می‌شود.

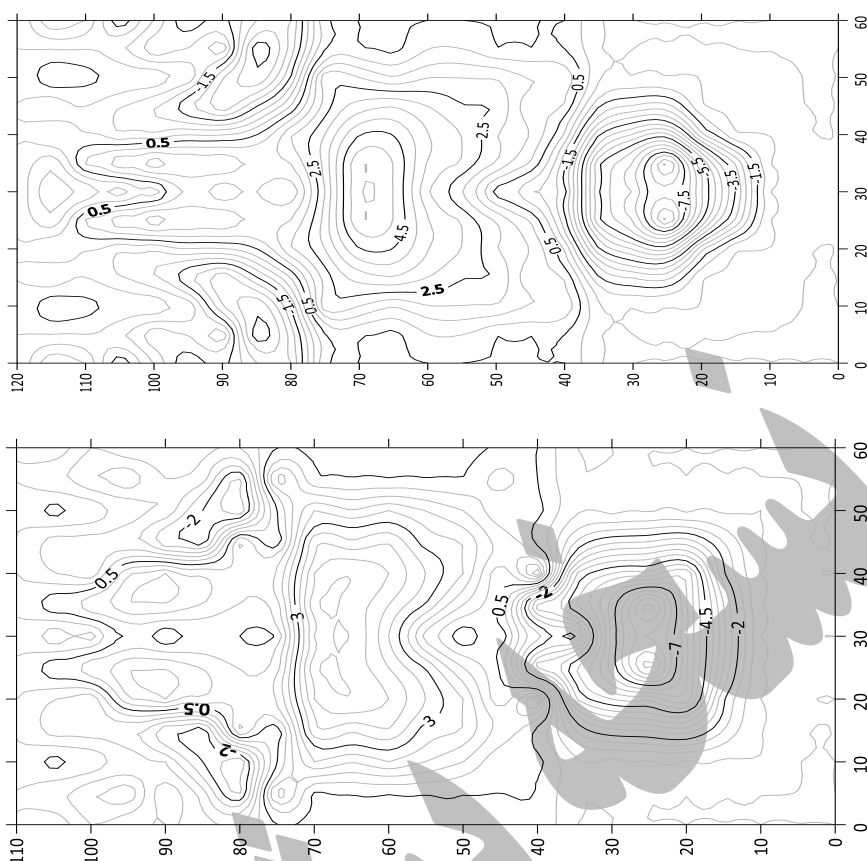
رابطه عمق آبشستگی با تجمع اجسام شناور

با بررسی مطالعات Moshashaei and Asadi Aghbolaghi (2014) برای پیش‌بینی عمق آبشستگی پایه مربعی با تجمع اجسام شناور رابطه ۱۰ را ارائه دادند و نشان دادند که اجسام شناور مستطیلی بیشترین آبشستگی را دارند.

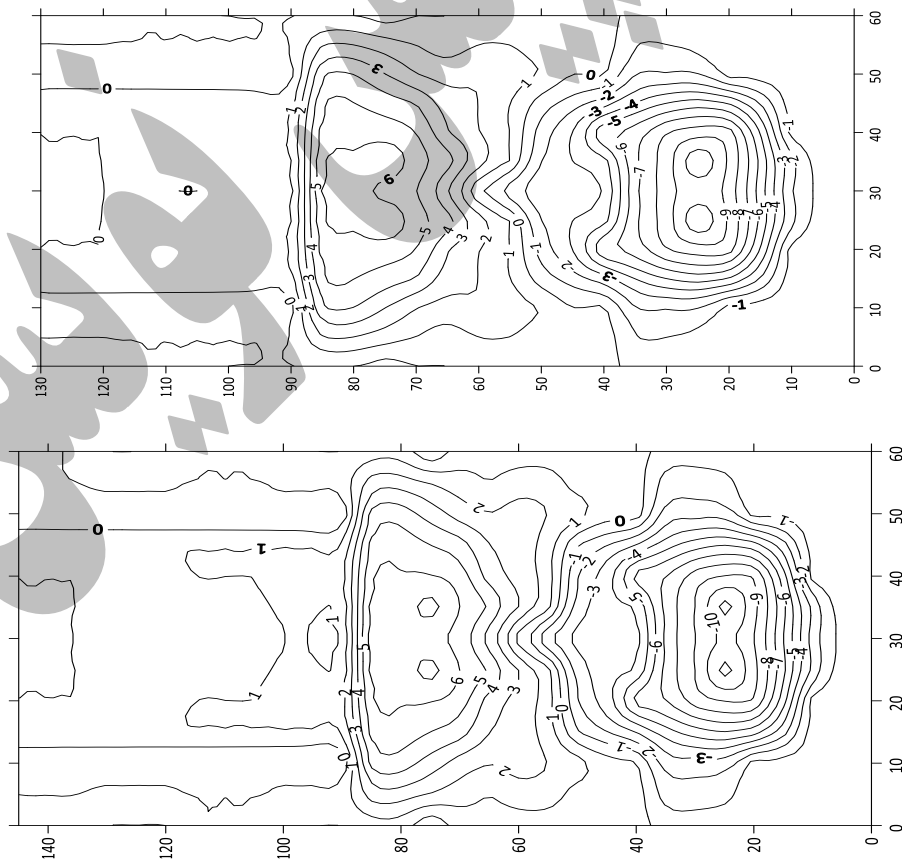
$$\frac{Z_{debris}}{h} = 1.205430 \left(\frac{U}{U_c} \right)^{2.42627} (\Delta A \%)^{0.2396} \left(\frac{d_d}{b} \right)^{-0.154500} \left(\frac{l_d}{D} \right)^{0.1148} \quad (10)$$

تغییرات نهایی پروفیل بستر

در پایان هر آزمایش، تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف پایه پل به صورت خطوط کنتور و نمایش سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار Surfer در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. بستر ایجاد شده برای اجسام شناور با ابعاد عرض، طول و ارتفاع به ترتیب ۲۵، ۱۲ و ۱۰ و ۴۰، ۲۵ و ۱۰ سانتی‌متر در حالت هم سطح با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود، عمق گودال آبشستگی به طول و عرض اجسام شناور بستگی دارد. برای اجسام گوه‌ای شکل بیشتر عرض جسم تاثیر دارد. برای جسم با ابعاد ۴۰، ۲۵ و ۱۰ سانتی‌متر، عمق آبشستگی و رسوب‌زدایی بیشتری در عرض کانال ایجاد می‌شود. همچنین پشته تشکیل شده در پشت پایه با ارتفاع بیشتری در پروفیل طولی کانال تشکیل می‌شود.



شکل ۹- تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف پایه پل مربعی جسم شناور با ابعاد ۱۲، ۲۵ و ۱۰ سانتی متر الف: هم سطح آب ب: زیر سطح آب

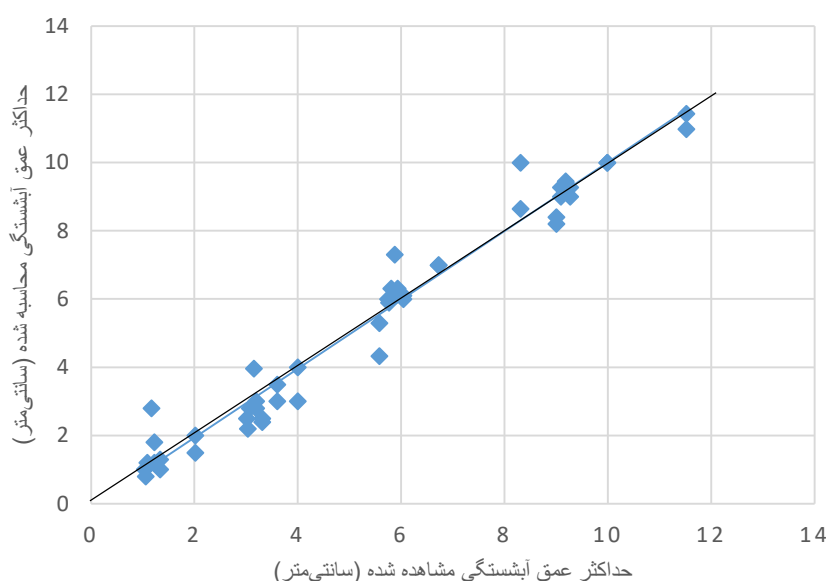


شکل ۱۰- تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف پایه پل مربعی جسم شناور با ابعاد ۴۰، ۲۵ و ۱۰ سانتی متر الف: هم سطح آب ب: زیر سطح آب

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 طبق جدول ۴ این مقدار نزدیک صفر و برابر با ۰/۰۰۲ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است.

جدول ۴- مقدار خطا و ضریب تبیین در آزمایش‌ها		
نوع پایه	R ²	MFE
مربعی	۰/۹۸	۰/۰۰۰۲

شکل ۱۱ بیشینه عمق آبشستگی محاسبه شده در برابر بیشینه 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 با تجمع اجسام شناور جلو پایه مربعی از دقت بالایی برخوردار بوده و به درستی به کار رفته است.



شکل ۱۱- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده و مشاهده شده حاصل از آزمایش

ساعات اولیه شروع آزمایش شکل می‌گیرد و پس از افزایش عمق با روند بسیار کمی ادامه پیدا می‌کند. با افزایش دبی جریان میزان عمق و حجم گودال آبشستگی افزایش می‌یابد. تجمع اجسام شناور باعث افزایش میزان عمق و حجم گودال آبشستگی نسبت به عدم حضور اجسام شناور می‌شود. هرچه ابعاد جسم بزرگتر باشد میزان عمق آبشستگی در اطراف پایه هم بیشتر می‌شود. بعد عرضی برای اجسام گوه‌ای شکل بیشترین تاثیر را دارد و با افزایش عرض جسم شناور میزان

یافتن رابطه مناسب برای پیش‌بینی عمق آبشستگی با استفاده از آنالیز ابعادی در جلو پایه مربعی شکل می‌باشد. با استفاده از نرم افزار SPSS و رگرسیون خطی رابطه ۱۱ به دست آمد که بیشترین R² و کمترین خطا را نشان می‌دهد. در این رابطه R² برابر است با ۰/۹۸ است و نشان می‌دهد ۹۸ درصد از تغییرات آبشستگی، توجیه می‌شود.

$$\frac{d_s}{D} = 1.166 \left(\frac{U}{U_c} \right)^{1.594} + 0.782 \left(\frac{d_d}{b} \right)^{5.221} + 0.005 \left(\frac{l_d}{D} \right)^{3.604} + 0.002 (\Delta A \%)^{7.205} \quad (11)$$

میانگین مجموع خطا پیش‌بینی شده مدل از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$MFE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{\wedge}) \quad (12)$$

در رابطه بالا MFE بیانگر میانگین خطای پیش‌بینی شده، y_i بیانگر حداکثر عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده و $y_i^{\wedge}$ بیانگر حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط مدل و n تعداد

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میزان آبشستگی در جلو پایه مربعی در حالت بدون اجسام شناور (نمونه شاهد) و با اجسام شناور در سه موقعیت بررسی شد. برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری اجسام شناور (زیر سطح، هم سطح و بالای سطح) نمودار توسعه زمانی و حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده مقایسه شد. نتایج کلی حاکی از آن بود که بیشترین میزان آبشستگی در

- countermeasures. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- 3- Briaud, J. L., Chen, H. C., Chang, K. A., Chen, X., and Oh, S. J., 2006. Scour at bridges due to debris accumulation: A review. In *Proc., ICSE 2006, 3rd Int. Conf. on Scour and Erosion*.
 - 4- Chiew, Y. M., and Melville, B. W., 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 25(1), 15-26. <http://doi.org/10.1080/00221688709499285>
 - 5- Diehl, T. H., 1997. Potential drift accumulation at bridges. *USGS*, 95, 95.
 - 6- Ebrahimi, M., Kripakaran, P., Prodanović, D. M., Kahraman, R., Riella, M., Tabor, G., ... and Djordjević, S., 2018. Experimental study on scour at a sharp-nose bridge pier with debris blockage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), 04018071. <https://tn.water.usgs.gov/publications/FHWA-RD-97-028/FHWA-RD-97-028>
 - 7- Ebrahimi, M., Djordjević, S., Panici, D., Tabor, G., and Kripakaran, P., 2020. A method for evaluating local scour depth at bridge piers due to debris accumulation. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering* (Vol. 173, No. 2, pp. 86-99). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jbren.19.00045>
 - 8- Elliot, R. C., Froehlich, D. C., and MacArthur, R. C., 2012. Calculating the potential effects of large woody debris accumulations on backwater, scour, and hydrodynamic loads. In *World Environmental and Water Resources Congress, Crossing Boundaries*, pp. 1213-1222.
 - 9- Ghorbani, B., and Kells, J. A., 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), pp.610-619. <https://doi.org/10.1061/9780784412312.123>
 - 10- Izadinia, E., and Heidarpour, M., 2019. Study of affective phenomena on Sediment transport in local scouring around bridge piers. *Iranian Water Researches Journal*, 13(2), pp.105-116.
 - 11- Kayatürk, Ş. Y., 2005. Scour and scour protection at bridge abutments, Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Turkey.
 - 12- Kattell, J., 1998. *Bridge scour evaluation: Screening, analysis, and countermeasures* (Vol. 9877). USDA Forest Service, San Dimas Technology and Development Center.
 - 13- Lyn, D. A., Cooper, T. J., Yi, Y. K., Sinha, R. N., and Rao, A. R., 2003. Debris accumulation at bridge crossings: laboratory and field studies. <https://doi.org/10.5703/1288284313171>
 - 14- Oscar, L. I. N. K., Pflieger, F., and Zanke, U., 2008. Characteristics of developing scour-holes at a sand-embedded cylinder. *International Journal of Sediment Research*, 23(3), pp.258-266. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(08\)60023-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(08)60023-2)

آبشستگی نیز افزایش پیدا می کند. آبشستگی برای نمونه شاهد و بدون اجسام شناور کمترین میزان عمق را دارد. با تجمع اجسام شناور در سه موقعیت قرارگیری بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب به ترتیب ۱/۴، ۳/۱ و ۳/۶ برابر نمونه شاهد می باشد. همچنین بیشینه عمق آبشستگی در موقعیت زیر سطح آب رخ می دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از اساتید و همکاران دانشگاه شهرکرد که با راهنمایی های علمی در بهبود این پژوهش یاری رساندند و از کارشناسان مجله پژوهش آب ایران برای همکاری در روند انتشار مقاله قدردانی می کنند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ گونه تضاد منافی وجود ندارد و این موضوع مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده ها

داده های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در دسترس خواهد بود.

مشارکت نویسندگان

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

نویسنده اول: انجام مراحل آزمایشگاهی، جمع آوری و تجزیه و تحلیل اولیه داده ها، نگارش متن مقاله
نویسنده دوم: تحلیل داده ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج
نویسنده سوم: مشاوره و بازبینی متن مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می باشد

منابع

- 1- Abu Saidi, Z., Kadri, K., Rahimpour, M., and Ahmadi, M. M., 2017. Laboratory investigation of the effect of accumulation of floating objects on the local scouring of bridge foundations and supports. *Journal of water and soil protection research*, 25(2), 267-282. [In Persian] <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12472.2714>
- 2- Bradley, J. B., Richards, D. L., and Bahner, C., 2005. *Debris control structures: Evaluation and*

- accumulation at bridge pier. In *River Flow*, 2, pp. 1223-1230.
- 27- Rahimi, E. Ghaderi, K. Rahimpour, m. and Ahmadi, m., 2017. Laboratory investigation of the effect of floating objects accumulation on local scour of bridge foundations. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10(6), pp.786-796. <https://elmnnet.ir/doc/11244311-84226>. [In Persian].
 - 28- 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))
 - 29- Richardson, E. V., and Davis, S. R., 2001. *Evaluating scour at bridges* (No. FHWA-NHI-01-001). United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50281/dot_50281_DS1.pdf
 - 30- Saneie, M., and Nokhbe Zaeim, M., 2022. Scouring around the middle-square pier of the bridge due to the change in abutment length and vegetation in the floodplain, a laboratory study. *Journal Of Iranian Water Engineering Research*, 1(1), pp.71-79. <https://doi.org/10.22034/IJWER.2022.313933.1013>
 - 31- Schmocker, L., and Hager, W. H., 2010. Drift accumulation at river bridges. In *River flow* (pp. S713-720). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
 - 32- Vanoni, V. A. (Ed.). (2006, March). *Sedimentation engineering*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784408230>
 - 33- Vice president for strategic planning and supervision., 2016. Guide to local scour calculation methods. Publication No. 318. [In Persian].
 - 34- Wardhana, K., and Hadipriono, F. C., 2003. Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of performance of constructed facilities*, 17(3), pp.144-150. <https://doi.org/10.1061/~ASCE!08873828~2003!17:3~144!>
 - 35- Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F., Clopper, P.E., and Spitz, W.J., 2006. Effect of debris on bridge pier scour. *International Conference on Scour Erosion*, Amsterdam, The Netherland.
 - 36- Zevenbergen, L. W., 2000. Time scale for contraction scour at bridges. In *Building Partnerships*, pp. 1-6. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)405](https://doi.org/10.1061/40517(2000)405)
 - 15- 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)
 - 16- Lagasse, P.F., Clopper, P.E., and Zevenbergen, L.W., 2009. Impacts of debris on bridge pier scour. *Proceedings of the 33rd IAHR Congress*, IAHR, Madrid, pp. 3967–3974. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)85](https://doi.org/10.1061/41147(392)85)
 - 17- Moshashii, M., and Asadi Aghbalaghi, M., 2014. Wash around a square base with a sagittal nose in the presence of floating wooden objects in front of the base. *Scientific-research journal of Modares Civil Engineering*, 15(4), pp.85-96. [In Persian] <https://mcej.modares.ac.ir/article-16-2041-fa.html>.
 - 18- Melville, B. W., 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of hydraulic Engineering*, 123(2), pp.125-136.
 - 19- Melville, B. W., and Chiew, Y. M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), pp.59-65.
 - 20- Melville, B. W., and Dongol, D. M., 1992. Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp.1306-1310. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:9\(1306\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:9(1306))
 - 21- Mueller, D. S., and Parola, A. C., 1998. Detailed scour measurements around a debris accumulation. In *Proceedings of the 1998 International Water Resources Engineering Conference*. 2(1), pp.234-239).
 - 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- 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.
 - 24- Parola Jr, A. C., Kamojjala, S., Richardson, J. E., and Kirby, M. W., 1998. Numerical simulation of flow patterns at a bridge with debris. In *The 1998 International Water Resources Engineering Conference. Part 1*, pp. 240-245).
 - 25- Pagliara, S., and Carnacina, I., 2010a. Temporal scour evolution at bridge piers: Effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), pp.3-13. <https://doi.org/10.1080/00221680903568592>
 - 26- Pagliara, S., and Carnacina, I., 2010b. Scour and dune morphology in presence of large wood debris

مجله پژوهش آب ایران