



## Study of the effect of subsurface slot on reducing scour at the base of a square nose bridge

Samira Farhadi<sup>1</sup> , Mehdi Asadi-Aghbolaghi<sup>2</sup> , Elham Ghanbari-Adivi<sup>3</sup> , and Ali Raeisi<sup>4</sup> 

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: [samira.farhadiii.s@gmail.com](mailto:samira.farhadiii.s@gmail.com)
2. Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: [mahdi.asadia@gmail.com](mailto:mahdi.asadia@gmail.com)
3. Corresponding author, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: [ghanbariadi@sku.ac.ir](mailto:ghanbariadi@sku.ac.ir)
4. Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: [ali.raeisi@sku.ac.ir](mailto:ali.raeisi@sku.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 23 July 2024  
Received in revised form 18 October 2024

Accepted 23 November 2024  
Available online 25 March 2025

**Keywords:**

scour control,  
bridge pier,  
slot,  
floating object.

### ABSTRACT

**Objective:** The objectives of this research were: Investigating the effect of the presence of floating objects on scour around the bridge piers. 2- Laboratory investigation of the effect of a gap below the bed surface in a square bridge pier on reducing scour depth in the presence of floating objects. 3- Presenting an equation to consider the effect of a gap below the bed surface on reducing scour depth in the presence of floating objects.

**Method:** In this study, the effect of creating a subsurface gap in a square pier with a sharp tip on reducing the scour around the bridge pier, where a rectangular floating object is trapped behind the pier, was experimentally investigated. The study was conducted on 2 piers, one with a gap and one without, 3 floating objects (in positions above the water surface, at the water level, and below the water surface), and 4 flow rates (10, 20, 30, and 40) liters per second. A gap of (18+7 cm) was created in the pier, with 7 centimeters of the gap length placed within the bed.

**Results:** For the base without a gap without the presence of an object, the depth of the washout pit increased with the increase in flow rate, and after placing the object behind the base, it was observed that the increase in the flow rate increases the depth of the washout. The closer the object is to the water surface, the scour around the base decreases and vice versa. The closer the object is to the surface of the bed, the deeper the scour increases. The scour depth increased with the increase in flow rate, and in examining the effect of the size of the floating object, the scour depth increased as the size of the floating object increased. Increasing the flow rate enhances both the depth and volume of the sinkhole. Accumulation of floating objects around the bridge base increases the depth and volume of the sinkhole compared to the absence of floating objects. Creating a gap is an efficient method to control erosion around the bridge pier. The pier, with a gap of 7 cm below the surface of the bed up to 40.8% compared to the control sample, controls erosion around the base.

**Conclusions:** The results from 80 experiments indicate a reduction in scour by up to 40.8 percent compared to the control sample; therefore, the use of the gap helps control scour around the pier.

**Cite this article:** Frahadi, S., Asadi-Aghbolaghi, M., Ghanbari-Adivi, E., & Raeisi, A. (2025). Study of the effect of subsurface slot on reducing scour at the base of a square nose bridge. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 16-34. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11120.1138>



## **Introduction**

Bridges are known as important structures all over the world, and the importance of these structures becomes more apparent during floods. Unfortunately, due to various reasons, including the problems caused by the destructive effects of erosion around the bridge foundations, incidents such as bridge failure occur. These incidents cause irreparable damage and it is in this situation that the importance of knowing the important factors of the bridge failure threat becomes more important. Erosion is the movement of bed sediments in the direction of water flowing from one place to another. Washing in the river bed is either due to natural factors such as collisions with foliage and tree trunks, etc., which are in the path of the flow, or due to human factors such as the creation of structures. It is like a bridge in the path of a stream. Used to control the local erosion around the bridge foundations, the direct method is to strengthen the bed through protection stones, etc., and the indirect method is to change the pattern. The current formed around the base of the bridge is like creating a collar and gap, etc.

## **Method**

In this research, by creating a gap in the base of the square bridge with a sharp nose and by placing a floating object behind the base, the depth of local water-wash around the base has been investigated. The experiments were carried out in the hydraulic laboratory of Shahrekord university, in a laboratory flume with a length of 20 meters, width and height of 60 cm and in clear water conditions. The bed materials were used from uniform sediments passed through sieve No. 16 and remaining on sieve 25. By drawing the grading curve, the average diameter of the bed sediments was 0.85 mm. The length of the test bed was 4 meters and the width of the bed was the same as the width of the flume (60 cm), and the bed height was 16 cm. A square base with a sharp nose without a gap was used for the witness and a square base with a sharp nose with a gap, with dimensions of 25 cm in length (18 cm above the bed surface + 7 cm below the bed surface) and 2.55 cm in width were used. Floating objects were designed in 3 different sizes (10x15x20 cm) for object M1, 25x10x10 cm for object M2, and 10x20x30 cm (10x20x30 cm) for object M3. The height of all 3 objects is 10 cm, but the width of the objects from small to large was 20, 25 and 30 cm, which are proportionally larger than each other, but the most important factor is the length of the floating object, which in this examination was selected from small to large object, 15, 12 and 20 cm respectively, and the length of object M2 is smaller than M1. The floating objects were placed behind the foundations in 3 positions: the object is above the water level, the object is at the same level as the water, and the object is below the water level. For each foundation, the washing was first checked without the presence of the floating object and then with the presence of the floating object. Experiments were performed for 4 flow rates (10, 20, 30 and 40 L/s) and the height of water on the bed surface was 20 cm and considered constant. For each footing, the effect of flow rate, the effect of the size of the floating object, and the effect of the position of the object behind the bridge footing were investigated.

## **Results**

By examining the results of 80 tests, for the base without a gap without the presence of an object, the depth of the washout pit increased with the increase in flow rate, and after placing the object behind the base, it was observed that the increase in the flow rate increases the depth of the washout. In the investigation of the size of the floating object behind the base, as the length and width of the floating object increased, the scour pit became wider, and in the investigation of the effect of the position of the floating object, it was observed that the closer

the object is to the water surface, the scour around the base decreases and vice versa. The closer the object is to the surface of the bed, the deeper the scour increases. For the cracked base, a gap was observed 7 cm below the surface of the bed without a floating object. The scour around this base was not observed without the presence of a floating object for the flow rate of 10, 20 and 30 liters per second, but for the flow rate of 40 liters per second. The scour depth was reported to be 1.3 cm, which reduced the scour around the base by 72.3 percent compared to the control base without a gap, which was 4.7 cm. After placing the floating object behind the base, by examining the effect of flow rate, it was observed that the scour depth increased with the increase in flow rate, and in examining the effect of the size of the floating object, the scour depth increased as the size of the floating object increased. And in the investigation of the position of the floating object at the flow rate of 10 and 20 liters per second, no scour was observed around the base of the bridge in any of the investigation modes. At a flow rate of 30 liters per second with object M1 present, scouring around the base of the bridge has intensified as the object descends relative to the water level. However, for objects M2 and M3, when positioned at the same water level, the scouring depth is greater than when the object is submerged. At a flow rate of 40 liters per second, for all three floating objects, scouring is more pronounced when the object is at the water level compared to when it is below the surface. Increasing the flow rate enhances both the depth and volume of the sinkhole. Accumulation of floating objects around the bridge base increases the depth and volume of the sinkhole compared to the absence of floating objects.

### **Conclusions**

Increasing the length of the floating object reduces the scour around the bridge base. Placing floating objects above the water surface causes less washing than placing them below the surface. In the base without the presence of the floating object, the maximum scour depth was formed next to the square rib of the base, and after the presence of the object behind the base, the maximum scour depth was formed near the tip of the nose. Creating a gap in the base of the bridge at low flow rates, 10 and 20 liters per second, controlled the erosion around the base. Creating a gap is an efficient method to control erosion around the bridge pier. The pier, with a gap of 7 cm below the surface of the bed up to 40.8% compared to the control sample, controls erosion around the base.

### **Author Contributions**

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

### **Data Availability Statement**

Data Availability Statement

### **Acknowledgements**

This research has been conducted with the support of Shahrekord University, and we hereby express our gratitude for this support.

### **Ethical Considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

***Funding***

Not applicable.

***Conflict of Interest***

The authors declare no conflict of interest.



## بررسی اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش آبشستگی پایه پل مربعی دماغه تیز، در حضور جسم شناور

سمیرا فرهادی<sup>۱</sup>، مهدی اسدی آقبلاغی<sup>۲</sup>، الهام قنبری عدیوی<sup>۳</sup>، و علی رئیسی<sup>۴</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [samira.farhadiii.s@gmail.com](mailto:samira.farhadiii.s@gmail.com)

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [mahdi.asadia@gmail.com](mailto:mahdi.asadia@gmail.com)

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [ghanbariadiivi@sku.ac.ir](mailto:ghanbariadiivi@sku.ac.ir)

۴. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [ali.raeisi@sku.ac.ir](mailto:ali.raeisi@sku.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

<b>هدف:</b> هدف از این تحقیق موارد زیر است:	<b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی
بررسی اثر حضور اجسام شناور بر آبشستگی اطراف پایه پل ۲- بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف زیر سطح بستر در پایه پل مربعی شکل بر کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور ۳- ارائه یک معادله برای در نظر گرفتن اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور.	<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۰۵/۰۲
<b>روش پژوهش:</b> در این تحقیق از ایجاد شکاف در پایه کمک گرفته شده است. در این پژوهش اثر ایجاد شکاف زیر سطح بستر در یک پایه مربعی دماغه تیز بر کاهش آبشستگی اطراف پایه پل که یک جسم شناور مکعب مستطیلی در پشت پایه گرفتار شده است به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.	<b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۰۷/۲۷ <b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۳/۰۹/۰۳ <b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۴/۰۱/۰۵
<b>یافته‌ها:</b> افزایش دبی جریان باعث افزایش عمق و حجم چاله آبشستگی می‌شود. تجمع اجسام شناور حول پایه پل باعث افزایش عمق و حجم چاله آبشستگی نسبت به عدم حضور اجسام شناور می‌شود. افزایش طول جسم شناور باعث کاهش آبشستگی حول پایه پل می‌شود. قرار گرفتن اجسام شناور در بالای سطح آب، آبشستگی کمتری نسبت به قرار گیری در حالت زیر سطح ایجاد می‌کنند. پایه بدون حضور جسم شناور، بیشترین عمق آبشستگی در کنار ضلع مربعی پایه شکل می‌گرفت و بعد از حضور جسم پشت پایه بیشترین عمق آبشستگی در نزدیکی نوک دماغه شکل می‌گرفت. ایجاد شکاف در پایه پل در دبی‌های کم، ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه موجب کنترل فرسایش حول پایه بود. ایجاد شکاف یک روش کارآمد برای کنترل آبشستگی حول پایه پل است. پایه با شکاف ۷ سانتی متر زیر سطح بستر تا ۴۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد موجب کنترل آبشستگی حول پایه می‌شود.	<b>کلیدواژه‌ها:</b> کنترل آبشستگی، پایه پل، شکاف، جسم شناور
<b>نتیجه‌گیری:</b> نتایج حاصل از ۸۰ آزمایش نشان دهنده کاهش آبشستگی تا ۴۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد است؛ بنابراین استفاده از شکاف موجب کنترل آبشستگی حول پایه می‌شود.	

**استناد:** فرهادی، سمیرا؛ اسدی آقبلاغی، مهدی؛ قنبری عدیوی، الهام؛ و رئیسی، علی. (۱۴۰۴). بررسی اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش آبشستگی پایه پل مربعی دماغه تیز، در حضور جسم شناور. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۱)، ۱۶-۳۴.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11120.1138>



### مقدمه

آبشستگی یکی از مخرب‌ترین عوامل شکست پایه پل در طبیعت به شمار می‌آید. همه ساله در سراسر جهان موضوع شکست پل و عوامل تخریب آن مهم‌ترین مسئله به‌ویژه در زمان بروز سیل‌های ویرانگر به شمار می‌آید، این موضوع دانشمندان و پژوهشگران را به تکاپو برای ارائه راه‌حل مطمئن وا می‌دارد؛ بنابراین تلاش برای حفاظت از پل‌ها در برابر آبشستگی امری ضروری است. آبشستگی حرکت و جاداشدن ذرات بستر توسط جریان و انتقال آن‌ها به مکان دیگر است که حاصل اندرکنش نیروی محرک ایجاد شده توسط جریان و نیروی مقاوم ناشی از وزن ذرات و اصطکاک میان ذرات بستر است (ماهان، ۱۳۹۱).

هنگام برخورد آب به دماغه پایه پل، سرعت ناشی از جریان تبدیل به فشار روی پایه می‌شود، سرعت از سطح آب به سمت کف بستر کاهش می‌یابد، همچنین فشار دینامیکی روی پایه از بالا به پایین هم کاهش می‌یابد و این گرادیان فشار باعث به‌وجود آمدن جریانی به سمت کف بستر خواهد شد. بعد از برخورد جریان به کف بستر، جریان در جهت‌های مختلف پراکنده شده و باعث ایجاد حفره‌هایی در محل برخورد به بستر شده و در ادامه مقداری از این جریان که به سمت بالا پراکنده شده در برخورد با جریان عمومی مجبور به ادامه مسیر در جهت این جریان شده و مجدد به پایه برخورد کرده و در داخل حفره ایجاد شده گردابی تشکیل می‌دهد که در دو طرف پایه به شکل نعل اسب<sup>۱</sup> جریان می‌یابند که باعث انتقال مصالح در دو طرف پایه می‌شوند. در برخورد جریان آب با کناره‌های پایه (به جز دماغه) خطوط جریان منحرف شده و از بدنه جدا شده و در نتیجه گردابی در پشت پایه به وجود می‌آورد که محور این جریان قائم است و به اسم گردابه‌های برخاستگی<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند، این گردابه‌ها رسوبات کنده شده حفره آبشستگی را به پایین دست پایه انتقال می‌دهند (رحیمی، ۱۳۹۶).

در سال‌های اخیر به‌وفور سیل‌های غیرقابل کنترل رخ داده است که باعث فرسایش ساحل رودخانه‌ها و ریشه‌کن شدن درختان می‌شود. اجسام شناور مانند برگ، سرشاخه‌ها و قطعات بزرگ چوب که طی یک سیلاب از بالادست حرکت کرده در اطراف پایه پل تجمع می‌یابند. زمانی که یک توده از اجسام شناور جلوی پایه شکل می‌گیرد، فضاهای خالی آن توسط برگ، سرشاخه‌ها، علف‌ها، و رسوبات پر می‌شود و باعث مسدود شدن بخشی از دهانه پل و یا بستن کامل آن می‌شود که در ادامه این انسداد و تنگ‌شدگی، آشفته‌گی جریان در جلوی پایه پل و باعث افزایش عمق حفره آبشستگی خواهد شد (مشعشی و اسدی، ۱۳۹۴).

اجسام شناور چوبی در جلوی پایه‌ها به شکل‌های مختلفی روی هم انباشته می‌شوند که بیشتر به شکل مکعب‌مستطیل مشاهده می‌شوند (ابوسعیدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ و لاگاس و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۰). آورده‌های شناور چوبی بزرگ، سطح مقطع جریان را کاهش داده، جریان را منحرف کرده و سرعت را در برخورد با پایه پل افزایش خواهد داد (پاگلیارا و کارناسینا<sup>۴</sup>، ۲۰۱۱).

### ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

روش‌های مختلفی تا کنون برای کاهش آبشستگی پایه پل به کار گرفته شده است که یا به‌صورت مستقیم با استفاده از سنگ‌ریز حفاظتی، تشک حفاظتی و منحرف‌کننده‌ها بستر را مقاوم‌سازی می‌کنند (بیات، ۱۳۷۹) و یا به‌صورت غیرمستقیم با استفاده از طوق و شکاف و شمع‌های حفاظتی نیروهای مخرب کاهش داده می‌شوند و الگوی جریان اصلاح می‌شود (اردلانی و همکاران، ۱۳۹۸). یکی از روش‌های پیشنهادی محققان برای کنترل و کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل استفاده از شکاف در پایه پل است. برای اینکه این شکاف حداکثر کارایی را در کاهش عمق آبشستگی داشته باشد، لازم است تا مشخصات این شکاف از منظر سطح شکاف، تراز شکاف نسبت به بستر و... تعیین گردد. در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

1. Horseshoe Vortex
2. Wake Vortex
3. Lagasse et al
4. Pagliara and Carnacina

## ۱. مطالعات داخلی

مشعشی و اسدی (۱۳۹۴) در پژوهشی آب‌شستگی اطراف پایه پل با دماغه سهمی شکل در حضور اجسام شناور چوبی در جلوی پایه را بررسی نمودند، در این مطالعه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در دو حالت وجود اجسام شناور و یا نبود آن‌ها در سه دبی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه و ابعاد مختلف اجسام شناور انجام شد. در این آزمایش‌ها از یک پایه مربعی با دماغه سهمی شکل به ضلع ۹ سانتیمتر و ارتفاع دماغه سهمی ۱۵ سانتیمتر استفاده شد. نتیجه مشاهدات نشان داد که وقتی اجسام شناور بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب قرار بگیرند عمق چاله آب‌شستگی به ترتیب  $۲/۲،۳۶/۲$  و  $۱/۴۴$  برابر نسبت به نمونه شاهد که بدون اجسام شناور است است. که بیشترین مقدار مربوط به تجمع اجسام شناور هم سطح آب و جلو پایه مربعی بادماغه سهمی شکل برابر  $۲/۳۶$  بود.

رحیمی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی موضعی اطراف پایه پل را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش اثر دبی جریان، عمق آب روی سطح بستر، شکل و ضخامت اجسام شناور و موقعیت اجسام شناور در طی ۴۵ آزمایش بررسی شد. بر اساس نتایج هرچه میزان عمق آب روی بستر بیش‌تر باشد باعث کاهش آب‌شستگی اطراف پایه پل می‌شود، با افزایش دبی فرسایش بستر و آب‌شستگی حول پایه بیشتر شده و با بررسی اثر شکل‌ها به ترتیب شکل‌های مستطیلی، استوانه‌ای و مثلثی باعث افزایش آب‌شستگی می‌شود و قرارگیری اجسام شناور در نزدیکی سطح بستر سبب افزایش آب‌شستگی حول پایه پل می‌شوند

ابوسعیدی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل در شرایط آب زلال نشان دادند که هرچه فاصله بین پایه‌ها و همچنین با تکیه‌گاه کمتر باشد افزایش عمق آب‌شستگی در اطراف پایه و تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد و هرچه ضخامت و طول مؤثر اجسام شناور بیشتر باشد عمق آب‌شستگی بیشتر خواهد شد. همچنین شکل اجسام شناور نیز بر عمق آب‌شستگی مؤثر خواهند بود. اشکال مستطیلی، استوانه‌ای و مثلثی به ترتیب بیشترین آب‌شستگی را به وجود آوردند. مقایسه نهایی توپوگرافی بستر رسوبی نشان داد که در حضور اجسام شناور افزایش  $۴۷/۶$  درصد در حجم آب‌شستگی نسبت به آزمایش شاهد (بدون حضور اجسام شناور) رخ داده است.

اردلانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی اثر مساحت سطح شکاف در پایه در کاهش آب‌شستگی موضعی اطراف پایه پل را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش در شرایط آب زلال و برای چهار دبی ۳۲، ۲۹،  $۲۵/۶$  و  $۲۱/۲$  لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که عمق آب‌شستگی رابطه مستقیمی با عدد فرود و تراز شکاف نسبت به بستر و رابطه عکس با مساحت سطح شکاف دارد. بهترین کارایی ایجاد شکاف در پایه، در بیشترین ابعاد شکاف، در تراز زیر بستر و در شرایط کمترین عدد فرود، عمق آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها،  $۵۵/۴$  درصد کاهش داشته است. پس به‌طور کلی استفاده از شکاف عملکرد مثبتی برای کاهش آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل به حساب می‌آید و با افزایش عدد فرود و قرارگرفتن شکاف در بالاتر از تراز بستر افزایش عمق آب‌شستگی را مشاهده کرد.

حیدری و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی استفاده از شکاف در پایه پل برای کاهش عمق آب‌شستگی پایه پل را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با استفاده از چهار شکاف با اشکال دوزنقه‌ای، دوزنقه‌ای برعکس، مثلثی، مثلثی برعکس و سطح مقطع یکسان و در شرایط هیدرولیکی با اعداد فرود  $۰/۳$ ،  $۰/۲۷$ ،  $۰/۲۴$ ،  $۰/۲$  انجام شد. در نتایج حاصل مشخص شد که در پایه بدون شکاف با افزایش عدد فرود به میزان ۵۰ درصد، حداکثر عمق آب‌شستگی و حجم چاله آب‌شستگی به ترتیب  $۳/۱$  و ۹ برابر می‌شود. باتوجه به نتایج، عمق و حجم گودال آب‌شستگی در شکاف دوزنقه‌ای و در عدد فرود  $۰/۲$  بهترین عملکرد و کاهش تقریبی  $۷۳/۵۸$ ،  $۸۱/۵۹$  را داشته است. و شکاف مثلثی در شرایط یکسان و عدد فرود  $۰/۳۰$  کاهش تقریبی  $۱۵/۵$ ،  $۴۲/۸۱$  در عمق و حجم گودال آب‌شستگی، و کمترین عملکرد را داشته است. افزایش عدد فرود جریان، تغییرات توپوگرافی بستر کانال و همچنین افزایش حجم گودال آب‌شستگی را به همراه داشت. با قرارگیری تراز شکاف بالاتر از بستر، عمق آب‌شستگی افزایش یافت.

کاظمیان و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی اثر شکاف در کاهش آبشستگی پایه پل در بستر با رسوب‌های یکنواخت و غیر یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از ۴ پایه استوانه‌ای به‌عنوان مدل آزمایشگاهی که یک‌پایه به‌عنوان نمونه شاهد بدون شکاف و ۳ پایه استوانه‌ای شکاف‌دار با شکافی به ارتفاع  $b$  و فاصله  $b$  از بستر، شکافی به ارتفاع  $b$  و هم سطح بستر و شکافی به ارتفاع  $b$  و بالای بستر و  $1/55$  برابر  $b$  زیر بستر استفاده شد. بر اساس نتایج، هرچه شکاف به کف بستر نزدیکتر باشد موجب کاهش آبشستگی اطراف پایه پل می‌شود، در بستر یکنواخت ۴۷ درصد و در بستر غیریکنواخت ۷۷ درصد باعث کاهش آبشستگی حول پایه پل می‌شود و نتیجه گرفتند که هرچه بستر غیریکنواخت‌تر باشد به دلیل ایجاد لایه سپری در حول پایه پل، آبشستگی اطراف پایه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

## ۲. مطالعات خارجی

پاگلیارا و کارناسینا (۲۰۱۰) در پژوهشی اثر زبری و تخلخل خرده‌های چوب بر آبشستگی پایه پل را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه در مرکز تحقیقات دانشگاه پیزا ایتالیا و در شرایط آب زلال انجام شد، کانال آزمایش دارای  $7/6$  متر طول و  $0/61$  متر عرض و  $0/5$  متر عمق که از جنس فولاد و شیشه تشکیل شده بود. شدت جریان از ۶۵ تا ۱۰۰ درصد سرعت آستانه متغیر بود و تا ۱۸ درصد مساحت کل جریان را در بر گرفت. عمق جریان از  $2/67$  تا  $5/67$  برابر قطر پایه متغیر بود. در این پژوهش اثرات زبری و تخلخل خرده‌های چوب از نظر تکامل زمان آبشستگی و مورفولوژی آبشستگی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که عمق آبشستگی در حضور تجمع خرده‌های چوب تا سه برابر افزایش می‌یابد، زبری نسبی خرده‌های چوب رابطه مستقیمی با آبشستگی پایه پل دارد و پارامترهای مؤثر بر تکامل زمان آبشستگی، شدت جریان و نسبت انسداد است.

پاگلیارا و کارناسینا (۲۰۱۱) در پژوهشی تأثیر خرده‌های بزرگ چوبی بر آبشستگی رسوبات در پایه‌های پل را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این مقاله تحلیل تأثیر سطح حاصل از اجسام تجمع اجسام شناور چوبی بر آبشستگی پایه پل است. اندازه‌های مختلف پایه، عرض کانال و مواد رسوبی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. حداکثر حفره آبشستگی در حضور تجمع اجسام شناور با حداکثر حفره آبشستگی برای یک‌پایه مجزا مقایسه شده است. در نهایت، داده‌ها با یافته‌های تحقیقات قبلی مقایسه شده‌اند که گسترش آبشستگی در پایین دست پایه پل در حضور تجمع اجسام شناور را نشان می‌دهند. همچنین روابط جدیدی برای پیش‌بینی اثر تجمع اجسام شناور بر آبشستگی پایه پل، هم از نظر آبشستگی ماکزیمم نسبی و هم تکامل آبشستگی زمانی ارائه شده است. اثر تجمع رسوبات بر اساس مقایسه بین تکامل آبشستگی حداکثر زمانی برای آزمایش در حضور تجمع اجسام شناور بزرگ (LWD) <sup>۱</sup> و تکامل آبشستگی حداکثر زمانی برای پایه جدا ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌داد که هر دو طول تجمع (LWD) در امتداد پایین دست پایه تأثیر زیادی بر آبشستگی پایه پل دارند. ماسه برای حفاظت از پایه در برابر آب-شستگی مؤثرتر از حالت تنها با طوقه بود.

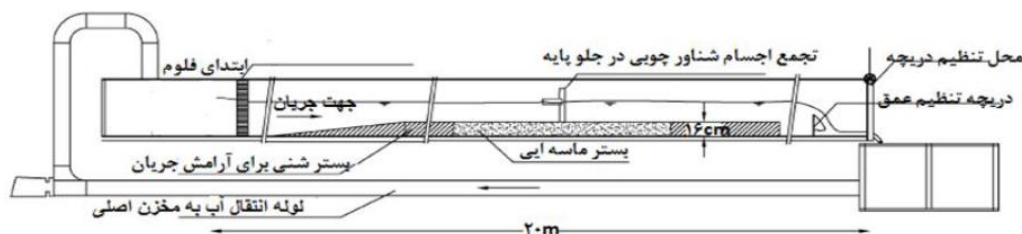
باتوجه به اهمیت مسئله آبشستگی اطراف پایه‌های پل و همچنین باتوجه به مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه، لزوم یک بررسی متمرکز بر روش‌های کاهش آبشستگی کاملاً آشکار است. طبق مطالعات انجام شده، تا کنون تحقیقی در مورد کاهش عمق آبشستگی پایه پل مربعی‌شکل با دماغه تیز دارای شکاف زیر سطح بستر که در جلوی پایه تجمع اجسام شناور رخ داده باشد، به‌صورت هم‌زمان انجام نشده است؛ لذا در این پژوهش با استفاده از تعبیه شکاف زیر سطح بستر در پایه در حضور اجسام شناور، کارایی این روش در کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها به‌صورت مدل فیزیکی بررسی گردید و هندسه گودال آب-شستگی ایجاد شده با نمونه شاهد مقایسه و تحلیل شد.

هدف از این تحقیق، بررسی اثر حضور اجسام شناور بر آبشستگی اطراف پایه پل ۲- بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف زیر سطح بستر در پایه پل مربعی‌شکل بر کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور ۳- ارائه یک معادله برای در نظر گرفتن اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور است.



### روش پژوهش

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. تمام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در بستر رسوبی به ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر، در طول ۴ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. پایه در وسط فلوم و در فاصله ۱۰ متر از حوضچه آرامش قرار داده شد و برای جلوگیری از فروریختن ابتدا و انتهای بستر رسوبات و آرامش جریان از سنگ‌ریزه در ابتدا و انتهای بازه بستر رسوبی استفاده شد که در شکل (۱) نشان داده شده است. تجهیزات آزمایشگاه شامل یک فلوم به طول ۲۰ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر که دیواره‌ها از پلی‌گلاس ساخته شده و امکان داده برداری در حین آزمایش فراهم بود. ابتدای فلوم یک حوضچه آرامش تعبیه شده است و سه ورق فلزی پوشیده از پوشال برای آرامش بیشتر جریان در حوضچه قرار داده شده و انتهای فلوم، یک دریچه برای تنظیم عمق جریان قرار دارد که جریان بعد از خروج از دریچه انتهایی به یک چاهک که در فاصله کمی از دریچه قرار دارد می‌ریزد و دوباره توسط سیستم چرخش آب به ابتدای فلوم و لوله ورودی منتقل می‌شود. بر روی لوله ورودی جریان به حوضچه آرامش یک دبی سنج جهت قرأت دبی نصب شده و یک شیر برای تنظیم جریان ورودی به حوضچه قرار دارد. دو کلید روی یک صفحه کنتور برای روشن و خاموش شدن پمپ قرار دارد.



شکل ۱. نمای شماتیک از فلوم آزمایشگاه

مواد بستر باید به گونه‌ای انتخاب شود که از تشکیل ریبیل جلوگیری شود، ریبیل یا فرم بستر در شرایطی شکل می‌گیرد که سرعت جریان از سرعت بحرانی آستانه حرکت مواد بستر بیشتر باشد در این حالت مواد بستر از بالادست کنده شده و در گودال آبخستگی جایگزین ذرات بستر که در اثر برخورد جریان به پایه شکل گرفته می‌شوند، و کل بستر هم‌زمان دچار فرسایش و آبخستگی می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است.



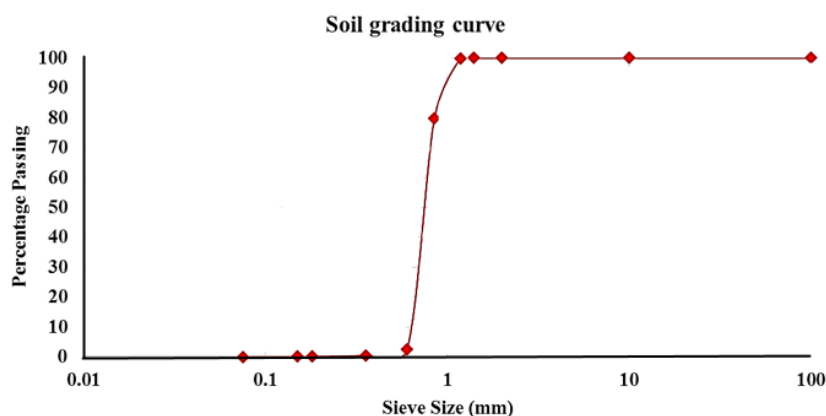
شکل ۲. فرم بستر شکل گرفته در تحقیق حاضر

رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای جلوگیری از تشکیل ریبیل پیشنهاد دادند که قطر متوسط ذرات رسوبی کمتر از ۰/۷ میلی‌متر نباشد و از طرفی برای جلوگیری از تأثیر اندازه ذرات رسوبی بر عمق آبخستگی باید در رابطه زیر صدق کند.

$$0.7 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 3.6 \text{ mm} \quad (۱)$$

برای انجام آزمایش ابتدا مصالح موردنیاز بستر با استفاده از الک‌های شماره ۱۶ و ۲۵ فراهم شد. در مرحله بعد برای رسم منحنی دانه بندی و یافتن قطر متوسط ذرات بستر مقداری از ماسه‌های الک شده را وزن کرده و در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه مورد آزمایش قرار داده، به این صورت که ابتدا الک‌ها به ترتیب روی دستگاه لرزاننده چیده شد و سپس نمونه وزن شده را روی بالاترین الک ریخته و دستگاه را روشن کرده تا ماسه‌ها در الک به لرزه درآیند و به الک‌های پایین منتقل شوند و به مدت

ده دقیقه این عمل لرزش الکها توسط دستگاه انجام شد بعد از به اتمام رسیدن زمان دستگاه را خاموش کرده و با دقت زیاد وزن باقی مانده ماسه روی هر الک را یک به یک به ترتیب از بالا با برداشتن الکها از روی هم روی ترازو وزن کرده و در یک دفترچه یادداشت کرده و در اکسل نمودار دانه بندی را با استفاده از داده‌های ثبت شده رسم شده است و به این ترتیب اندازه  $D_{50}$  رسوبات مشخص شده است.



شکل ۳. منحنی دانه بندی

آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شد، به این دلیل که بیش‌ترین آب‌شستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد برای تعیین سرعت بحرانی، از رابطه ارائه شده توسط نیل (۱۹۷۳) استفاده می‌شود:

$$U_c = 31.08 \theta_c^2 k_{U,h} \frac{1}{d_{50}^3} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $U_c$  سرعت بحرانی (سرعت آستانه حرکت رسوبات) برحسب (m/s)،  $h$  عمق آب برحسب (m)،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوبی برحسب متر (m) و  $k_{U,h}$  ضریب ثابتی است که مقدار آن در سیستم آمریکایی ۱ و در سیستم ۱/۸ می‌باشد. و همچنین برای محاسبه پارامتر شیلدز ( $\theta_c$ ) توسط رابطه پیشنهاد شده مولر (۱۹۹۶) تخمین زده می‌شود:

$$\theta_c = 0.0019 d_{50}^{-0.384} \quad \text{و} \quad d_{50} \leq 0.0009 \quad (3)$$

با استفاده از رابطه فوق مقدار پارامتر بی‌بعد شیلدز برابر با ۰/۲۸۶ به دست آمد که با قرار دادن در رابطه (۲) مقدار سرعت بحرانی برای تحقیق حاضر ۰/۳۹۱ به دست آمد. ۲ پایه مربعی دماغه تیز با طول ضلع ۸/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر که شامل یک‌پایه بدون شکاف (شاهد) و یک‌پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر انتخاب شد، بر اساس پیشنهاد کومار و همکاران (۱۹۹۹) و گرمالدی و همکاران (۲۰۰۹)، راندمان شکاف در شرایطی که بخشی از شکاف داخل بستر قرار گیرد افزایش می‌یابد. آقاخانی و همکاران (۱۳۹۰)، انتخاب عرض شکاف، ۰/۳ قطر پایه (D) و در حالتی که شکاف داخل بستر قرار بگیرد ۷۲/۵ درصد باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. حیدر پور و همکاران (۱۳۸۲)، انتخاب طول شکاف ۲ برابر قطر پایه که داخل بستر قرار گیرد بیشترین اثر را در کاهش آب‌شستگی دارد، بنابراین ابعاد شکاف ۱۸ در ۲/۵۵ سانتی‌متر ایجاد شد، بر اساس پیشنهاد دیپل (۱۹۹۷) اجسام شناور در طبیعت به شکل مکعب‌مستطیل دیده می‌شوند و با گذشت زمان این اجسام شناور به سمت پایین و پشت پایه تجمع می‌یابند در این مطالعه از سه جسم شناور به شکل مکعب‌مستطیل با ابعاد (۲۰×۱۵×۱۰cm) ابعاد جسم M1، (۲۵×۱۲×۱۰cm) ابعاد جسم M2 و (۳۰×۲۰×۱۰cm) ابعاد جسم M3، در ۳ موقعیت قرارگیری بالاتر از سطح آب (۵ سانتی‌متر بالای سطح آب)، هم سطح آب و زیر سطح آب (۵ سانتی‌متر بالای سطح بستر) استفاده شد. آزمایش‌ها شامل

۸۰ آزمایش شامل، ۲ پایه، ۴ دبی (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰)، ۳ جسم شناور و ۳ موقعیت قرارگیری جسم و برای هر پایه یک نمونه شاهد با ۴ دبی بدون حضور جسم شناور انجام گرفت. برای انجام آزمایش ابتدا یک ورق فلزی در پایین دست حوضچه آرامش در فاصله ۳ متری ابتدای بستر برای آرامش جریان قرار داده شد و دریچه انتهایی کانال، جهت به عمق رسیدن جریان به صورت کامل بسته شد. بعد از روشن شدن پمپ دبی جریان در حالت ۲ لیتر بر ثانیه تنظیم شد و تا به عمق رسیدن جریان صبر کرده در این مرحله خیلی آهسته ورق فلزی بالادست بستر را برداشته و سپس با افزایش دبی و قرأت توسط دبی سنج نصب شده روی لوله جریان ورودی به حوضچه آرامش، دبی مورد نظر را تنظیم کرده و دریچه انتهایی را همزمان با افزایش دبی با دقت و سرعت کم باز کرده تا به عمق ۲۰ سانتی متر روی سطح بستر برسد در اینجا شرایط آزمایش به حالت ایده آل رسیده و با دقت داده برداری حین آزمایش انجام می شود و بعد از به تعادل رسیدن آبشستگی حول پایه دستگاه پمپ را می توان خاموش کرد و بیشینه عمق آبشستگی و توپوگرافی بستر را توسط دستگاه عمق سنج (کولیس) اندازه گیری کرد و این دستگاه عمود بر کف کانال و روی لبه های بالایی کانال سوار شده و به راحتی در طول و عرض کانال حرکت می کند و نوک دستگاه عمق سنج تیز است که برای داده برداری دقت کار بالا میرفت و راحت تر داده برداری انجام میشد.

### ۱. آنالیز ابعادی

بیشترین عمق آبشستگی،  $d_s$ ، در محاسبات اطراف پایه های پل، تابعی از عوامل زیر است:

$$f(D, b, w, L_b, H_b, h, U, \sigma_g, D_{50}, U_c, \mu, \rho, g, W_d, L_d, d_s, S) = 0 \quad (4)$$

در این رابطه  $D$  قطر پایه،  $L_b$  فاصله بین پایه و یا انتهای عرض فلوم،  $H_b$  ارتفاع پایه،  $b$  عرض فلوم،  $w$  عرض شکاف،  $d_s$  عمق آبشستگی،  $\sigma_g$  انحراف معیار مصالح رسوبی بستر،  $\rho$  چگالی،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی آب،  $U$  سرعت متوسط جریان،  $U_c$  سرعت آستانه،  $g$  شتاب گرانش،  $h$  ارتفاع آب،  $D_{50}$  میانگین قطر ذرات،  $W_d$  عرض جسم شناور،  $L_d$  طول جسم شناور و  $S$  مساحت سطح شکاف است. با به کارگیری تئوری باکینگهام و انتخاب  $\rho, U, h$  به عنوان متغیرهای تکراری، معادله (۴) را می توان به صورت رابطه بی بعد زیر نوشت:

$$\frac{d_s}{h} = f\left(\frac{h}{D_{50}}, \frac{h}{b}, \frac{h}{D}, \frac{h}{w}, \frac{h}{L_b}, \frac{h}{H_b}, \frac{h}{L_d}, \frac{h}{W_d}, \frac{U}{U_c}, \frac{\rho U h}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gh}}, \sigma_g, \frac{S}{h.D}\right) \quad (5)$$

عدد رینولدز در دبی های مورد بررسی در آزمایش ها بر اساس شرایط هیدرولیکی تعریف شده در این پژوهش، بزرگتر از ۲۰۰۰ است که بیانگر این است که اثر نیروی لزجت ناچیز است و به این علت عدد رینولدز از محاسبات حذف می شود. مصالح مورد استفاده یکنواخت و ثابت می باشند؛ بنابراین فاکتور  $D_{50}$  و  $\sigma_g$  نیز حذف می شوند و با پارامترهایی که بیشترین تأثیر را دارند معادله (۶) که یک معادله رگرسیونی است و برای به دست آوردن عمق آبشستگی در پایه شکاف دار در حضور اجسام شناور است به دست آمد.

$$\frac{d_s}{h} = 1.319 \left(\frac{u}{u_c}\right)^{4.575} + 0.001 \left(\frac{h}{b}\right)^{.001} + 0.001 \left(\frac{D}{D_{50}}\right)^{.001} + 0.001 \left(\frac{L_d}{D}\right)^{.016} + 973.739 (\% \Delta A)^{4.182} + 0.048 \left(\frac{S_1}{hD}\right)^{166.486} + 0.027 \left(\frac{S_2}{hD}\right)^{210.459} \quad (6)$$

## ۲. معیارهای ارزیابی

در نهایت نتایج به دست آمده از رابطه استخراج شده با نتایج واقعی مقایسه شد و با کمک معیارهای ارزیابی زیر (معادلات (۷) و (۸)) دقت این رابطه بررسی گردید.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (۷)$$

$$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (۸)$$

در معادله (۷)، مقدار ضریب تبیین،  $SSR$  مجموع مربعات رگرسیون و  $SST$  مجموع کل مربعات است. در معادله (۸)،  $MFE$  میانگین مجموع خطای پیش‌بینی شده است.

### یافته‌های پژوهش

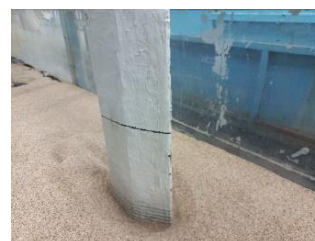
#### ۱. نتایج تغییرات آبشستگی برای پایه بدون شکاف بدون حضور جسم (نمونه شاهد)

##### اثر دبی جریان

با بررسی نتایج آزمایش‌های مربوط به پایه بدون شکاف، مشاهده شد آبشستگی حول پایه پل بدون شکاف در حالت شاهد یعنی بدون حضور اجسام شناور حول پایه، با افزایش دبی جریان، تغییرات گودال گسترده خواهد شد که در شکل (۴) نشان داده شده است. این تغییرات برای افزایش دبی از ۲۰ به ۳۰ لیتر، عمق آبشستگی به میزان ۴۲/۸ درصد افزایش یافته است. افزایش دبی از ۳۰ به ۴۰ لیتر، موجب افزایش آبشستگی به میزان ۵۵/۳ درصد است.



ب



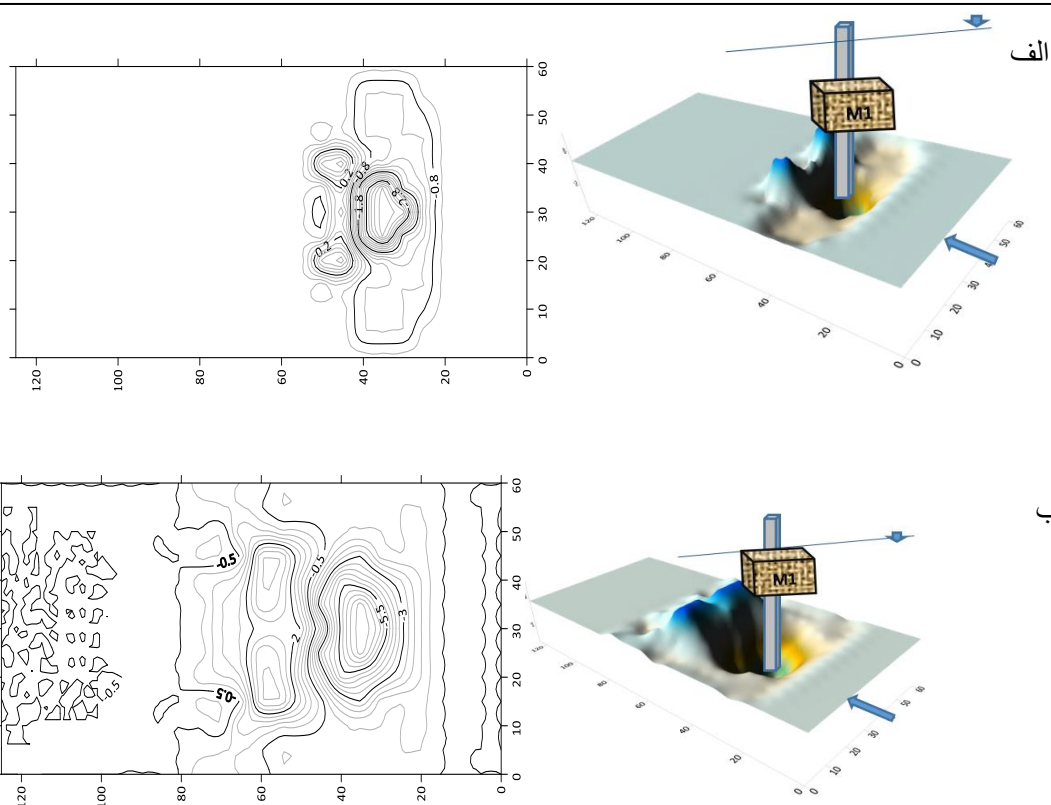
الف

شکل ۴. مقایسه گودال آبشستگی حول پایه بدون شکاف (الف) بدون جسم شناور، (ب) در حضور جسم شناور

#### ۲. نتایج تغییرات آبشستگی برای پایه بدون شکاف در حضور جسم (نمونه شاهد)

##### اثر دبی جریان

شکل (۵)، مقایسه اثر افزایش دبی از ۳۰ به ۴۰ لیتر بر ثانیه بر آبشستگی حول پایه پل بدون شکاف در حضور جسم شناور  $M1$  و حالت قرارگیری جسم هم‌سطح آب انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده عمق آبشستگی برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه ۴/۵ سانتی‌متر و برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه به ۷/۸ سانتی‌متر رسیده است که ۴۲/۳ درصد افزایش یافته است. بر اساس شکل نیز کاملاً مشهود است که با افزایش دبی گودال آبشستگی عمیق و گسترده شده است.

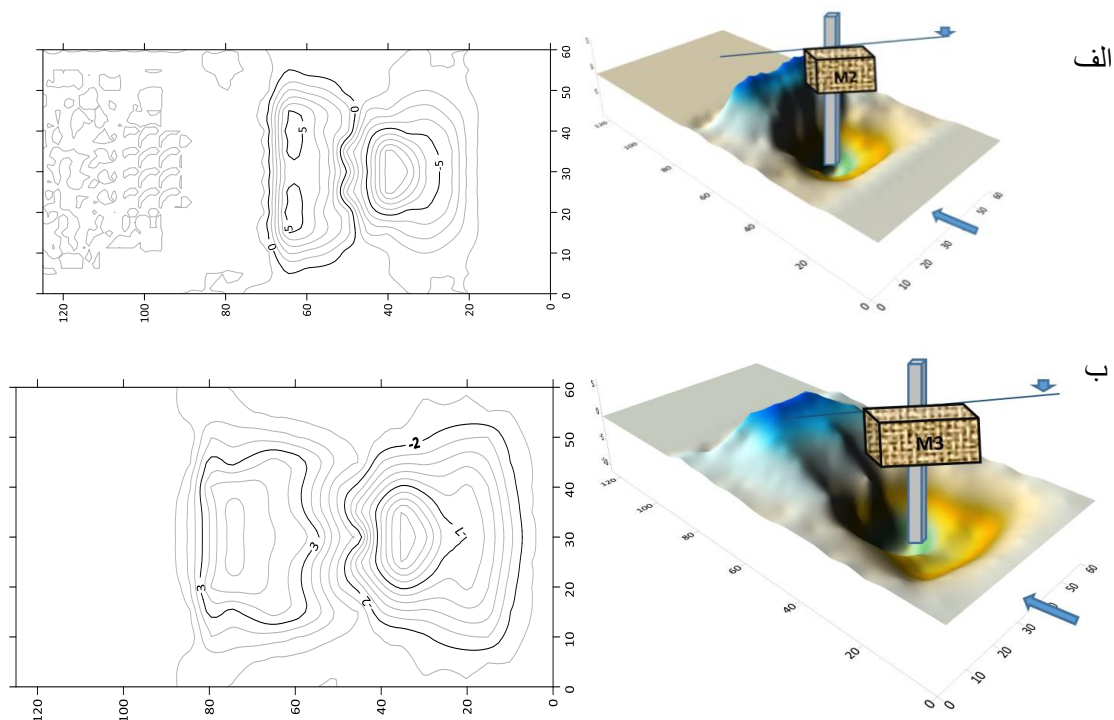


شکل ۵. مقایسه گودال آب‌شستگی حول پایه بدون شکاف در حضور جسم شناور M1 هم سطح آب برای دبی ۳۰ و ۴۰ (الف) دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه (ب)، دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه

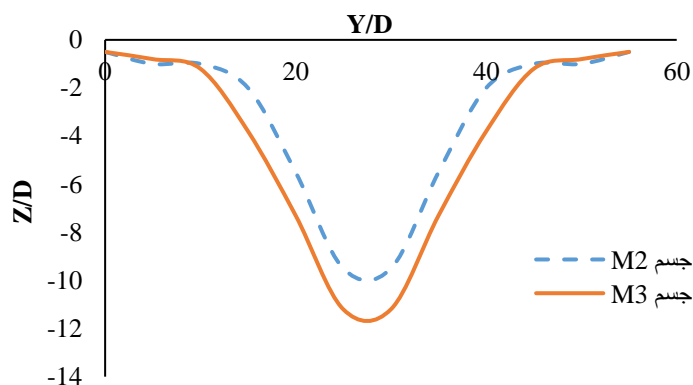
### اثر اندازه جسم شناور

بررسی اثر اندازه جسم شناور، وابسته به اندازه طول، عرض و ارتفاع جسم است. در این پژوهش اجسام شناور در ۳ اندازه متفاوت (۲۰×۱۵×۱۰cm) برای M1، (۲۵×۱۲×۱۰cm) برای M2 و (۳۰×۲۰×۱۰cm) برای M3 طراحی شدند. ارتفاع هر ۳ جسم ۱۰ سانتی‌متر است؛ اما عرض اجسام از کوچک به بزرگ ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد که به یک نسبت از هم بزرگ‌تر هستند و اما مهم‌ترین فاکتور بررسی طول جسم شناور است که در این بررسی به ترتیب از جسم کوچک به بزرگ ۱۵، ۱۲ و ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شد و طول جسم M2 کوچکتر از M1 است.

با بررسی نتایج حاصل مشاهده شد با بزرگ‌شدن جسم شناور گودال آب‌شستگی افزایش می‌یابد. شکل (۶ و ۷)، اثر افزایش اندازه جسم شناور برای پایه بدون شکاف را نشان می‌دهد. در این مقایسه جسم M2 و M3 در حالت قرارگیری جسم زیر سطح آب و برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی عمق آب‌شستگی برای جسم M2، ۹/۵ سانتی‌متر و برای جسم M3، ۱۱/۲ سانتی‌متر مشاهده شد که ۱۵/۱ درصد افزایش یافته است و با مشاهده شکل نیز با بزرگ‌شدن جسم عمق و حجم گودال آب‌شستگی افزایش یافته است.



شکل ۶. مقایسه گودال آبشستگی حول پایه بدون شکاف با دبی  $40$  لیتر بر ثانیه و جسم زیر سطح آب، الف) جسم M2، ب) جسم M3



شکل ۷. تغییرات عرضی گودال آبشستگی حول پایه بدون شکاف با دبی  $40$  لیتر بر ثانیه برای اجسام شناور M2 و M3 در حالت قرارگیری زیر سطح آب

در بررسی شکل (۷) با بزرگ شدن جسم شناور سطح مقطع جریان کاهش یافته است و جریان آب برای عبور با سطح مقطع کم تر روبه رو است که همین موضوع موجب اغتشاش بیش تر جریان و در نتیجه افزایش گودال آبشستگی حول پایه شده است.

### اثر موقعیت جسم شناور

بعد از پایان یافتن آزمایش های مربوط به پایه بدون شکاف شاهد، اجسام شناور در سه موقعیت قرارگیری بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب قرار داده شدند و به ترتیب آزمایش ها انجام گرفتند. برای دبی  $40$  لیتر بر ثانیه و جسم شناور M3 در موقعیت جسم بالای سطح آب، عمق گودال آبشستگی  $8/5$  سانتی متر، برای موقعیت جسم هم سطح آب، عمق آبشستگی  $9$  سانتی متر و برای موقعیت جسم زیر سطح آب، عمق آبشستگی  $11/2$  سانتی متر ثبت شد. بنابر نتایج به دست آمده نتیجه شد با

قرارگرفتن اجسام در پشت پایه پل بدون شکاف، عمق آب‌شستگی با افزایش دبی جریان می‌یابد و با تغییر موقعیت قرارگیری جسم پشت پایه، عمق آب‌شستگی نیز تغییر خواهد کرد. پایه پل به‌عنوان یک مانع در مسیر جریان قرار گرفته است و سبب انسداد مسیر جریان است با حضور جسم شناور این انسداد بیش‌تر می‌شود و در لحظه برخورد جریان آب به جسم شناور سرعت جریان کاهش می‌یابد و جریان در اطراف جسم شناور به دنبال تغییر مسیر است که باعث اغتشاش جریان حول جسم می‌شود و به این علت هرچه جسم شناور نزدیک سطح بستر باشد دامنه این اغتشاشات به سطح بستر کشیده شده و آب‌شستگی افزایش می‌یابد پس هرچه جسم شناور به سطح آب نزدیک‌تر باشد آب‌شستگی حول پایه کاهش می‌یابد و بالعکس هرچه جسم شناور نزدیک به سطح بستر باشد عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

### ۳. نتایج تغییرات آب‌شستگی برای پایه شکاف‌دار شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، بدون حضور جسم شناور

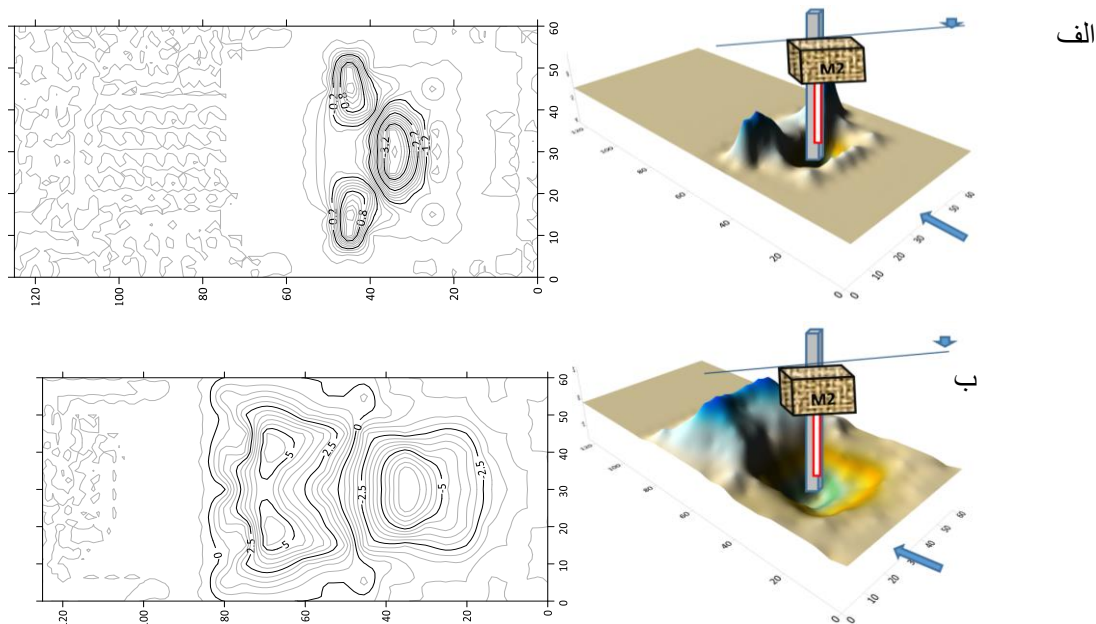
#### اثر دبی جریان

آب‌شستگی حول این پایه بدون حضور جسم شناور برای دبی ۱۰،۲۰ و ۳۰ لیتر بر ثانیه دیده نشد؛ ولی برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه عمق آب‌شستگی ۱/۳ سانتی‌متر گزارش شد که در مقایسه با پایه شاهد بدون شکاف که ۴/۷ سانتی‌متر بود ۷۲/۳ درصد باعث کاهش آب‌شستگی حول پایه شد.

### ۴. نتایج تغییرات آب‌شستگی برای پایه شکاف‌دار شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، در حضور جسم شناور

#### اثر دبی جریان

آب‌شستگی حول این پایه برای دبی ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه برای هر ۳ جسم در هر ۳ موقعیت قرارگیری جسم نسبت به پایه مشاهده نشد. برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه فقط در حالت قرارگیری جسم بالای سطح برای هر ۳ جسم شناور آب‌شستگی مشاهده نشد و اما برای دبی ۴۰ لیتر برای هر سه جسم آب‌شستگی دیده شد. باتوجه‌به شکل (۸،۹ و ۱۰)، افزایش حجم و عمق چاله آب-شستگی با افزایش دبی از ۳۰ به ۴۰ لیتر بر ثانیه به‌وضوح مشخص است.

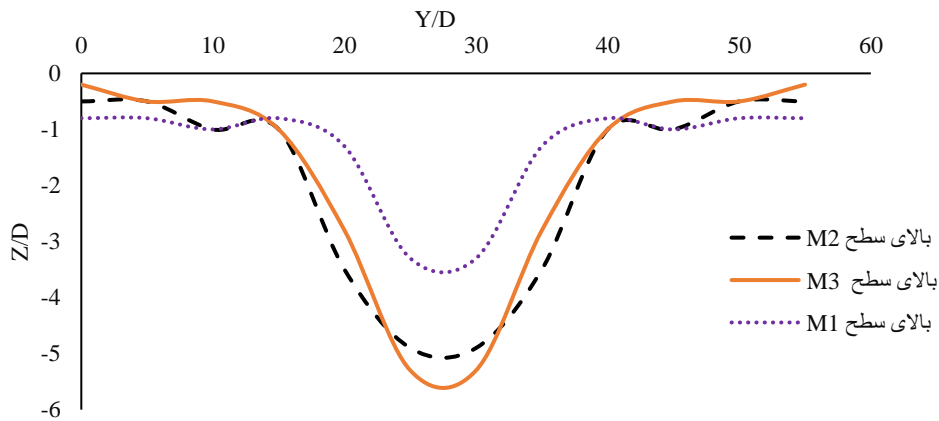


شکل ۸. مقایسه گودال آب‌شستگی حول پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، جسم M2 هم سطح آب دبی ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه (الف) دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه (ب) دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه

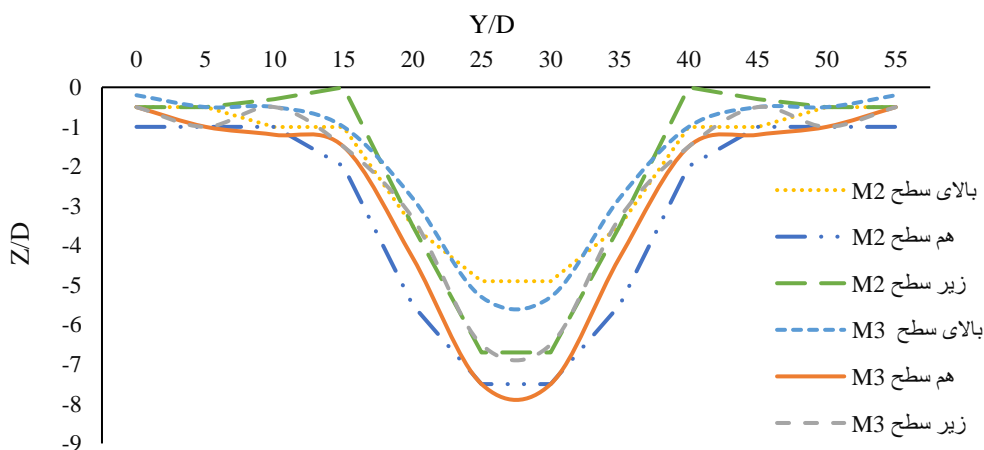


## اثر اندازه جسم شناور

با بررسی نتایج آزمایش‌ها مربوط به این پایه مشخص شد با بزرگ شدن جسم شناور آبشستگی حول پایه پل افزایش می‌یابد که در اشکال (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند.



شکل ۹. تغییرات عرضی گودال آبشستگی حول پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتیمتر زیر سطح بستر، با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه برای جسم M1، M2 و M3 در حالت قرارگیری بالای سطح بستر



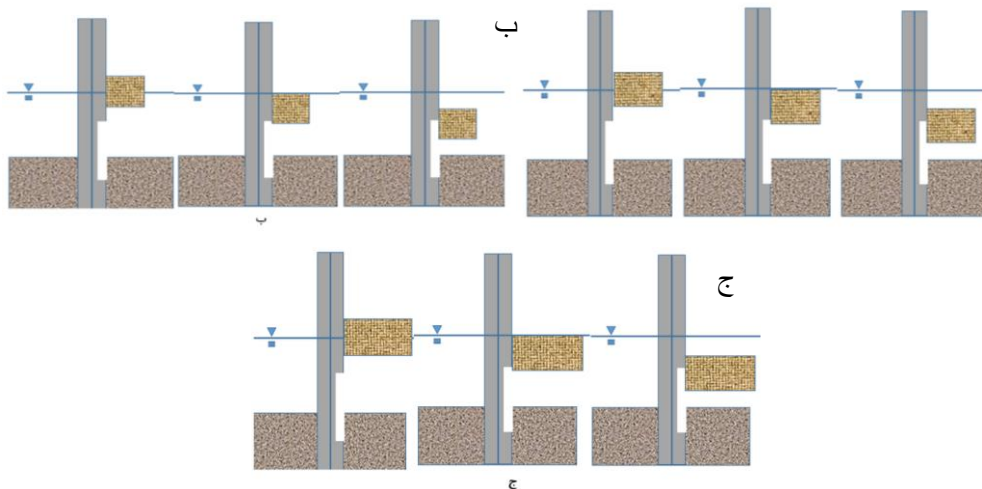
شکل ۱۰. تغییرات عرضی گودال آبشستگی حول پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتیمتر زیر سطح بستر، با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، جسم M2 و M3، در حالت قرارگیری بالای سطح، هم سطح و زیر سطح

## اثر موقعیت جسم شناور

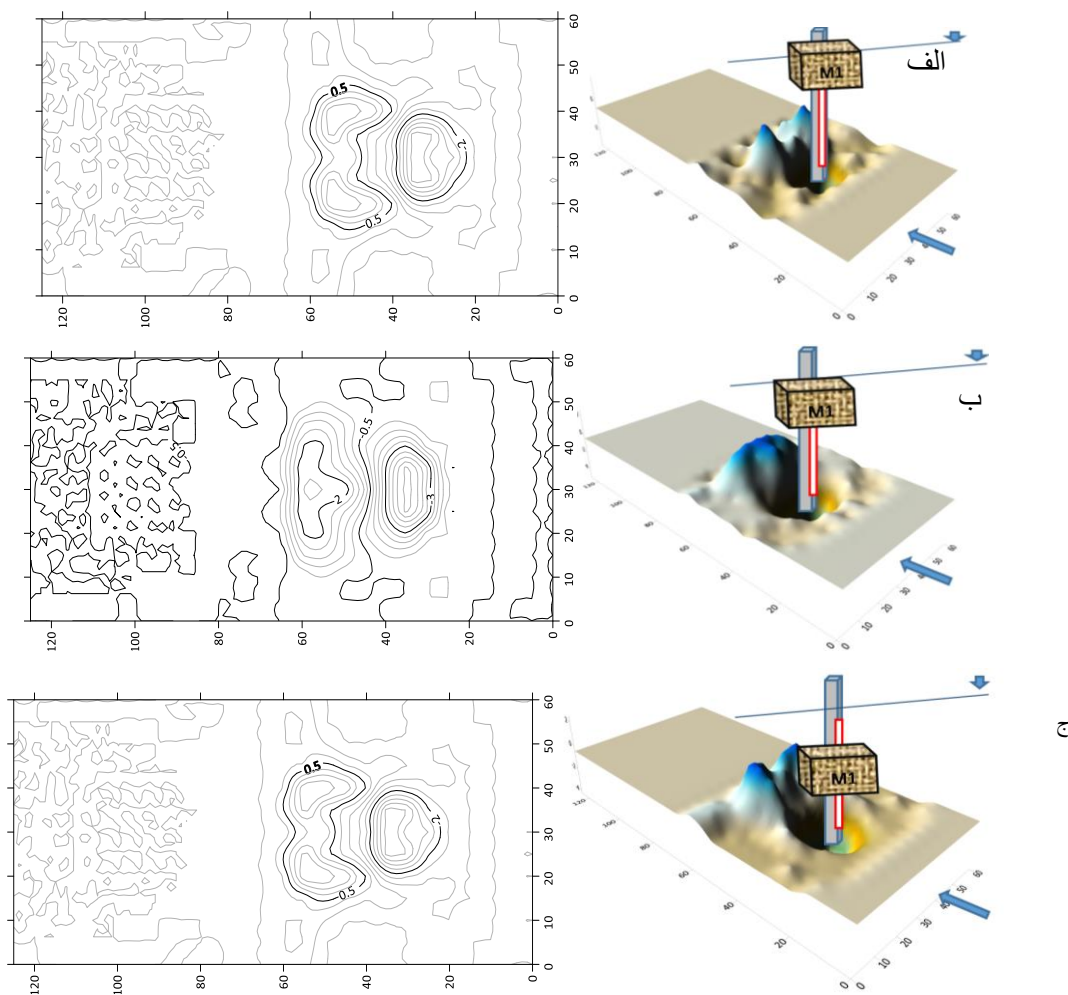
باتوجه به اشکال (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) برای دبی ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه در هیچکدام از حالت‌های بررسی، آبشستگی حول پایه پل مشاهده نشد. در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در حضور جسم M1، با پایین رفتن جسم نسبت به سطح آب، آبشستگی حول پایه پل افزایش یافته است و اما برای جسم M2 و M3 در حالت قرارگیری جسم هم سطح آب عمق آبشستگی بیش‌تر از حالت قرارگیری زیر سطح است. برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، در هر ۳ جسم شناور با قرارگیری جسم در حالت هم سطح آب، آبشستگی بیش‌تر از حالت قرارگیری جسم زیر سطح است. به دلیل قرارگرفتن جسم در عمقی از جریان که بیشترین سرعت را دارد و همچنین بخشی از ارتفاع شکاف ایجاد شده در پایه به دلیل فضای خالی ایجاد شده داخل پایه با مواجه شدن با جریان آب دچار فرسایش شده و با حضور جسم در حالت هم سطح به دلیل اغتشاش بیشتر جریان این امکان فرسایش بیش‌تر از حالت‌های دیگر قرارگیری جسم پشت پایه است.



الف

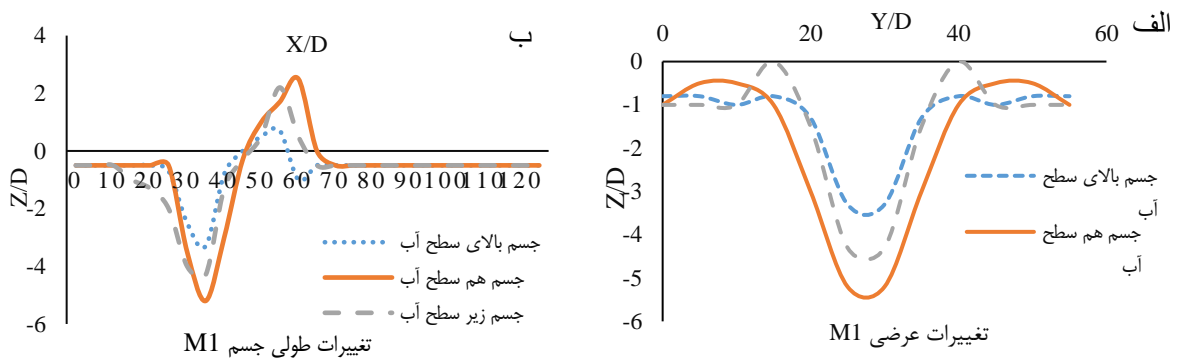


شکل ۱۱. شماتیک قرارگیری اجسام شناور پشت پایه پل شکافدار، شکاف ۷ سانتیمتر زیر سطح بستر، (الف) جسم M1، (ب) جسم M2، (ج) جسم M3



شکل ۱۲. مقایسه گودال آب شستگی حول پایه شکافدار، شکاف ۷ سانتی متر زیر سطح بستر، با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و در حضور جسم M1، (الف) جسم بالای سطح آب، (ب) جسم هم سطح آب، (ج) جسم زیر سطح آب

در شکل (۱۳) تغییرات عرضی و طولی گودال آبشستگی حول پایه در حضور جسم شناور M1 نشان داده شده است. با دقت در نمودار تغییرات عرضی و طولی، جسم در حالت قرارگیری هم سطح آب، آبشستگی بیش‌تری نسبت به حالت قرارگیری بالای سطح و زیر سطح ایجاد کرده است به این دلیل که جسم در حالت هم سطح آب در عمقی از جریان قرار گرفته است که بیش‌ترین سرعت را دارد و از طرفی بعد از برخورد جریان با جسم شناور، جریان برای ادامه مسیر، در دو طرف و قسمت پایین جسم راه فرار بیشتری دارد و همین سبب اغتشاش در زیر جسم و آبشستگی بیشتر شده است و اما در حالت قرارگیری جسم زیر سطح آب، جسم پایین‌تر از عمق حساس که بیش‌ترین سرعت را دارد قرار می‌گیرد و باعث کاهش اغتشاش جریان در زیر جسم شناور شده است و آبشستگی کم‌تر از حالت قرارگیری جسم هم سطح آب می‌شود.



شکل ۱۳. تغییرات عرضی و طولی گودال آبشستگی حول پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، با دبی  $40$  لیتر بر ثانیه و در حضور جسم M1 (الف) تغییرات عرضی، (ب) تغییرات طولی

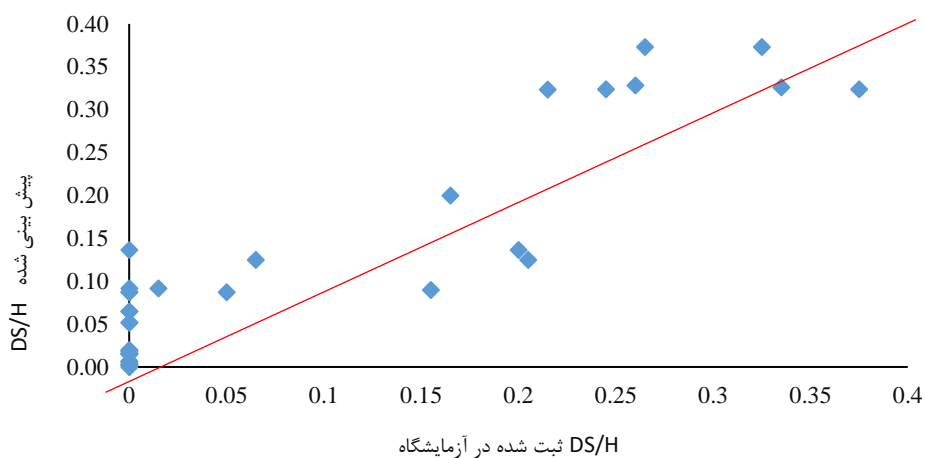
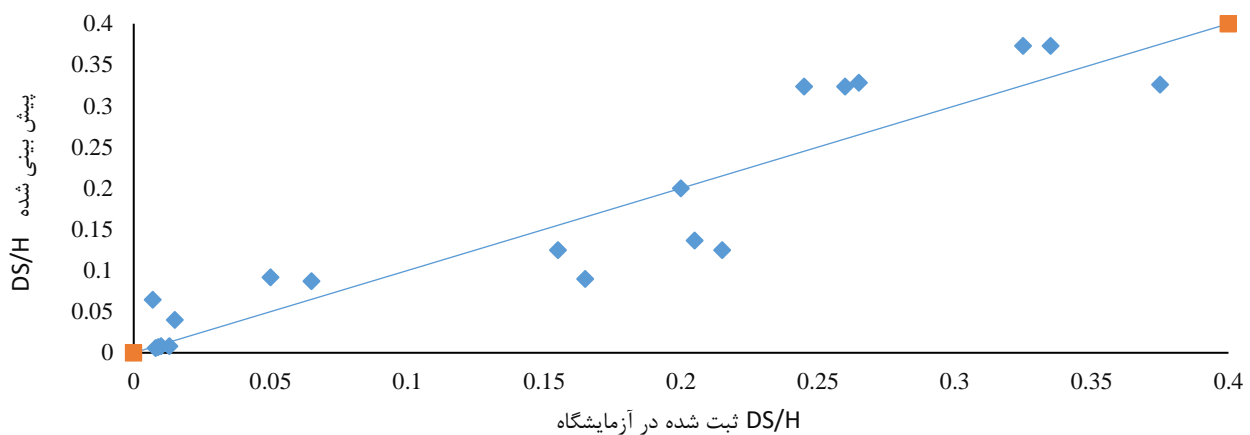
#### رابطه عمق آبشستگی در حضور جسم شناور

معادله حداکثر عمق آبشستگی در پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر و در حضور جسم شناور، با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر و با کمک آنالیز ابعادی با استفاده از داده‌های ثبت شده آزمایشگاهی استخراج و به شکل رابطه (۶) ارائه شده در بخش قبلی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین قابل تأکید است که با کمک معادله (۷) و (۸) به ترتیب ضریب تبیین و میانگین مجموع خطای پیش‌بینی شده برای رابطه استخراج شده محاسبه و در جدول (۱) به شرح زیر ارائه شده است.

جدول ۱. میزان خطای محاسبه شده

نوع پایه	مقدار $R^2$	مقدار MFE محاسبه شده
پایه شکاف‌دار ۷ سانتی‌متر زیر بستر	۸۱/۹	۰/۱۶۸۸

در شکل (۱۴) تغییرات عمق آبشستگی محاسبه شده در مقابل عمق آبشستگی پیش‌بینی شده مورد بررسی قرار گرفته است که نزدیک بودن نقاط در شکل به خط ترسیم شده نشان دهنده دقت مدل است.



شکل ۱۴. نمایش حداکثر عمق آب شستگی محاسبه شده در برابر حداکثر عمق آب شستگی پیش بینی شده

### بحث

هدف از این پژوهش بررسی اثر ایجاد شکاف در پایه پل مربعی دماغه تیز در حضور جسم شناور پشت پایه در کاهش آب-شستگی حول پایه پل است. این مطالعه به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت و به صورت مفصل در بخش‌های قبل به این موضوع پرداخته شده است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. تمام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در بستر رسوبی به ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر، در طول ۴ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. پایه در وسط فلوم و در فاصله ۱۰ متر از حوضچه آرامش قرار داده شد و برای جلوگیری از فروریختن ابتدا و انتهای بستر رسوبات و آرامش جریان از سنگ‌ریزه در ابتدا و انتهای بازه بستر رسوبی استفاده شد.

### نتیجه‌گیری

در این بخش با جمع‌بندی نتایج حاصل روش‌هایی برای کاهش آب‌شستگی ذکر می‌شود. نتایج حاصل عبارت‌اند از:

- افزایش دبی جریان باعث افزایش عمق و حجم چاله آب‌شستگی می‌شود.
- تجمع اجسام شناور حول پایه پل باعث افزایش عمق و حجم چاله آب‌شستگی نسبت به عدم حضور اجسام شناور می‌شود.
- افزایش طول جسم شناور باعث کاهش آب‌شستگی حول پایه پل می‌شود.

قرارگرفتن اجسام شناور در بالای سطح آب، آبشستگی کمتری نسبت به قرار گیری در حالت زیر سطح ایجاد می‌کنند. پایه بدون حضور جسم شناور، بیش‌ترین عمق آبشستگی در کنار ضلع مربعی پایه شکل می‌گرفت و بعد از حضور جسم پشت پایه بیش‌ترین عمق آبشستگی در نزدیکی نوک دماغه شکل می‌گرفت. ایجاد شکاف در پایه پل در دبی‌های کم، ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه موجب کنترل فرسایش حول پایه بود. ایجاد شکاف یک روش کارآمد برای کنترل آبشستگی حول پایه پل است. پایه با شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر تا ۴۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد موجب کنترل آبشستگی حول پایه می‌شود.

## ملاحظات اخلاقی

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

### تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت دانشگاه شهرکرد انجام شده است بدین‌وسیله از این حمایت قدردانی می‌گردد.

## منابع

- ابوسعیدی، زهرا، قادری، کورش، رحیم پور، مجید، و احمدی، محمد مهدی. (۱۳۹۷). بررسی آزمایشگاهی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی موضعی پایه و تکیه گاه پل. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۵(۲)، ۲۸۲-۲۶۷. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12472.2714>
- اردلانی، اعظم، بختیاری، مرتضی، صانعی، مجتبی، و کاشفی پور، سید محمود. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی اثر مساحت سطح شکاف در بدنه ی پایه روی کاهش آب‌شستگی موضعی پایه پل. نشریه دانش آب و خاک، ۳۹(۳)، ۶۷-۷۹. <https://faculty.kmsu.ac.ir/bakhtiari/fa/articlesInPublications/221>
- بیات، حبیب الله. (۱۳۷۹). اندرکنش سازهای آبی و فرسایش. انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران. <https://www.iranketab.ir/book/96580-sazehaye-aabi>
- حیدری بنی، مهناز، بختیاری، مرتضی، صانعی، مجتبی، و کاشفی پور، سید محمود. (۱۳۹۹). بررسی آزمایشگاهی استفاده از شکاف در پایه جهت کنترل آب‌شستگی پایه پل. مجله‌ی مهندسی منابع آب، ۱۳(۴۵)، ۳۸-۲۳. [https://wej.marvdasht.iau.ir/article\\_4224.html](https://wej.marvdasht.iau.ir/article_4224.html)
- رحیمی، ابراهیم. (۱۳۹۶). بررسی آزمایشگاهی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی موضعی گروه پایه و تکیه گاه پل. رساله دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. <https://elmnet.ir/doc/11244311-84226>
- کاضمیان، میلاد، گوهری، سعید، و شاهوردی، کاظم. (۱۴۰۰). تأثیر شکاف در کاهش آب‌شستگی پایه پل در بستر با رسوب-های یکنواخت و نایکنواخت. نشریه علمی - پژوهشی هدرولیک، ۱۶(۴)، ۳۷-۴۸. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81358>
- ماهان، ناصر. (۱۳۹۱). بررسی مقایسه ای تأثیر شکل شکاف بر آب‌شستگی پایه‌های پل. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران. <https://elmnet.ir/doc/10599347-94122>
- مشعشعی، میثم، و اسدی آق‌بلاغی، مهدی. (۱۳۹۴). آب‌شستگی در اطراف پایه مربعی با دماغه سهمی شکل در حضور اجسام شناور چوبی در جلوی پایه. مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، ۱۵(۴)، ۸۵-۹۶. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-2041-fa.html>

## References

- Abu Saidi, Z., Kadri, K., Rahimpour, M., & 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. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12472.2714> (In Persian)
- Ardlani, A., Bakhtiari, M., Sanei, M., & Kashfipour, S.M. (2018). Laboratory examination of the effect of the surface area of the crack in the body of the foundation on the reduction of local scouring of the bridge foundation. *Water and Soil Science Journal*, (39), 67-79. <https://faculty.kmsu.ac.ir/bakhtiari/fa/articlesInPublications/221> (In Persian)
- Bayat, H. (2000). Interaction of water bodies and erosion. *Amir Kabir University of Technology Publications* (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. <https://www.iranketab.ir/book/96580-sazehaye-aabi> (In Persian)
- Diehl, T. (1997), Potential drift accumulation at bridges. U.S. *Department of Transportation Federal Highway Administration Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLean, Virginia, 22101-2296*. <https://tn.water.usgs.gov/publications/FHWA-RD-97-028/FHWA-RD-97-028>
- Grimaldi, C., Gaudio, R., & Calomino, F. (2009). Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(1), 13–21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:1\(13\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:1(13))
- Heydari Bani, M., Bakhtiari, M., Sanei, M., & Kashfipour, S.M. (2019). Laboratory examination of using a gap in the foundation to control the erosion of the bridge foundation. *Journal of Water Resources Engineering*, 13(45), 23-38. [https://wej.marvdasht.iau.ir/article\\_4224.html](https://wej.marvdasht.iau.ir/article_4224.html) (In Persian)
- Kazmian, M., Gohri, S., & Shahvardi, K. (2021). The effect of the gap in reducing the scour of the bridge foundation in the bed with uniform and uneven sediments. *Journal of Hydraulics*, 16(4), 37-48. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81358> (In Persian)
- Kumar, V., Ranga raju, K.G., & Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), 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))
- Lagasse, P.F., Cloper, P.E., Zevenbergen, P.E., Spitz, W.J., & Girard, L.G. (2010). Effects of Debris on Bridge Pier Scour. *Transportation Research Board*, 10, 854-863. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)85](https://doi.org/10.1061/41147(392)85)
- Mahan, N. (2012). A comparative study of the effect of the shape of the gap on the erosion of bridge foundations. Master's thesis, *Islamic Azad University of central Tehran branch*, Tehran, Iran. <https://elmnnet.ir/doc/10599347-94122> (In Persian)
- Moshashii, M., & 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), 85-96. <https://mcej.modares.ac.ir/article-16-2041-fa.html> (In Persian)
- Pagliara, S., & Carnacina, I. (2010). Temporal scour evolution at bridge piers: Effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 3-13. <https://doi.org/10.1080/00221680903568592>
- Pagliara, S., & Carnacina, I. (2011). Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers. *International Journal of Sediment Research*, 26(2), 121-136. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60081-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60081-4)

- Rahimi, I. (2016). Laboratory investigation of the effect of accumulation of floating objects on the local scouring of the foundation group and bridge support. Ph.D. Thesis, *Shahid bahonar University of Kerman*, Kerman, Iran. <https://elmnet.ir/doc/11244311-84226>(In Persian)
- Raudkivi, A., & Ettema, R. (1983). Clear water scour at cylindrical piers. *J. Hydr. Engin. ASCE*, 103(10). 1209-1213. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))