

## Research Paper

## The Effect of Angle and Length of Protective Wall on Scour around the Bridge Abutment in Laboratory Conditions

Mojtaba Zakeri<sup>1</sup>,Mahdi Amirabadizadeh<sup>2\*</sup>,Yousef Ramezani<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate, Science and Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran (Email: mojtabastore016@gmail.com)

<sup>2\*</sup> Associate Professor, Science and Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran and member of drought and climate change research group (Corresponding author, Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

<sup>3</sup> Associate Professor, Science and Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran and member of drought and climate change research group (Email: y.ramezani@birjand.ac.ir)



10.22125/iwe.2024.422767.1762.

Received:  
**May 4, 2024**  
Accepted:  
**September 22, 2024**  
Available online:  
**December 26, 2024**

**Keywords:**

**Local scour, clear water, bridge support, protective wall, absorption ratio**

**Abstract**

Due to the occurrence of localized erosion around bridge abutments during floods, one way to reduce erosion around bridge abutments is to use a protective wall. In this research, the length of the support was fixed and equal to 8 cm. Experiments using protective walls with lengths of 4, 6, 8, and 10 cm (equivalent to 0.5, 0.75, 1, and 1.25 times the length of the support) at an absorption ratio of 25% and also four installation angles of 0, 15, 30 and 45 degrees were performed in clear water conditions. At a fixed length of the protective wall, reducing the angle of the protective wall can have a significant effect on reducing the maximum scour depth around the bridge support and the foot of the protective wall. So that the zero-degree angle showed the best performance compared to other angles. According to the results of this research, the use of a protective wall with a length equal to the length of the support and at an installation angle of zero degrees, causes a 54% reduction in the maximum scour depth around the support and also a 29% reduction in the scour depth at the foot of the protective wall in comparison to witness.

\* **Corresponding Author:** Mahdi Amirabadizadeh

**Address:** Science and Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran,

**Email:** mamirabadizadeh@birjand.ac.ir

### 1) Introduction

The bridge is one of the most important hydraulic structures that have been used by mankind for a long time, and its strategic role in various issues is not hidden from anyone. Generally, bridge design engineers pay more attention to structural issues than hydraulic factors in their designs

They show one of the reasons for this is the lack of access and sufficient information in the field of bridge hydraulics. Many bridges in the world have been destroyed due to excessive erosion around the base and support. Destruction of the bridge due to scouring leads to heavy economic and human losses. In Iran, according to the presented statistics, the problem of localized scouring in bridges is the main cause of their destruction. According to Khademi et al.'s studies (2011), in the 80s, a large number of river bridges in Khuzestan province were destroyed due to erosion, which caused huge costs. In this research, the effect of the angle and length of the protective wall on scouring around the bridge abutment has been investigated.

Introduction, Introduction, Introduction

### 2) Materials and Methods

The experiments of the present research were carried out in a 10-meter-long and 0.3-meter-wide flume in the hydraulic laboratory of the Faculty of Agriculture of Birjand University. A sedimentary bed with a size of 2.2 meters and a height of 0.15 meters was created in the central part of the flume. To create this sedimentary bed, two false sections were created on both sides of the sedimentary bed using Plexiglas sheets, each with a length of 3.9 meters, a width of 0.3 meters and a depth of 0.15 meters.

Sediments with an average diameter of 1 mm were used in the experiments. Since the purpose of this research was to conduct experiments in clear water conditions and adjust the flow rate and flow depth to the limit of sediment movement threshold, therefore, the closest possible depth to the movement threshold depth was chosen as the desired depth. A Plexiglass support with a vertical wall and in the short length range of Melville's classification (1992) was used. According to the flow depth and width of the flume, the support length ( $L_a$ ) was chosen to be 8 cm. The width of the support ( $B_a$ ) was also considered to be 10 cm. In this research, the length of the protective wall ( $L_w$ ) was chosen based on a coefficient of the support length (0.5, 0.75, 1 and 1.25 times). In this way, 4 lengths of protective wall 4, 6, 8 and 10 cm were used. The 4 angles investigated in this research were chosen as 0, 15, 30 and 45 degrees, respectively. The height of the protective walls ( $H_w$ ) was also determined based on a ratio of the water depth ( $h$ ).

### 3) Results

In this research, the results of the research were investigated in two parts to investigate the scouring topography around the bridge support. The first part is a control test (without the use of a protective wall) and the second part examines the effect of the angle and length of the protective wall on the reduction of the maximum scour depth around the bridge abutment. In the control test, the highest amount of scouring was observed in the nose upstream of the support, the maximum depth of which was measured to be 9.2 cm. The scour hole was also formed around the upstream nose of the support in a conical shape. Also, horseshoe vortex and as a result scour around the support was developed and sediments after being swept accumulated downstream of the support. Reducing the installation angle of the protective wall improved its performance in reducing the maximum scour depth around the support and consequently reducing the development of the horseshoe vortex around the bridge support. The best performance was observed at the installation angle of 0 degrees and in the next stages at angles of 15, 30 and 45 degrees. Also, at a constant angle and with the increase in the length of the protective wall, the maximum scour depth around the support decreased. Also, the protective wall has removed the maximum scour depth from the nose upstream of the support and moved it to the foot of the protective wall with a lesser depth.

#### 4) Discussion and Conclusion

In this research, the effect of the angle and length of the protective wall on reducing scour around the support was investigated. In general, the results of the research showed that by changing the flow pattern around the bridge support, the protective wall can move the maximum scour depth away from the upstream nose of the support and transfer it to the foot of the protective wall with a smaller depth. By reducing the installation angle of the protective wall, the dimensions of the scour hole around the bridge abutment and the foot of the protective wall were reduced, and as a result, the sedimentation downstream of the abutment was also reduced. Also, at a fixed installation angle of the protective wall, the step-by-step increase in the length of the protective wall decreased the maximum scour depth around the bridge support and the foot of the protective wall. Therefore, choosing an optimal length for building a protective wall is required. According to the results of this research, using a protective wall with a length equal to the length of the support and at an installation angle of zero degrees, caused a 54% decrease in the maximum scour depth and a 29% decrease in the scour depth at the foot of the protective wall compared to the control condition.

#### 5) Six important references

- 1) Ahmed, F. and Rajaratnam, N. 2000. Observations on flow around an abutment. *Journal of Engineering Mechanics*. 125(1): 51-59.
- 2) Barbhuiya, A.K., and Dey, S. 2004. Local scour at abutments: a review. *Sadhana, Indian Academy of Sciences*. 29(5): 449-476.
- 3) Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2005c. Time variation of scour at abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131(1): 11-23.
- 4) Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2004. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(7): 622-634.
- 5) Johnson, P.A., Hey, R.D., Tessier, M., and Rosgen, D.L. 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127(9): 772-778.
- 6) Korkut, R., Martinez, E.J., Morales, R., Ettema, R., and Barkdoll, B. 2007. Geobag performance as scour countermeasure for bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(4): 431-439.

#### Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.

## اثر زاویه و طول دیوار محافظ بر آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل در شرایط آزمایشگاهی

مجتبی ذاکری<sup>۱</sup>، مهدی امیرآبادی‌زاده<sup>۲\*</sup>، یوسف رضانی<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

مقاله پژوهشی

### چکیده

با توجه به وقوع آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل‌ها در زمان سیلاب، یکی از راه‌های کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل، استفاده از دیوار محافظ می‌باشد. در این تحقیق، طول تکیه‌گاه ثابت و معادل ۸ سانتی‌متر انتخاب گردید. آزمایش‌ها با استفاده از دیوارهای محافظ با طول‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر (معادل ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ برابر طول تکیه‌گاه) در نسبت استغراق ۲۵ درصد و همچنین چهار زاویه نصب ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در شرایط آب زلال انجام شد. نتایج نشان داد، در یک طول ثابت دیوار محافظ، کاهش زاویه دیوار محافظ می‌تواند تأثیر بسزایی بر کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و پای دیوار محافظ داشته باشد. به طوری که زاویه صفر درجه نسبت به سایر زوایا بهترین عملکرد را نشان داد. همچنین، در یک زاویه نصب ثابت دیوار محافظ، افزایش طول دیوار محافظ باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و پای دیوار محافظ گردید. با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از دیوار محافظ به طولی معادل طول تکیه‌گاه و در زاویه نصب صفر درجه، باعث کاهش ۵۴ درصدی در حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه و همچنین باعث کاهش ۲۹ درصدی در عمق آبشستگی پای دیوار محافظ نسبت به حالت شاهد گردید.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، آب زلال، تکیه‌گاه پل، دیوار محافظ، نسبت استغراق.

۱. کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. ۰۹۳۵۶۳۴۵۸۸۰ .mojtabastore016@gmail.com

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران و عضوگروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم.

mamirabadizadeh@birjand.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران و عضوگروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم.

y.ramezani@birjand.ac.ir

## مقدمه

پل، از جمله مهمترین سازه‌های هیدرولیکی است که از دیرباز مورد استفاده بشر قرار گرفته است و نقش استراتژیک آن در مسائل گوناگون بر کسی پوشیده نیست. همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان دچار تخریب می‌شوند. تخریب این پل‌ها نه به دلیل سازه‌ای بلکه به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی آن‌ها است (قربانی و حیدر پور، ۱۳۸۴؛ غفاری و زمردیان، ۱۳۹۷؛ صادقی، ۱۴۰۲). با توجه به عوارض طبیعی زمین، استفاده از پل‌ها در مسیر راه‌ها اجتناب ناپذیر است. وجود پایه<sup>۱</sup> و تکیه‌گاه<sup>۲</sup> پل در عرض رودخانه باعث کاهش عرض عبوری جریان، برخورد جریان به آن و انحراف خطوط جریان پیرامون پایه و تکیه‌گاه به کف بستر و در نتیجه ایجاد پدیده‌ای بنام آبشستگی<sup>۳</sup> می‌شود. سالیانه بسیاری از پل‌ها بر اثر پدیده آبشستگی و لغزش پایه و تکیه‌گاه در مواقع سیلابی که راه‌های ارتباطی به مناطق سیل‌زده هستند تخریب می‌شوند و دسترسی و امداد رسانی به مناطق سیل‌زده با مشکلات مواجه می‌شود که بیانگر اهمیت بررسی این پدیده است (شجاعی و همکاران، ۱۳۹۰).

عموماً مهندسين طراح پل، در طراحی‌های خود به مسائل سازه‌ای بیشتر از عوامل هیدرولیکی توجه می‌نمایند. یکی از دلایل این امر را می‌توان به عدم دسترسی و وجود اطلاعات کافی در زمینه هیدرولیک پل دانست. قسمتی از این مشکل شاید بدلیل مدون نبودن این مبحث و موضوعات آن از قبیل طراحی دیوارهای هدایت، پیش بینی بالازدگی آب در بالادست پل و یا تخمین آبشستگی و روش‌های کاهش آن باشد. پل‌های زیادی در جهان به دلیل آبشستگی بیش از اندازه پیرامون پایه و تکیه‌گاه تخریب شده‌اند. تخریب پل به علت آبشستگی زیان‌های سنگین اقتصادی و جانی

را به دنبال دارد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد در طول سیلاب بهاری سال ۱۹۸۷، تعداد ۱۷ پل در اثر پدیده آبشستگی در نیویورک و نیوانگلند صدمه دیده یا تخریب شدند. سیلاب در ویرجینیا در سال ۱۹۸۵، ۷۳ پل را تخریب کرد. مطالعات انجام شده روی شکست ۳۸۳ پل در ایالات متحده نشان داد که در ۲۵ درصد آن‌ها تخریب پایه و در ۷۲ درصد تخریب تکیه‌گاه علت اصلی شکست پل بوده است. همچنین از ۱۰۸ شکست پل در فاصله سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۴ در نیوزلند رخ داد، مورد آن مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است (Melville, 1992). ملویل همچنین خاطر نشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌های ناشی از شکست پل در نیوزیلند، ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل می‌باشد. در آمریکا نیز ۶۰ درصد علت تخریب پل‌ها بدلیل آبشستگی و فقط ۲ درصد بدلیل زمین‌لرزه بوده است (Shirole and Holt, 1991).

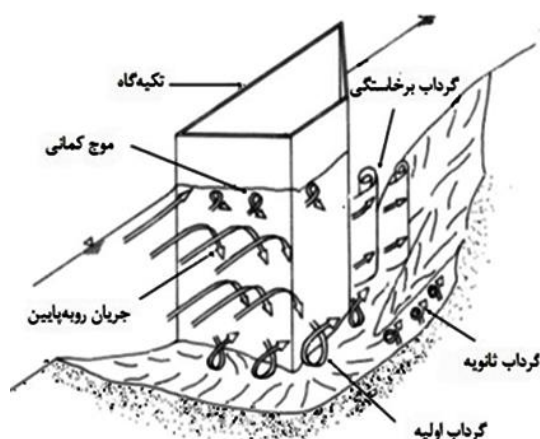
در ایران نیز بر طبق آمار ارائه شده مشکل آبشستگی موضعی در پل‌ها عامل اصلی تخریب آن‌ها می‌باشد. مطابق مطالعات خادمی و همکاران (۱۳۹۱)، در دهه‌ی ۸۰، تعداد زیادی از پل‌های رودخانه‌ای استان خوزستان دچار تخریب ناشی از آبشستگی شدند که باعث تحمیل هزینه‌های زیادی گردید. تحقیقات انجام شده در ۸ منطقه و استان کشور نشان می‌دهد که ۴۲ درصد از پل‌های مورد مطالعه دچار آبشستگی شده‌اند. همچنین مطابق گزارش سازمان راهداری و حمل و نقل کشور، حدود ۳۷ درصد خرابی پل‌های کشور ناشی از آبشستگی پایه‌های میانی و کناری بوده است (خادمی و همکاران، ۱۳۹۱).

تحقیقات در زمینه مکانیسم آبشستگی و الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل توسط (Hagerty and Parola (1992), Melville (1992), Shen et al. (1993), Dongol (1994).

1 Pier

2 Abutment

3 Scour



شکل (۱): مکانیسم آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل  
(Barbhuiya and Dey, 2004)

Melville (1992)، تکیه‌گاه را بر اساس نسبت طول آن به عمق جریان ( $L/y$ )، به سه دسته‌ی تکیه‌گاه کوتاه، متوسط و بلند طبقه‌بندی نمود. بر اساس این طبقه‌بندی،

$L/y < 1$  تکیه‌گاه کوتاه،  $1 \leq L/y \leq 25$  تکیه‌گاه متوسط و  $L/y > 25$  تکیه‌گاه بلند اطلاق گردید.

Johnson et al. (2001) به بررسی اثر صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که صفحات مستغرق به‌طور کاملاً موثری آبشستگی را از تکیه‌گاه پل دور کرده و به مرکز کانال منتقل می‌نمایند. بسته به تعداد، زاویه و فاصله صفحات مستغرق بین ۲۲ تا ۹۶ درصد کاهش در حداکثر عمق آبشستگی تکیه‌گاه مشاهده شد.

Li (2005) به بررسی تأثیر آبشکن، دیوار موازی و طوق در کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل پرداخت. آبشکن و دیوار موازی در شرایط آب زلال و بستر زنده و طوق تنها در شرایط آب زلال مورد مطالعه قرار گرفتند. آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی مرکب که دارای مقطع اصلی فرسایش پذیر و دشت سیلابی فرسایش ناپذیر بود انجام پذیرفت. تکیه‌گاه پل از دشت سیلابی شروع شده و در مجرای اصلی خاتمه می‌یافت. در این

Ahmed and Molinas et al. (1998), Melville Dey and (2004), Rajaratnam (2000), Barbhuiya (2005a), Dey and Barbhuiya (2006), Sturm (2006) و Teruzzi et al. (2009) نشان داده است که مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار شبیه به مکانیسم آبشستگی در پایه پل‌ها است. در شکل (۱) میدان جریان پیرامون یک تکیه‌گاه پل نشان داده شده است. عوامل مؤثر در آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل را می‌توان به جریان پایین رونده، گره‌باز موج کمّنی، گره‌باز نعل اسبی (گره‌باز اصلی)، گره‌باز ثانویه و گره‌باز برخاستگی تقسیم بندی نمود. همچنین در ادامه تحقیقات در زمینه مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها توسط Ahmed and Kwan (1984 & 1988), Barbhuiya and Dey, Rajaratnam (2000), Dey (2003), (2005a, 2005b, 2006a, 2006b) and Barbhuiya و بسیاری دیگر نشان داده است که جریان پایین رونده<sup>۱</sup> و گره‌باز نعل اسبی<sup>۲</sup> در گوشه بالادست تکیه‌گاه پل، همراه با گره‌باز ثانویه<sup>۳</sup> و گره‌باز برخاستگی<sup>۴</sup> در قسمت میانی و گوشه انتهایی تکیه‌گاه پل باعث ایجاد اندرکنش پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که دلیل اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها است. آن‌ها بیشترین عمق آبشستگی را در دماغه بالادست تکیه‌گاه مشاهده نمودند. دیدن الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه با استفاده از تکنیک‌های بصری جریان توسط دستگاه‌های جت رنگ، تزریق بلور رنگی، کاغذ شناور و تونل دود توسط بسیاری از محققان از جمله Liu (1961) و Gill (1970) انجام شده است.

1 Down Flow

8 Horseshoe Vortex

9 Secondary Vortex

4 Wake Vortex

نکوفر و زرودی (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی تغییرات تراز کف در اطراف پایه پل پرداختند و از توانمندی نرم افزار SSIM که به صورت سه بعدی، معادلات جریان و رسوب را لحاظ می کند، برای حل غیردائمی میدان رسوب و معادله پیوستگی استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل عددی مورد استفاده در محاسبه سطح آزاد و محاسبه تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه دارای توانمندی مناسبی می باشد. همچنین مدل نشان داد که تحت شرایط یکسان، آبستگی حول پایه مربعی و استوانه ای نسبت به پایه مستطیلی بیشتر است.

تأثیر همزمان زبری و صفحات مستغرق به صورت آزمایشگاهی توسط رحیمی نیا (۱۳۹۴) مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه تحقیق نشان داد که با استفاده از همزمان زبری و صفحات مستغرق، شروع آبستگی به تأخیر می افتد و میزان تأخیر در شروع آبستگی در پشت پایه بیشتر از کنار و جلوی پایه است. همچنین عمق نهایی آبستگی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می نماید. بدین منظور در این تحقیق به بررسی اثر زاویه دیوار محافظ در طول های مختلف آن بر کاهش آبستگی، بررسی توپوگرافی آبستگی پیرامون تکیه گاه و نیز بررسی اثر طول و نسبت استغراق دیوار محافظ بر آبستگی پیرامون تکیه گاه پل پرداخته شد.

### مواد و روش ها

در این تحقیق روش پی-باکینگهام برای تحلیل ابعادی متغیرهای موثر بر آشفستگی تکیه گاه پل مورد استفاده قرار گرفت که پس از انجام آنالیز ابعادی و حذف متغیرهای تکراری و بی تأثیر رابطه ی زیر استخراج گردید:

$$f\left(\frac{L_w}{L_a}, \frac{Y_s}{L_a}, Fr\right) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $L_w$ ،  $L_a$ ،  $Y_s$  و  $Fr$  به ترتیب طول دیوار محافظ، طول تکیه گاه، عمق آبستگی و عدد فرود جریان می باشند. آزمایش های تحقیق حاضر در فلومی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۳ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی

تحقیق استفاده از دیوار موازی به طولی به اندازه ۱/۶ برابر طول تکیه گاه پل، آبستگی در دماغه بالادست تکیه گاه مشاهده نشد.

Korkut (2007) به بررسی نقش کیسه خاک در کاهش آبستگی پیرامون تکیه گاه پل پرداختند. این کیسه خاک ها با رسوبات موجود در محل یا بتن پر می شوند. در نهایت، دستورالعمل های طراحی شامل محل قرارگیری کیسه خاک و اندازه آن ها پیشنهاد گردید. Melville et al. (2007) به مطالعه انتخاب اندازه سنگ چین در یک تکیه گاه دیوار باله ای پرداختند.

رمضانی (۱۳۹۱)، به بررسی اثر پوشش گیاهی دشت سیلابی بر کاهش آبستگی پیرامون تکیه گاه پل در مقطع مرکب پرداخت. در بازه اعداد مورد تحقیق، پوشش گیاهی تا ۴۰ درصد حداکثر عمق آبستگی پیرامون تکیه گاه پل را کاهش داد.

کریمی و همکاران (۱۳۹۴) اثر احداث دیوار موازی بر میزان کاهش عمق آبستگی پیرامون تکیه گاه پل با دیواره عمودی را در مقطع مرکب مورد بررسی قرار دادند. آزمایش ها در یک کانال آزمایشگاهی مرکب که دارای مقطع اصلی فرسایش ناپذیر و دشت سیلابی فرسایش پذیر بود انجام گرفت. در این تحقیق، از دیوارهای موازی تا حداکثر ۱/۵ برابر طول تکیه گاه مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش ها در شرایط آب زلال انجام شد. نتایج نشان داد دیوار موازی می تواند با تغییر الگوی جریان پیرامون تکیه گاه، حداکثر عمق آبستگی را از دماغه بالادست تکیه گاه دور کرده و با عمق کمتری به پای دیوار موازی منتقل کند. افزایش گام به گام طول دیوار موازی باعث کاهش هر چه بیشتر عمق آبستگی پیرامون تکیه گاه پل گردید.

صادقی (۱۳۹۶)، به بررسی اثر نسبت استغراق دیوار محافظ بر آبستگی پیرامون تکیه گاه پل با دیواره عمودی پرداخت. نتایج نشان داد، کاهش نسبت استغراق باعث بهبود عملکرد دیوار محافظ در کاهش حداکثر عمق آبستگی پیرامون تکیه گاه و کاهش عمق آبستگی پای دیوار محافظ می شود.

روند پایین آوردن دریچه انتهایی تا جایی ادامه پیدا کرد که حرکت عمومی رسوبات در بستر رسوبی مشاهده شود. در دبی ۱۲/۵۴ لیتر بر ثانیه، آستانه حرکت رسوبات در عمق آب ۱۵/۶ سانتی‌متر مشاهده شد. هدف این تحقیق، انجام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و تنظیم دبی و عمق جریان در حد آستانه حرکت رسوبات بود. بنابراین، نزدیکترین عمق ممکن به عمق آستانه حرکت (بطوری که هیچ‌گونه حرکت رسوب در بستر رسوبی وجود نداشته باشد) به عنوان عمق مورد نظر انتخاب گردید. در دبی ۱۲/۵۴ لیتر بر ثانیه، عمق حد آستانه حرکت رسوبات در عمق ۱۶ سانتی‌متر مشاهده شد.

تکیه‌گاهی از جنس پلکسی گلاس با دیواره عمودی و در محدوده‌ی طول کوتاه طبقه‌بندی ملویل (۱۹۹۲) مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به عمق جریان و عرض فلوم، طول تکیه‌گاه ( $L_a$ ) ۸ سانتی‌متر انتخاب گردید. عرض تکیه‌گاه ( $B_a$ ) نیز ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۲).

در این تحقیق، طول دیوار محافظ ( $L_w$ ) بر اساس ضریبی از طول تکیه‌گاه (۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ برابر) انتخاب گردید. بدین ترتیب ۴ طول دیوار محافظ ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر محاسبه گردیدند. ۴ زاویه مورد بررسی در این تحقیق نیز به ترتیب ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه انتخاب گردیدند. ارتفاع دیوارهای محافظ ( $H_w$ ) نیز بر اساس نسبتی از عمق آب ( $h$ ) تعیین گردید. ارتفاع دیوار محافظ ۴ سانتی‌متر معادل نسبت استغراق (S) ۲۵ درصد مورد استفاده قرار گرفت. در تحقیق صادقی (۱۳۹۶)، بهترین عملکرد دیوار محافظ در نسبت استغراق ۲۵ درصد بدست آمد که در این تحقیق نیز از این نسبت استغراق توصیه می‌گردد. تکیه‌گاه در وسط بستر رسوبی قرار داده شد. دیوارهای محافظ نیز در دماغه بالادست تکیه‌گاه، به سمت بالادست جریان و با زاویه مورد نظر کار گذاشته شدند.

دانشگاه بیرجند انجام پذیرفت. جنس دیوار فلوم از پلکسی گلاس به ضخامت ده میلیمتر است. فلوم دارای قابلیت تنظیم شیب و همچنین دارای سیستم بازچرخانی آب از داخل مخازن آب به داخل فلوم و بلعکس می‌باشد. تنظیم دبی با استفاده از شیر تنظیم ورودی صورت گرفت. اندازه‌گیری دبی نیز توسط دبی سنج الکترومغناطیس انجام شد.

یک بستر رسوبی به اندازه ۲/۲ متر و ارتفاع ۰/۱۵ متر در قسمت مرکزی فلوم ایجاد گردید. برای ایجاد این بستر رسوبی نیاز به فراهم کردن دو مقطع کاذب بوده که در دو طرف بستر رسوبی می‌بایست ایجاد می‌شد. این دو مقطع با استفاده از ورق‌های پلکسی گلاس در دو طرف بستر رسوبی هر کدام به طول ۳/۹ متر، عرض ۰/۳ متر و عمق ۰/۱۵ ایجاد گردید (شکل ۲).

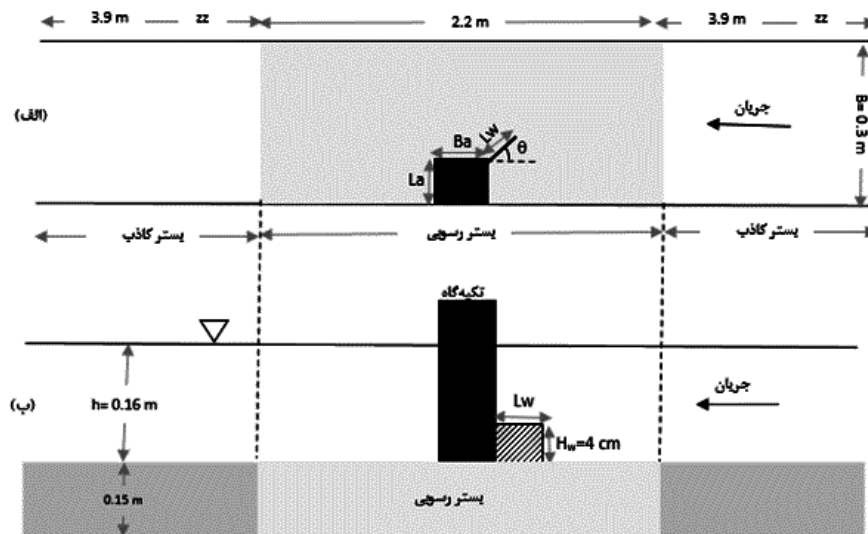
رسوبات با قطر متوسط ۱ میلیمتر در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. رسوبات در صورتی یکنواخت در نظر گرفته خواهند شد که  $\sigma_g < 1/4$  باشد (Dey and 2005c, Barbhuiya, در این تحقیق  $\sigma_g = 1/27$  بدست آمد که نشان‌دهنده یکنواختی رسوبات می‌باشد).

آزمایش‌ها در شرایط آب زلال<sup>۱</sup> انجام شد. آبشستگی آب زلال زمانی صورت می‌پذیرد که انتقال رسوب از طرف جریان نزدیک‌شونده به حفره آبشستگی وجود نداشته باشد ( $U < U_c$ ). از طرف دیگر، آبشستگی بستر زنده<sup>۲</sup> زمانی صورت می‌پذیرد که حفره آبشستگی دائماً بوسیله رسوب توسط جریان نزدیک‌شونده تغذیه شود ( $U > U_c$ ).

سرعت آستانه حرکت و عمق مورد نظر با انجام آزمایش آستانه حرکت در آزمایشگاه بدست آمد. هدف، بدست آوردن عمق و سرعت آستانه حرکت در یک دبی معین بود. بدین منظور ابتدا رسوبات بستر رسوبی (بدون حضور تکیه‌گاه) کاملاً مسطح شده و دریچه انتهایی کاملاً بالا کشیده شد. سپس، فلوم به آرامی بوسیله جریان آب پر شده و دبی مورد نظر تنظیم گردید. پس از تنظیم دبی، دریچه انتهایی به آرامی پایین کشیده شد.

1 Clear Water

2 Live Bed



شکل (۲): شماتیکی از فلوم مورد آزمایش (الف) نمای پلان (ب) نمای جانبی

## نتایج و بحث

در این بخش نتایج به دو صورت ارائه می‌شود. بخش اول به بررسی توپوگرافی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل در حالت آزمایش شاهد (بدون استفاده از دیوار محافظ) و با استفاده از آن پرداخته می‌شود. در بخش دوم به بررسی اثر زاویه و طول دیوار محافظ بر کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل پرداخته می‌شود. در جدول (۱)، خلاصه نتایج آزمایشات آورده شده است.

نحوه‌ی انجام آزمایشات بدین صورت بوده است که در ابتدای آزمایش‌ها، به منظور جلوگیری از آبشستگی ناخواسته ناشی از عمق کم جریان در اطراف تکیه‌گاه، فلوم بوسیله یک لوله با نرخ کم در پایین دست جریان پر شده و سپس دبی و عمق مورد نظر تنظیم گردید. مدت آزمایش‌ها تا زمانی بود که حفره آبشستگی ایجاد شده تقریباً به حالت تعادل رسیده باشد. در اینجا با توجه به مشاهدات و امکانات آزمایشگاهی موجود، این زمان ۴ ساعت در نظر گرفته شد. بعد از اتمام هر آزمایش، نقطه حداکثر عمق آبشستگی و همچنین توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی توسط متر لیزری با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر برداشت گردید. همچنین، توپوگرافی برداشت شده توسط نرم‌افزار سورفر<sup>۱</sup> ترسیم گردید.

<sup>۱</sup> Surfer

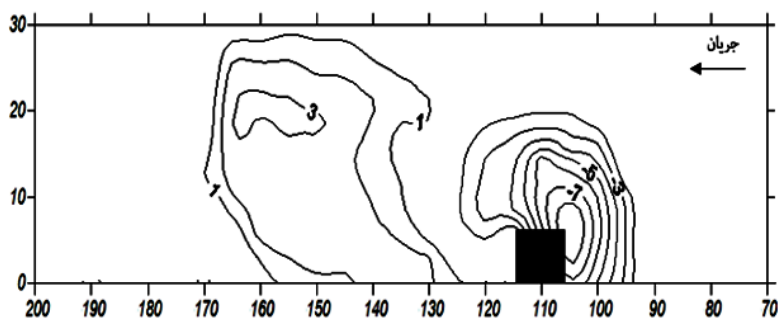
جدول (۱) خلاصه نتایج آزمایشات

عمق آبستگی پای دیوار محافظ $d_{sw}(cm)$	حداکثر عمق آبستگی پیرامون تکیه‌گاه $d_{sa}(cm)$	نسبت استغراق $S (%)$	زاویه دیوار محافظ $(\theta)$	طول دیوار محافظ $L_w (cm)$	طول تکیه‌گاه $L_a (cm)$	دبی جریان $Q(lit/sec)$	عمق جریان $h(cm)$	شماره آزمایش
-	۹/۲	-	-	-	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱
۸/۸	۷/۶	۲۵	۰	۴	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۲
۹/۳	۸/۳	۲۵	۱۵	۴	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۳
۹/۱	۸/۳	۲۵	۳۰	۴	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۴
۹/۵	۸/۵	۲۵	۴۵	۴	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۵
۷/۸	۵/۲	۲۵	۰	۶	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۶
۸/۵	۶/۷	۲۵	۱۵	۶	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۷
۸/۵	۷/۲	۲۵	۳۰	۶	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۸
۸/۶	۷/۲	۲۵	۴۵	۶	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۹
۶/۵	۴/۲	۲۵	۰	۸	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۰
۷/۷	۶	۲۵	۱۵	۸	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۱
۷/۹	۶/۲	۲۵	۳۰	۸	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۲
۸/۴	۶/۴	۲۵	۴۵	۸	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۳
۶/۳	۳/۸	۲۵	۰	۱۰	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۴
۶/۸	۴/۶	۲۵	۱۵	۱۰	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۵
۷/۱	۵/۷	۲۵	۳۰	۱۰	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۶
۷/۷	۶/۳	۲۵	۴۵	۱۰	۸	۱۲/۵۴	۱۶	۱۷

### توپوگرافی آبستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و دیوار

#### محافظ

در شکل ۳ توپوگرافی آبستگی پیرامون تکیه‌گاه پل در حالت بدون استفاده از دیوار محافظ (آزمایش شاهد) نشان داده شده است.

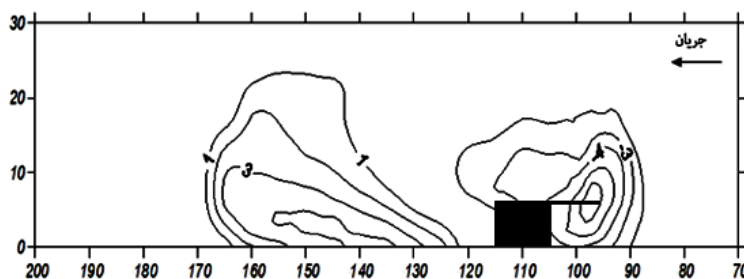


شکل (۳): توپوگرافی آبستگی پیرامون تکیه‌گاه در آزمایش شاهد

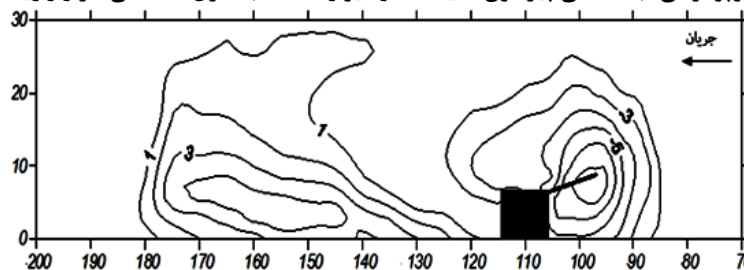
مخروطی شکل تشکیل گردید. همچنین، گرداب نعل اسبی و به تبع آن آبستگی پیرامون تکیه‌گاه توسعه یافته و رسوبات پس از جاروب شدن، در پایین دست تکیه‌گاه تجمع پیدا نمودند.

همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار آبستگی در دماغه بالادست تکیه‌گاه مشاهده شد که میزان حداکثر عمق آن ۹/۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. حفره آبستگی نیز پیرامون دماغه بالادست تکیه‌گاه بصورت

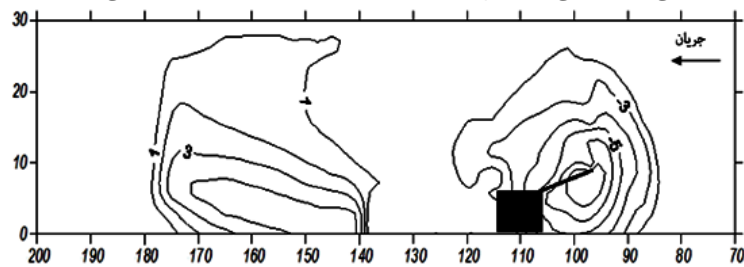
در شکل‌های (۴) تا (۷) توپوگرافی ایجاد شده پیرامون تکیه‌گاه در حالت استفاده از دیوار محافظ با طول ۸ سانتی-متر، نسبت استغراق ۲۵ درصد و زوایای ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نشان داده شده است.



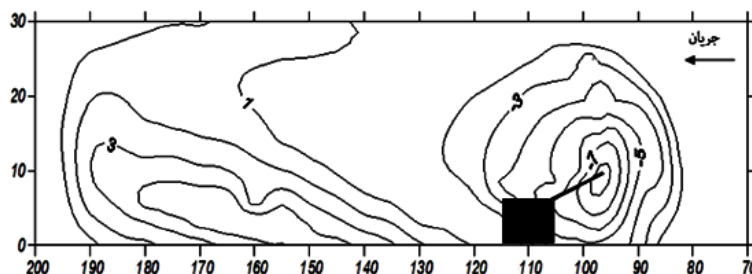
شکل (۴): توپوگرافی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در دیوار محافظ به طول ۸ سانتی‌متر و زاویه صفر درجه



شکل (۵): توپوگرافی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در دیوار محافظ به طول ۸ سانتی‌متر و زاویه ۱۵ درجه



شکل (۶): توپوگرافی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در دیوار محافظ به طول ۸ سانتی‌متر و زاویه ۳۰ درجه



شکل (۷): توپوگرافی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در دیوار محافظ به طول ۸ سانتی‌متر و زاویه ۴۵ درجه

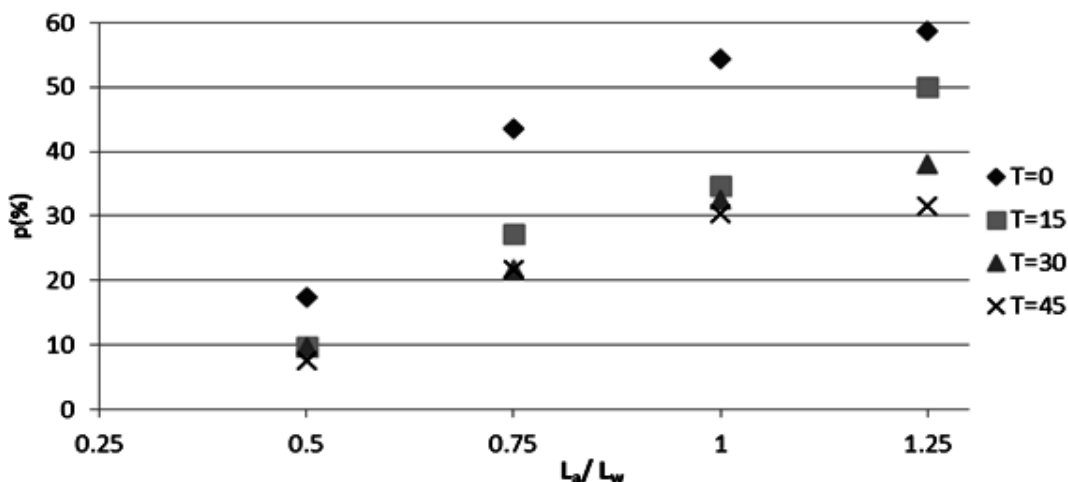
دیوار محافظ توانسته با تغییر الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل، حداکثر عمق آبشستگی را از دماغه بالادست تکیه‌گاه دور کرده و با عمق کمتری به پای دیوار محافظ

با توجه به اشکال (۴) تا (۷) نتایج نشان داد، استفاده از دیوار محافظ باعث انتقال حداکثر عمق آبشستگی از دماغه بالادست تکیه‌گاه به پای دیوار محافظ شده است.

### اثر زاویه و طول دیوار محافظ بر آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل

با توجه به خلاصه نتایج آزمایشگاهی جدول ۱، میزان کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه و کاهش عمق آبشستگی پای دیوار محافظ نسبت به حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در حالت شاهد محاسبه گردیدند. همانطور که قبلاً ذکر گردید، حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در حالت شاهد ۹/۲ سانتی متر اندازه‌گیری شد.

در شکل (۸)، درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در طول‌ها و زوایای مختلف دیوار محافظ در نسبت استغراق ۲۵ درصد، نسبت به حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در حالت شاهد نشان داده شده است.



شکل (۸): درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در طول‌ها و زوایای مختلف دیوار محافظ

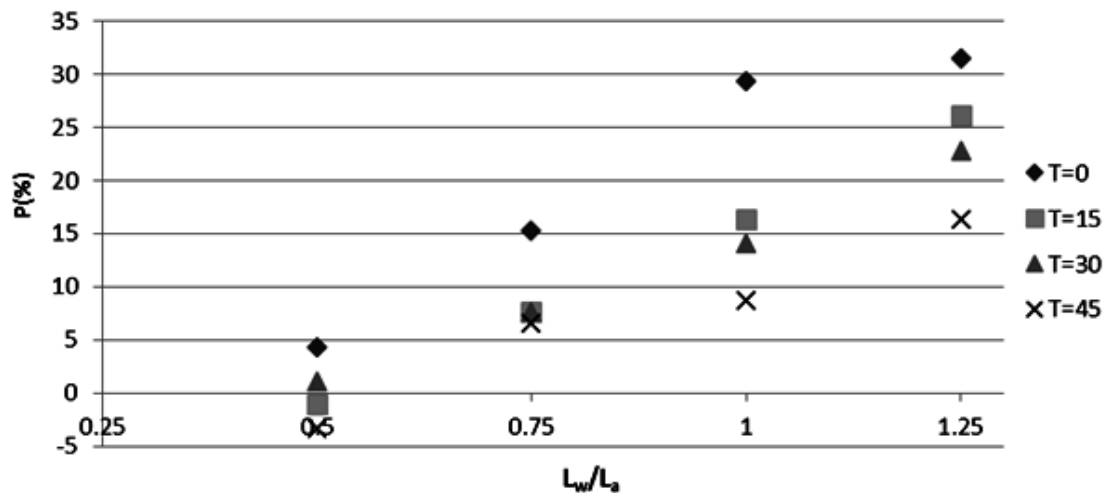
حالت شاهد گردید. همچنین، در یک زاویه ثابت و با افزایش گام‌به‌گام طول دیوار محافظ، میزان حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه کاهش یافت. به‌طور مثال، در زاویه نصب صفر درجه و در دیوارهایی به طول ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ برابر طول تکیه‌گاه، به ترتیب کاهش می‌یابد. معادل ۱۸، ۴۳، ۵۴ و ۵۹ درصدی در حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل نسبت به حالت شاهد مشاهده گردید.

شکل (۹)، درصد کاهش عمق آبشستگی پای دیوار محافظ در طول‌ها و زوایای مختلف دیوار محافظ و در

منتقل کند. کاهش زاویه نصب دیوار محافظ باعث بهبود عملکرد آن در کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه و کاهش عمق آبشستگی پای دیوار محافظ شده است. در حالتی که دیوار محافظ مورد استفاده قرار نگرفت حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه ۹/۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. با توجه اشکال (۵) تا (۸) نتایج نشان داد، با افزایش زاویه دیوار محافظ میزان توسعه یافتگی حفره آبشستگی و همچنین رسوب‌گذاری در پایین‌دست تکیه‌گاه افزایش یافت. در زوایای مختلف دیوار محافظ ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، عمق آبشستگی در پای دیوار به ترتیب ۶/۵، ۷/۷، ۷/۹ و ۸/۴ سانتی‌متر و در دماغه بالادست تکیه‌گاه به ترتیب ۴/۲، ۶، ۶/۲ و ۶/۴ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

با توجه به شکل (۸) نتایج نشان داد، کاهش زاویه نصب دیوار محافظ باعث بهبود عملکرد آن در کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه و به‌تبع آن کاهش توسعه گرداب نعل‌اسبی پیرامون تکیه‌گاه پل شده است. بهترین عملکرد در زاویه‌ی نصب صفر درجه و در مراحل بعدی زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه مشاهده شد. به‌طور مثال، در دیواری به طول ۱/۲۵ برابر طول تکیه‌گاه، استفاده از دیوار محافظ در زوایای مختلف ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، به ترتیب باعث کاهش ۵۹، ۵۰، ۳۸ و ۳۲ درصدی حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل نسبت به

نسبت استغراق ۲۵ درصد، نسبت به حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در حالت شاهد نشان داده شده است.



شکل (۹): درصد کاهش عمق آبشستگی پای دیوار در استفاده از طول‌ها و زوایای مختلف دیوار محافظ

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر زاویه و طول دیوار محافظ بر کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی نتایج تحقیق نشان داد، دیوار محافظ می‌تواند با تغییر الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل، حداکثر عمق آبشستگی را از دماغه بالادست تکیه‌گاه دور کرده و با عمق کمتری به پای دیوار محافظ منتقل کند. در یک طول ثابت دیوار محافظ، کاهش زاویه نصب دیوار محافظ باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و پای دیوار محافظ گردید. به‌طوری‌که زاویه نصب صفر درجه نسبت به سایر زوایا بهترین عملکرد را نشان داد. با کاهش زاویه نصب دیوار محافظ، ابعاد حفره آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و پای دیوار محافظ کاهش یافته و به تبع آن رسوب‌گذاری پایین‌دست تکیه‌گاه نیز کمتر گردید. همچنین، در یک زاویه نصب ثابت دیوار محافظ، افزایش گام‌به‌گام طول دیوار محافظ باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و پای دیوار محافظ گردید که با نتایج تحقیقات خادمی و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی دارد. ولی افزایش طول دیوار

با توجه به شکل (۹) نتایج نشان داد، دیوار محافظ حداکثر عمق آبشستگی را از دماغه بالادست تکیه‌گاه دور کرده و با عمق کمتری به پای دیوار محافظ منتقل کرده است. در واقع استفاده از دیوار محافظ باعث جلوگیری از گسترش حفره آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل و یا به‌عبارتی دیگر جلوگیری از توسعه گرداب نعل اسبی پیرامون آن شده است. با کاهش زاویه نصب دیواره‌ی محافظ، آبشستگی پای دیوار محافظ نیز کاهش یافته است. به‌طور مثال، در دیواری به طول ۱/۲۵ برابر طول تکیه‌گاه، استفاده از دیوار محافظ در زوایای مختلف ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، به ترتیب باعث کاهش ۲۳، ۲۶، ۳۲ و ۱۶ درصدی عمق آبشستگی پای دیوار محافظ نسبت به حالت شاهد گردید. همچنین، در یک زاویه نصب ثابت دیوار محافظ و با افزایش گام‌به‌گام طول دیوار محافظ، میزان عمق آبشستگی پای دیوار کاهش یافت. به‌طور مثال، در زاویه نصب صفر درجه و در دیوارهایی به طول ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ برابر طول تکیه‌گاه، به ترتیب کاهشی معادل ۴، ۱۶، ۲۹ و ۳۲ درصدی در عمق آبشستگی پای دیوار محافظ نسبت به حالت شاهد مشاهده گردید.

محافظ باعث افزایش هزینه‌های اجرایی پروژه نیز می‌گردد. بنابراین نیاز به انتخاب یک طول بهینه برای احداث دیوار محافظ می‌باشد. با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از دیوار محافظ به طولی معادل طول تکیه‌گاه و در زاویه نصب صفر درجه، باعث کاهش ۵۴ درصدی در حداکثر عمق آبستتگی پیرامون تکیه‌گاه و همچنین باعث کاهش ۲۹ درصدی در عمق آبستتگی پای دیوار محافظ نسبت به حالت شاهد گردید.

## منابع

- خادمی، خ. ۱۳۹۱. بررسی اثر فواصل طولی و عرضی صفحات مستغرق بر آبستتگی موضعی ایجادشده در محل تکیه‌گاه پل. رساله‌ی دکتری. دانشکده علوم و مهندسی آب. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- رمضانی، ی. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر پوشش گیاهی دشت سیلابی بر کاهش آبستتگی پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. رساله دکتری. دانشکده علوم و مهندسی آب. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شجاعی، پ.، فرسادی زاده، د. و حسین زاده دلیر، ع. ۱۳۹۰. تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش عمق آبستتگی پایه‌های استوانه‌ای شکل پل‌ها. نشریه علوم آب و خاک، دوره ۱۵، شماره ۵۷، ص ۳۳-۲۳.
- صادقی، ف. ۱۳۹۶. اثر نسبت استغراق دیوار محافظ بر آبستتگی پیرامون تکیه‌گاه پل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب. دانشگاه بیرجند.
- صادقی، ص. ۱۴۰۲. بررسی علل تخریب بعضی از پل‌ها. پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مکانیک، ساخت، صنایع و مهندسی عمران. بهمن ۱۴۰۲. ملبورن. استرالیا.
- غفاری، ح. و زمردیان، س. بررسی آشفستگی موضعی پایه پل در خاک‌های چسبنده. ۱۳۹۷. پژوهش مهندسی عمران. دوره ۱۸، ص ۱۷۹-۱۶۹.
- قربانی، ب. و حیدر پور، م. ۱۳۸۴. کنترل و کاهش آبستتگی موضعی با استفاده همزمان از شکاف و سنگ‌چین. گزارش طرح تحقیقاتی بین دانشگاهی. دانشگاه شهرکرد و صنعتی اصفهان.
- کریمی، م.، قمشی، م. و رمضانی، ی. ۱۳۹۴. اثر احداث دیوار موازی بر کاهش آبستتگی پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. دوره ۲۲، شماره ۳، ۱۶۴-۱۵۱.
- رحیمی‌نیا، ا. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر زیربهای موضعی و صفحات مستغرق در کنترل و کاهش آبستتگی موضعی پایه‌ی پل، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- نکوفر، ک. و زرودی، ع. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر شکل پایه پل در میزان آبستتگی پایه پل با استفاده از نرم‌افزار SSIM. فصلنامه علمی تخصصی مهندسی آب، شماره ۹، ص ۸۷-۷۳.
- Ahmed, F. and Rajaratnam, N. 2000. Observations on flow around an abutment. *Journal of Engineering Mechanics*. 125(1): 51-59.
- Barbhuiya, A.K. and Dey, S. 2003. Vortex flow field in a scour hole around abutments. *International Journal of Sediment Research*. 18(4): 310-325.
- Barbhuiya, A.K., and Dey, S. 2004. Local scour at abutments: a review. *Sadhana, Indian Academy of Sciences*. 29(5): 449-476.
- Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2004. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(7): 622-634.
- Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2005a. Flow field at a vertical-wall abutment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131(12): 1126-1135.
- Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2005b. Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 32(1): 213-232.
- Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2005c. Time variation of scour at abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131(1): 11-23.



- Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2006a. 3D flow field in a scour hole at a wing-wall abutment. *Journal of Hydraulic Research*. 44(1): 33-50.
- Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2006b. Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical-wall abutment. *Flow Measurement and Instrumentation*. 17(1): 13-21.
- Dongol, D.M.S. 1994. Local scour at bridge abutments. Report No. 544. School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Gill, M.A. 1970. Bed erosion around obstructions in rivers. Ph.D. thesis. Imperial College of Science and Technology, University of London, London, England.
- Hagerty, D.J. and Parola, A.C. 1992. Seepage influence on stability of bridge abutments. *Conf. Proc. Hydraulic Engineering, ASCE*, p. 900.
- Johnson, P.A., Hey, R.D., Tessier, M., and Rosgen, D.L. 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127(9): 772-778.
- Korkut, R., Martinez, E.J., Morales, R., Ettema, R., and Barkdoll, B. 2007. Geobag performance as scour countermeasure for bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(4): 431-439.
- Kwan, F. 1984. Study of Abutment Scour. Report No. 328. School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Kwan, F. 1987. A study of abutment scour. Ph.D. thesis. School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Li, H. 2005. Countermeasures against scour at bridge abutments. Ph.D. Thesis, Michigan Technological University.
- Liu, M.K., Chang, F.M. and Skinner, M.M. 1961. Effect of bridge construction on scour and backwater. Report No. CER60-HKL22. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- Melville, B.W. 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(4): 615-631.
- Melville, B.W. 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*. 123(2): 125-136.
- Melville, B.W., Ballegooy, S.V., Coleman, S.E., and Barkdoll, B. 2007. Riprap size selection at wing-wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(11): 1265-1269.
- Molinas, A., Kheireldin, K. and Baosheng, W. 1998. Shear stress around vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124(8): 822-830.
- Shen, H.W., Chan, C.T., Lai, J.S. and Zhao, D. 1993. Flow and scour near an abutment. *Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1993 Hydraulics Conference, San Francisco, CA, ASCE*, 1, pp. 743-748.
- Shirole A.M. and Holt R.C. 1991. Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. *Transp. Res. Rec. No. 1290, Transportation Research Board, Washington, DC*, pp. 137-142.
- Sturm, T.W. 2006. Scour around bankline and setback abutments in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(1): 21-32.
- Teruzzi, A., Ballio, F. and Armenio, V. 2009. Turbulent stresses at the bottom surface near an abutment: laboratory-scale numerical experiment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135(2): 106-117