

Investigation of the simultaneous effect of pier aspect ratio and pier alignment angle on the local scour depth around round-nosed rectangular bridge piers

A. Sheybani Tezerji¹ and M. Heidarpour^{2*}

Extended Abstract

Introduction:

Bridge local scour, which is responsible for structural failures in river-crossing bridges, occurs as a result of the interaction between the flow field and the bridge pier, leading to the removal of bed material and the formation of a scour hole around the foundation. Most existing research on the geometry of bridge piers focus on circular or rectangular piers aligned with the flow. However, real-world bridge piers often deviate from the flow direction due to hydraulic constraints or structural alignment. The alignment angle (α), defined as the deviation of the pier's longitudinal axis from the flow direction, alters the symmetry of the horseshoe vortex and significantly affects the magnitude and position of the maximum scour depth. Moreover, the ratio of pier length (in the direction of flow) to its width (L/D) modifies the distribution of flow velocities and shear stresses around the pier. Despite numerous experimental studies, the simultaneous effect of these two parameters on local scour depth around non-circular piers, particularly rounded-nosed rectangular piers, has received limited attention. The present study aims to investigate the combined influence of L/D and α on the local scour depth under clear-water conditions.

Materials and Methods:

The experiments were conducted in the hydraulic laboratory of Isfahan University of Technology (IUT), Iran. The flume used for this study was a 12-meter-long, 0.6-meter-wide, and 0.5-meter-deep rectangular open channel with a water circulation system. The bed material consisted of uniform sand with a median particle size (d_{50}) of 0.77 mm, and a geometric standard deviation (σ_g) of 1.06. Flow depth and discharge were controlled using a tailgate and calibrated pump system. Two pier models were fabricated from transparent Plexiglas to allow clear observation of flow structures. The reference circular pier had a diameter (D) of 3 cm, while the rounded-nosed rectangular pier had a constant width (D) of 3 cm (equal to the circular pier's diameter) and variable lengths (L) 6, 9 and 12 cm, corresponding to aspect ratios (L/D) of 2, 3 and 4. The piers were tested at three different alignment angles relative to the flow direction (α) of 5°, 10° and 20°. Thus, a total of 13 experiments were conducted, including the reference circular pier case. The flow velocity was adjusted to achieve clear-water conditions at $U/U_c=0.86$, where U_c was the critical velocity for the initiation of sediment motion, determined using the Shields criterion. The steady discharge was set at 50 liters per second, corresponding to a flow depth of 18.8 cm. Before each run, the sand bed was leveled and compacted to ensure uniform initial conditions. Each test continued until the scour hole reached equilibrium. After completion, the final bed profile was measured using a digital point gauge with 0.1 mm precision. Longitudinal and transverse profiles were recorded at multiple sections to obtain the maximum local scour depth d_s . All experiments were repeated twice to ensure reproducibility, and the mean values were reported. Flow fluctuations were maintained within $\pm 2\%$ of the set discharge. The experimental data were analyzed using dimensional analysis and regression techniques.

Results and Discussions:

The scour process began with the formation of a strong downflow on the upstream face, followed by the development of a horseshoe vortex that transported sediment away from the pier base. The equilibrium scour depth was achieved within 5–6 hours. Determining the effect of aspect ratio indicated that at $\alpha \leq 5^\circ$, increasing the aspect ratio from 2 to 4 led to a reduction in maximum scour depth, which can be attributed to the

1- Graduate of Hydraulic Structures, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* Corresponding Author: heidar@iut.ac.ir

Received: 2025/12/30

Accepted: 2026/02/21

redistribution of flow momentum along the elongated pier. At $\alpha \geq 10^\circ$, the opposite trend was observed. Quantitatively, increasing L/D from 2 to 4 resulted in a 20% decrease in scour depth at $\alpha = 5^\circ$, but a 35% increase at $\alpha = 20^\circ$. Regarding alignment angle, increasing α from 5° to 20° caused the scour hole to deepen and shift laterally toward the upstream corner of the pier. This behavior resulted from the asymmetric horseshoe vortex system generated under oblique flow conditions. The rounded-nosed rectangular pier produced 15–20% less scour depth at $\alpha \leq 5^\circ$, confirming its hydraulic efficiency in near-aligned conditions. However, for $\alpha \geq 10^\circ$, the scour depth for rectangular piers exceeded that of the circular pier, indicating the negative impact of larger misalignment angles. The combined influence of aspect ratio and alignment angle was found to be nonlinear and interactive. For moderate aspect ratios (L/D = 3), the influence of α dominated the scour behavior, while at extreme aspect ratios, both parameters interacted to amplify scour depth. In analyzing bed morphology, topographic surveys revealed that for $\alpha \leq 5^\circ$, the scour hole was nearly symmetrical and shallow, while at $\alpha \geq 10^\circ$, the hole became elongated and skewed toward the upstream corner. The deposition zone downstream expanded with increasing α , reflecting stronger wake vortices.

Conclusion:

The present experimental investigation demonstrated that both pier aspect ratio and alignment angle play crucial and interdependent roles in determining local scour depth around bridge piers. The major conclusions are summarized as follows: For alignment angles below 5° , increasing the pier aspect ratio (L/D) decreased local scour depth by distributing flow energy along the pier face. For $\alpha \geq 10^\circ$, larger aspect ratios intensified scour by promoting asymmetric vortex formation and higher local shear stresses. Rounded-nosed rectangular piers performed better than circular piers under small alignment angles ($\alpha \leq 5^\circ$), but their performance deteriorated at higher angles. A modified empirical relationship was proposed to estimate the alignment coefficient K_α , which accurately predicted scour depth with $R^2 = 0.94$. From a practical perspective, pier alignment angles greater than 10° should be avoided in bridge design to minimize local scour risks. Future research is recommended to examine the effects of surface roughness, pier spacing (group effects), and unsteady flow conditions such as floods using both experimental and computational fluid dynamics (CFD) modeling approaches.

Keywords: Bridge pier, Rectangular pier alignment angle, Local scour, Round-nosed rectangular pier

Citation: Sheybani Tezerji, A., and Heidarpour, M., 2026. Investigation of the simultaneous effect of pier aspect ratio and pier alignment angle on the local scour depth around round-nosed rectangular bridge piers. *Iranian Water Research Journal*, 21(61), pp. 1-18. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14840.2618>

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



بررسی اثر همزمان نسبت طول به عرض و زاویه انحراف پایه بر عمق آبشستگی موضعی پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد

اعظم شیبانی تدرجی^۱ و منوچهر حیدرپور^{۲*}

چکیده

آبشستگی موضعی یکی از شایع‌ترین علل خرابی پل‌ها است که معمولاً در اطراف پایه و تکیه‌گاه پل‌ها رخ می‌دهد. این مطالعه به بررسی تغییرات آبشستگی موضعی در اطراف پایه مستطیلی دماغه‌گرد می‌پردازد. بدین منظور از یک پایه دایره‌ای به قطر ۳ سانتی‌متر و یک پایه مستطیلی دماغه‌گرد به عرض ۳ سانتی‌متر استفاده شد. تمرکز اصلی این مطالعه روی پایه مستطیلی دماغه‌گرد بوده و تاثیر دو متغیر بر عمق آبشستگی مد نظر قرار گرفت: (۱) نسبت طول به عرض پایه (L/D) و (۲) زاویه انحراف پایه از مسیر جریان (α). آزمایش‌های آبشستگی (۱۳ آزمایش) در شرایط آب زلال با شدت جریان ثابت $U/U_c=0.86$ با در نظر گرفتن ۳ نسبت $L/D=3$ ، $L/D=2$ و $L/D=4$ و زاویه انحراف پایه ۵، ۱۰ و ۲۰ درجه انجام و دبی و عمق جریان به ترتیب 50 lit/s و 18.8 cm تنظیم شدند. نتایج نشان می‌دهد که در زوایای کوچکتر از ۵ درجه، با افزایش نسبت L/D عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و در زاویه بزرگتر از ۱۰ درجه، افزایش طول پایه آبشستگی را افزایش می‌دهد. همچنین، مشخص شد که پایه مستطیلی دماغه‌گرد در زوایای انحراف پایه از مسیر جریان کوچکتر از ۵، عمق آبشستگی کمتری را نسبت به پایه دایره‌ای متحمل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، پایه پل، پایه مستطیلی دماغه‌گرد، زاویه انحراف پایه از مسیر جریان

ارجاع: شیبانی تدرجی، ا.، حیدرپور، م.، ۱۴۰۵. بررسی اثر همزمان نسبت طول به عرض و زاویه انحراف پایه بر عمق آبشستگی موضعی پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد. مجله پژوهش آب ایران، ۲۱(۶۱)، صص. ۱-۱۸. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14840.2618>

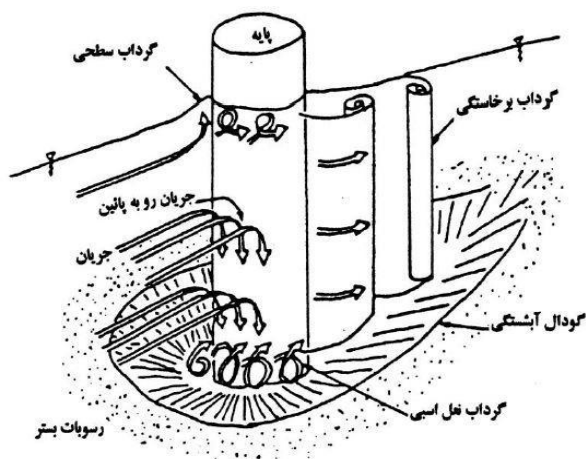
۱ - دانش آموخته سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲ - استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول: heidar@iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

مقدمه



شکل ۱- میدان جریان در اطراف پایه دایره‌ای (Melville and Coleman, 2000)

در مطالعات رایج در این حوزه، پایه‌های دایره‌ای بیشترین بررسی‌ها را به خود اختصاص داده‌اند (Chiew and Melville, 1987; Ettema, 1980; Melville and Chiew, 1999).

Javidi Vahdati et al. (2020) تاثیر استفاده همزمان شمع‌های فداشونده و کابل را برای کنترل آبشستگی پایه بررسی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که در یک پایه پل استفاده همزمان از کابل و شمع‌های فداشونده با ترکیب مثلی بهتر از روش‌های دیگر است. در حالی که پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد به دلیل کاربرد وسیع‌تر در سازه‌های واقعی و هندسه‌ی پیچیده‌ترشان، توجه روزافزونی را به خود جلب کرده‌اند (Mashahir et al., 2010; Sanadgol et al., 2021).

زاویه‌ی برخورد جریان به پایه (α) نقش مهمی در تشدید آبشستگی دارد. به گزارش (Dietz (1972) و Fael et al. (2016)، انحراف پایه از مسیر جریان سبب افزایش تمرکز جریان در وجه بالادست و افزایش عمق گودال می‌شود.

از میان مطالعات متعددی که در زمینه‌ی کاهش آبشستگی و تأثیر هندسه‌ی پایه انجام شده است، Zarrati et al. (2004, 2006) به کارگیری طوق را برای کنترل آبشستگی پیشنهاد کردند. (Garg et al. (2008) کاهش ۸۶ درصد در عمق آبشستگی را در پایه‌های مستطیلی با استفاده از ترکیب طوق و پره گزارش کردند. Moghanloo et al. (2020) اثر افزایش ضخامت طوق را با در نظر گرفتن سایر پارامترهای موثر بر الگوی جریان در اطراف پایه پل مستطیلی دماغه‌گرد واقع در کانال با خم ۱۸۰ درجه بررسی کردند. Sanadgol et al. (2021) نشان دادند که استفاده از

رودخانه‌ها همواره نقشی کلیدی در شکل‌گیری تمدن‌های بشری داشته‌اند و پل‌ها به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی، وظیفه‌ی اتصال دو سوی رودخانه و تأمین زیرساخت‌های حمل‌ونقل را بر عهده دارند. با وجود اهمیت زیاد این سازه‌ها، پدیده‌ی آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین دلایل تخریب آنها محسوب می‌شود. بر اساس گزارش‌های اداره بزرگراه‌های فدرال ایالات متحده، حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد از خرابی‌های پل‌ها به علت آبشستگی رخ می‌دهد (Brice and Blodgett, 1979; Richardson and Davis, 2001).

به‌طور کلی آبشستگی در پل‌ها شامل سه نوع است: آبشستگی عمومی، انقباضی و موضعی (Melville and Coleman, 2000; Van-Ballegooy, 2005).

آبشستگی عمومی در اثر تغییر طبیعی بستر و مسیر رودخانه رخ می‌دهد. آبشستگی انقباضی ناشی از کاهش سطح مقطع جریان در محل پل است و آبشستگی موضعی، که مستقیماً تحت تأثیر شکل و ابعاد پایه قرار دارد، مهم‌ترین نوع آن است. به‌طور کلی آبشستگی موضعی به جدا شدن ذرات رسوب از بستر رودخانه در اطراف پایه‌های پل بر اثر جریان آشفته و تشکیل گرداب‌های سه‌بعدی گفته می‌شود (Chiew, 1984; Dey and Raikar, 2007). این پدیده در صورت بی‌توجهی می‌تواند به ایجاد گودال‌های عمیق در اطراف پایه منجر شده و پایداری سازه را به خطر اندازد.

در پایه‌های پل، تشکیل گرداب‌های نعل‌اسبی در بالادست و گرداب‌های برخاستگی در پایین‌دست (شکل ۱) از اصلی‌ترین مکانیسم‌های ایجاد آبشستگی هستند (Dargahi, 1990; Dey and Raikar, 2007). این گرداب‌ها موجب افزایش تنش برشی موضعی و جابه‌جایی پیوسته‌ی ذرات بستر می‌شوند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که عمق نهایی آبشستگی تابع مجموعه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی، رسوبی و هندسی است (Hoffmans and Verheij 1997; Melville and Coleman, 2000; Melville and Sutherland, 1988).

از میان این پارامترها، شکل و جهت‌گیری پایه از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر الگوی جریان و عمق گودال محسوب می‌شوند.

بدین ترتیب، اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از:
 - بررسی اثر افزایش نسبت L/D بر عمق آبشستگی در پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد
 - بررسی اثر زاویه انحراف α بر تغییرات عمق و شکل گودال آبشستگی
 - تحلیل اثر همزمان L/D و α و مقایسه نتایج با روابط تجربی معتبر
 - بررسی تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف پایه‌ها به منظور بهبود روابط طراحی

نتایج این پژوهش می‌تواند به افزایش دقت در پیش‌بینی عمق آبشستگی و ارتقای ایمنی پل‌ها در شرایط جریان پیچیده کمک نماید.

روابط تخمین عمق آبشستگی با زمان

فرآیند آبشستگی موضعی وابسته به زمان می‌باشد. تاکنون روابط متعددی برای تعیین عمق آبشستگی توسط محققین ارائه شده است (Shen et al., 1969; Ettema, 1980; Kothyari, 1992; Melville and Chiew, 1999). برخی از روابط رایج در این دسته در ادامه معرفی می‌شوند که در آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

عمق آبشستگی در زمان معین t با d_s نشان داده می‌شود. با گذشت زمان، نرخ آبشستگی کاهش یافته و به تعادل می‌رسد. عمق آبشستگی تعادل معمولاً با d_{se} نشان داده می‌شود.

• رابطه (Hoffmans and Verheij (1997)

در پایه‌های باریک که در آنها $D/y < 1$ و $d_{se} > D$ هستند، می‌توان عمق آبشستگی در حال توسعه را با استفاده از رابطه زیر توصیف نمود:

$$\begin{cases} \frac{d_s}{D} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^\gamma & t < t_1 \\ \frac{d_s}{d_{se}} = 1 - \exp\left\{\ln\left[1 - \frac{D}{d_{se}}\right] \left[\frac{t}{t_1}\right]^\gamma\right\} & t \geq t_1 \end{cases} \quad (1)$$

که در این رابطه، γ ضریب ثابتی است که محدوده آن ۰/۴ تا ۰/۲ می‌باشد. همچنین، t_1 زمانی است که در آن $d_s = D$ باشد.

• رابطه (Melville and Chiew (1999)

در مطالعه (Melville and Chiew (1999) آزمایش‌های متعددی برای بررسی و روشن شدن تاثیر زمان بر عمق آبشستگی در پایه‌های دایره‌ای روی بسترهای ماسه‌ای یکنواخت تحت شرایط جریان آب زلال انجام شده است. این محققان رابطه زیر را برای تخمین عمق آبشستگی و زمان رسیدن به حالت تعادل آبشستگی ارائه نمودند.

کف‌بند در پایه‌های دماغه‌گرد با $\frac{L}{D} > 2$ اثربخشی کمتری دارد.

(Sanadgol (2022) از کف‌بند برای کنترل و کاهش آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های دایره‌ای و مستطیلی دماغه‌گرد استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که کف‌بند بیشترین کارایی را در پایه‌های دایره‌ای دارد. همچنین وی استفاده از کف‌بند را برای کاهش عمق آبشستگی در پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد با $L/b > 2$ توصیه نمود. Pourghasemzadeh and Ghomeshi (2022) در یک مطالعه آزمایشگاهی اثرات زاویه گروه پایه نسبت به جهت جریان را ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که بیشترین افزایش عمق آبشستگی در اثر افزایش زاویه گروه پایه از زاویه صفر تا زاویه $\pi/6$ رادیان، برابر ۳۶ درصد است.

(Khilaj et al. (2023) تاثیر آبیایه (کف‌بند) بر عمق آبشستگی را در پایه با اشکال هندسی مختلف بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که طراحی مناسب شکل پایه می‌تواند تاثیر مثبتی در کاهش مقدار عمق آبشستگی داشته باشد؛ یک طراحی مناسب شکل پایه می‌تواند با کنترل گردابه‌ها و کاهش قدرت آنها موجب کاهش عمق آبشستگی گردد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که شکل پایه بیضوی با آبیایه بیشترین کاهش عمق آبشستگی را دارد.

(Hosseini Matin et al. (2024) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی اثر فاصله عرضی بین پایه‌های مستطیلی شکل بر آبشستگی را تحت شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی نموده و نشان دادند بیشترین عمق آبشستگی در فاصله ۸ برابر عرض پایه رخ می‌دهد. (Safaripour et al. (2024) تاثیر نسبت غوطه‌وری پره‌های مستغرق بر شیب گودال آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها را در کانالی با قوس تند بررسی نمودند. آنها با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی در اطراف گروه پایه با آرایش‌های عرضی و طولی نشان دادند که چگونه پره‌ها با نسبت غوطه‌وری متفاوت بر کاهش آبشستگی تک پایه و گروه پایه‌ها تاثیر می‌گذارند.

با وجود این، بیشتر پژوهش‌ها تنها به بررسی اثر یکی از پارامترها (شکل پایه یا زاویه انحراف) پرداخته‌اند و بررسی همزمان اثر نسبت طول به عرض پایه (L/D) و زاویه انحراف (α) کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بر اساس مرور منابع، شکاف دانشی قابل توجهی در خصوص اثر همزمان نسبت طول به عرض پایه مستطیلی دماغه‌گرد و زاویه انحراف پایه از مسیر جریان بر عمق آبشستگی موضعی وجود دارد.

در این رابطه، فاکتورهای مختلفی در نظر گرفته شده است که به صورت زیر می‌باشند.

K_I - فاکتور شدت جریان

K_y - فاکتور عمق جریان

K_d - فاکتور اندازه رسوب

K_σ - فاکتور دانه‌بندی رسوب

K_s - فاکتور شکل پایه

K_α - فاکتور هم‌راستایی با جریان

توصیف هر کدام از این پارامترها در ادامه بیان می‌شود.

$$K_I = \begin{cases} 2.4 \left| \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} \right| & \text{if } \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} < 1 \\ 2.4 & \text{if } \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$K_y = \begin{cases} 0.78 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.255} & \text{if } \frac{y}{D} < 2.6 \\ 1 & \text{if } \frac{y}{D} > 2.6 \end{cases} \quad (10)$$

$$K_d = \begin{cases} 0.57 \log \left(\frac{2.24D}{d_{50}} \right) & \text{if } \frac{D}{d_{50}} < 25 \\ 1 & \text{if } \frac{D}{d_{50}} > 25 \end{cases} \quad (11)$$

در ذرات رسوبی یکنواخت، U_a برابر U_c می‌باشد (یعنی، $U_a=U_c$). فاکتور دانه‌بندی رسوب برابر $K_\sigma=1$ در نظر گرفته می‌شود. فاکتور K_s و K_α در پایه دایره‌ای برابر یک می‌باشند. فاکتور K_α را می‌توان از رابطه‌ای که Richardson and Davis (2001) ارائه کرده‌اند، محاسبه نمود. Richardson and Davis (2001) رابطه زیر را پیشنهاد کردند که با ضریب زاویه انحراف پایه از مسیر جریان (K_α) که توسط Laursen and Toch (1956) به دست آمده، مطابقت دارد. در این رابطه، L/D معرف نسبت طول به عرض پایه مستطیلی می‌باشد.

$$K_\alpha = \left(\cos \alpha + \frac{L}{D} \sin \alpha \right)^{0.65} \quad (12)$$

• رابطه (Richardson et al., 1975) CSU

رابطه CSU یکی دیگر از روابط موجود در تعیین عمق آبشستگی می‌باشد. فاکتورهای K_s و K_α به ترتیب فاکتورهای شکل پایه و فاکتور هم‌راستایی با جریان هستند که در پایه دایره‌ای برابر یک می‌باشند.

$$\frac{d_{se}}{y} = 2K_s K_\alpha \left(\frac{D}{y} \right)^{0.65} \left(\frac{U}{\sqrt{gy}} \right)^{0.43} \quad (13)$$

$$K_t = \frac{d_s}{d_{se}} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{U_c}{U} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (2)$$

در این رابطه، K_t معرف فاکتور زمان است. d_{se} نیز با توجه به رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} d_s = K_{yD} K_I K_d K_t \\ K_t = \frac{d_s}{d_{se}} \end{array} \right\} \Rightarrow d_{se} = K_{yD} K_I K_d \quad (3)$$

در رابطه بالا، K_{yD} معرف فاکتور عمق جریان و قطر پایه، K_I معرف فاکتور شدت جریان و K_d معرف فاکتور اندازه ذرات بستر می‌باشد. هر کدام از فاکتورهای ارائه شده مطابق با فرمول‌های زیر تعیین می‌شوند.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{yD} = 2.4D \quad \text{for } \frac{D}{y} < 0.7 \\ K_{yD} = 2(yD)^{0.5} \quad \text{for } 0.7 < \frac{D}{y} < 5 \\ K_{yD} = 4.5y \quad \text{for } \frac{D}{y} > 5 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_I = \frac{U}{U_c} \quad \text{for } \frac{U}{U_c} < 1 \\ K_I = 1 \quad \text{for } \frac{U}{U_c} > 1 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_d = 0.57 \log \left(\frac{2.24D}{d_{50}} \right) \quad \text{for } \frac{D}{d_{50}} < 25 \\ K_d = 1 \quad \text{for } \frac{D}{d_{50}} > 25 \end{array} \right. \quad (6)$$

که در آن، d_{50} قطر میانه مواد رسوبی بوده و همچنین زمان رسیدن به حالت تعادل آبشستگی (t_e) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} t_e(\text{days}) = 48.26 \frac{D}{U} \left(\frac{U}{U_c} - 0.4 \right), \quad \frac{y}{D} > 6 \\ t_e(\text{days}) = 30.89 \frac{D}{U} \left(\frac{U}{U_c} - 0.4 \right) \left(\frac{y}{D} \right)^{0.25}, \quad \frac{y}{D} \leq 6 \end{array} \right. \quad (7)$$

روابط تخمین بیشینه عمق آبشستگی

روابط بسیاری از تحقیقات گذشته برای تخمین بیشینه عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل موجود است. برخی از روابط رایج و مستند در تخمین عمق آبشستگی در ادامه مطرح می‌شوند.

• رابطه (Melville and Sutherland 1988)

رابطه زیر توسط Melville and Sutherland (1988) برای تخمین عمق آبشستگی مطرح شده است.

$$\frac{d_{se}}{D} = K_I K_y K_d K_\sigma K_s K_\alpha \quad (8)$$



شکل ۲- نمایی از: (الف) کانال آزمایشگاه، (ب) پمپ و (ج) دبی سنج

برای آزمایش‌ها، یک بستر رسوبی که بین دو سکو قرار داشت ایجاد گردید (شکل ۳). این بستر رسوبی که محلی برای قرارگیری پایه‌ها بود، در فاصله ۱۰ متری از ورودی کانال و به طول ۳ متر انتخاب شد. عمق بستر رسوبی ۰/۱۸ متر (۶ برابر قطر پایه) در نظر گرفته شد تا پی پایه در انتهای آزمایش نمایان نشود. برای یکنواختی زبری، کف‌های کاذب در بالا و پایین دست با ارتفاع ۰/۱۶ متر نصب و با لایه‌ای ۰/۰۲ متری از رسوبات پوشانده شدند. همچنین یک کف کاذب دیگر به طول ۳ متر و ارتفاع ۰/۱۸ متر در بالادست تعبیه و با لایه‌ای نازک از رسوبات پوشیده شد. برای جلوگیری از تغییر ناگهانی ارتفاع آب، شیب ملایمی از شن در دو طرف کف‌های کاذب ایجاد گردید.

تمرکز مطالعه بر پایه مستطیلی دماغه‌گرد است، هر چند از پایه دایره‌ای نیز استفاده شد. جنس هر دو از تفلون PVC انتخاب گردید تا در برابر فرسایش، نیروهای جریان و تغییر شکل مقاوم باشند. بر اساس معیار (Chiew and Melville (1987) قطر پایه دایره‌ای ۳ سانتی‌متر تعیین شد که کمتر از ۱۰٪ عرض کانال است. در پایه مستطیلی، عرض برابر همین قطر در نظر گرفته شد. مدل‌ها در بخش میانی بستر رسوبی، روی محور مرکزی کانال و عمود بر کف قرار گرفتند.

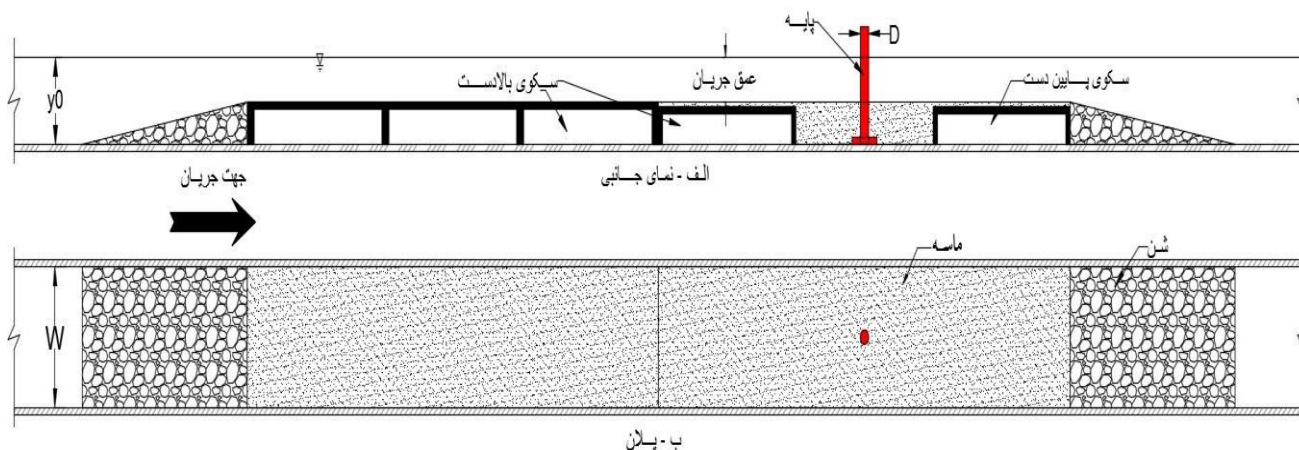
در این مطالعه، از یک نوع ماسه ریخته‌گری گردگوشه استفاده شد. چگالی نسبی مواد رسوبی ۲/۶۵ بود. رسوب در نظر گرفته شده در محدوده دو الک آزمایشگاهی با قطر ۰/۸۴ و ۰/۷۱ میلی‌متر الک شدند تا از یکنواختی ذرات اطمینان حاصل شود. پس از بررسی منحنی دانه‌بندی تجمعی، دانه‌بندی برای ذرات، قطر میانه مواد رسوبی d_{50} برابر ۰/۷۷ میلی‌متر به دست آمد. بر این اساس، $d_{15.9}$ و $d_{84.1}$ به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۰/۸۲ میلی‌متر تعیین شد. بنابراین، با توجه به اطلاعات به دست آمده از دانه‌بندی، انحراف معیار هندسی مواد رسوبی بستر برابر با ۱/۰۶ به دست آمد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر همزمان نسبت طول به عرض پایه (L/D) و زاویه انحراف پایه از مسیر جریان (α) بر عمق آبشستگی موضعی در پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد، مجموعه‌ای از آزمایش‌های کنترل‌شده در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. طراحی آزمایش‌ها به گونه‌ای صورت گرفت که شرایط جریان، دانه‌بندی بستر و پارامترهای هندسی پایه‌ها کاملاً تحت کنترل باشند تا اثرات متغیرهای مورد مطالعه به صورت مجزا و دقیق ارزیابی شوند. در این راستا، یک کانال آزمایشگاهی باز با جریان یکنواخت استفاده شد و پایه‌های دایره‌ای و مستطیلی دماغه‌گرد در نسبت‌ها و زوایای مختلف در مرکز کانال نصب شدند. مراحل آماده‌سازی، اجرای آزمایش و اندازه‌گیری عمق آبشستگی بر اساس استانداردهای پذیرفته‌شده در مطالعات آبشستگی انجام شد. جزئیات کامل آزمایش‌ها و روش تحلیل داده‌ها در ادامه ارائه شده است.

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شدند. کانال مورد استفاده به صورت یک سیستم جریان چرخشی بسته و با دیواره‌های شیشه‌ای بود تا در نظارت، مشاهده جریان و انتقال رسوب به ما کمک کند. مقطع کانال به شکل مستطیلی و طول آن ۱۵ متر، عرض و ارتفاع آن نیز به ترتیب ۰/۹ و ۰/۶ متر بود. نمایی از این کانال آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است.

در طول آزمایشات، جریان توسط پمپ از یک لوله (این لوله مخزن انتهایی و ابتدایی کانال را به هم متصل نموده بود)، ابتدا به مخزن ابتدایی در سمت بالادست کانال هدایت شده و سپس به درون کانال اصلی منتقل می‌شود. در انتهای کانال نیز جریان به مخزن انتهایی تخلیه شده و سپس توسط پمپ مجدداً به مخزن ابتدایی پمپ می‌شود. در نهایت یک سیستم جریان چرخشی در این کانال برقرار می‌شود. حداکثر دبی تولیدی پمپ نیز برابر ۶۰ لیتر بر ثانیه است. جریان ورودی با استفاده از یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی تنظیم شد. در این مطالعه، برای انجام آزمایش‌ها مقدار دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل ۳- محدوده مقطع آزمایش با کفهای کاذب

بنابراین، طراحی آزمایش‌ها بر اساس ترکیب دو متغیر اصلی انجام شد:

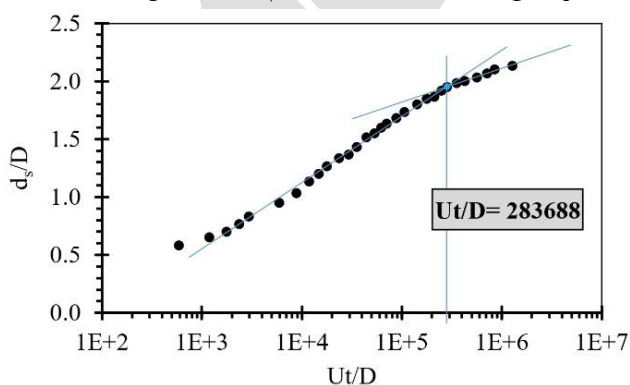
- تغییر نسبت طول به عرض پایه در سه حالت $L/D=2, 3, 4$ با عرض ثابت ۳ سانتی‌متر و طول‌های متناظر ۶، ۹ و ۱۲ سانتی‌متر.

- تغییر زاویه انحراف پایه از مسیر جریان در چهار حالت $\alpha=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$.

این ترکیب امکان تحلیل نظام‌مند اثرات هندسی پایه را بر آبشستگی موضعی فراهم می‌کند. نتایج حاصل می‌تواند به درک بهتر نقش ابعاد و جهت‌گیری پایه‌ها در پدیده آبشستگی کمک کند و مبنایی برای بهبود طراحی سازه‌های هیدرولیکی فراهم آورد.

شرایط آزمایش‌ها

برای رسیدن به تعادل آبشستگی نیاز به زمان طولانی است، اما بر اساس آزمایش ۳۶ ساعته و معیارهای تغییر شیب نمودار نیمه‌لگاریتمی و دستیابی به ۹۰٪ عمق آبشستگی، مشخص شد که در ساعت هشتم بیش از ۹۰٪ آبشستگی رخ می‌دهد. بنابراین همه آزمایش‌ها به مدت ۸ ساعت انجام شدند (شکل ۴).



شکل ۴- نمودار نیمه لگاریتمی آبشستگی برای تعیین زمان توقف آزمایش‌ها

پارامترهای آزمایش

هدف این پژوهش تحلیل اثر دو پارامتر کلیدی نسبت طول به عرض پایه (L/D) و زاویه انحراف پایه از مسیر جریان (α) بر عمق و الگوی آبشستگی است. در پایه‌های دایره‌ای، تغییر طول مفهومی ندارد زیرا نسبت L/D همواره برابر با ۱ است. اما در پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد، با ثابت نگه داشتن عرض پایه می‌توان طول و نسبت L/D را تغییر داد. در این مطالعه عرض پایه مستطیلی برابر با قطر پایه دایره‌ای در نظر گرفته شد. برای بررسی تغییرات طول پایه، از نسبت ۲، ۳ و ۴ در پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد استفاده می‌شود.

پارامتر دوم، زاویه انحراف پایه از مسیر جریان یا میزان هم‌راستایی آن با جریان است. در پایه‌های دایره‌ای این زاویه بی‌تأثیر است، زیرا شکل پایه در هر جهت یکسان باقی می‌ماند. اما در پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد، تغییر زاویه موجب برخورد مایل جریان و تغییر الگوی گردابه‌ها و در نتیجه تغییر عمق آبشستگی می‌شود.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که اثر زاویه تنها در شرایط خاص اهمیت دارد. به‌طور مشخص، Laursen and Toch (1956) نخستین بررسی‌ها را انجام دادند و Richardson and Davis (2001) بیان کردند که ضریب زاویه ($K\alpha$) تنها زمانی باید لحاظ شود که $\alpha > 5^\circ$ و $2 \leq L/D \leq 16$ باشد. همچنین Melville and Sutherland (1988) ضریب زاویه را صرفاً برای پایه‌های مستطیلی معرفی کردند. این یافته‌ها ضرورت بررسی دقیق‌تر این پارامتر را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، سه زاویه انحراف 5° ، 10° و 20° برای پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد انتخاب و نتایج با حالت هم‌راستا ($\alpha=0^\circ$) مقایسه شد. تغییر زاویه تنها برای پایه‌هایی با $L/D \leq 4$ انجام شد تا شرایط با معیارهای معتبر همخوانی داشته باشد.

ذرات، ρ 's چگالی رسوبات مستغرق، U_c سرعت بحرانی جریان، D قطر پایه دایره‌ای (برابر با عرض پایه مستطیلی دماغه‌گرد)، L طول پایه مستطیلی دماغه‌گرد، W عرض کانال مستطیلی، t زمان و α زاویه انحراف پایه از مسیر جریان با پایه است. با آنالیز ابعادی و قضیه باکینگهام، رابطه (۱۴) به صورت زیر بازنویسی می‌شود که در آن پارامترهای ρ, U, D متغیر اصلی هستند:

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\frac{U}{\sqrt{gD}}, \frac{UD}{v}, \frac{y}{D}, \frac{D}{d_{50}}, \sigma_g, \frac{\rho'_s}{\rho}, \frac{U}{U_c}, \frac{L}{D}, \frac{W}{D}, \frac{Ut}{D}, \alpha\right) \quad (15)$$

که در آن؛ $F_p = \frac{U}{\sqrt{gD}}$ ، عدد فرود مربوط به پایه، $R_p = \frac{UD}{v}$ ، عدد رینولدز مربوط به پایه، $\frac{y}{D}$ ، کم عمقی جریان، $\frac{D}{d_{50}}$ ، نسبت درستی یا زبری رسوب، $\Delta = \frac{\rho'_s}{\rho}$ ؛ وزن مخصوص غوطه‌ور رسوب، $\frac{U}{U_c}$ ، شدت جریان، $\frac{L}{D}$ ، نسبت طول به عرض پایه، $\frac{W}{D}$ ، اثرات دیواره جانبی و $\frac{Ut}{D}$ ، مقیاس زمانی توسعه آبشستگی است.

ملاحظات زیر را می‌توان برای حذف اثر گروه‌های بی بعد در رابطه (۱۵) اعمال نمود:

(۱) عدد فرود ثابت بود.

(۲) اگر $R_p > 7000$ باشد، تاثیر ویسکوزیته جریان قابل صرف نظر کردن است (Monti, 1994; Franzetti et al, 1994).

(۳) اگر $y/D \geq 2.5$ باشد، تاثیر عمق جریان بر آبشستگی قابل صرف نظر کردن است (Ettema, 1980; Chiew and Melville, 1987).

(۴) اگر $D/d_{50} > 20-25$ باشد، تاثیر قطر ذرات بر آبشستگی قابل صرف نظر کردن است (Raudkivi and Ettema, 1983).

(۵) اگر $\sigma_g < 1.3$ باشد، تاثیر غیریکنواختی مواد رسوبی بستر بر آبشستگی قابل صرف نظر کردن است (Chiew and Melville, 1987).

(۶) برای شن و ماسه، $\Delta = \rho'_s/\rho$ تقریباً ثابت و برابر $1/65$ است. (۷) اگر $U/U_c \approx 1$ باشد، حداکثر مقدار عمق آبشستگی در شرایط آب زلال به دست می‌آید.

(۸) اگر $W/D \geq 10$ باشد، تاثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی قابل صرف نظر کردن است (Chiew and Melville, 1987).

آزمایش‌ها تحت شرایط آب زلال ($U/U_c \leq 1$) انجام شد. در این مطالعه، U_c به عنوان سرعت برشی بحرانی و U به عنوان سرعت بحرانی جریان تعریف می‌شوند. پارامتر U نیز معرف سرعت متوسط جریان می‌باشد. سرعت بحرانی جریان (U_c) با استفاده از روش تنش برشی بحرانی بستر تعیین شد. با تعیین سرعت بحرانی حرکت ذرات و انتخاب عمق مناسب جریان ($y/D \geq 2.5$)، شدت جریان 0.86 ، عمق جریان $18/8$ cm و دبی 0.05 m³/s به دست آمد. جدول ۱، خلاصه شرایط جریان و گروه‌های بی بعد را نشان می‌دهد.

در تمام آزمایش‌ها عمق آبشستگی در جلوی پایه در فواصل زمانی مختلف تا پایان آزمایش برداشت شد. به دلیل تغییرات سریع اولیه، قرائت‌ها در ساعات نخست با فواصل کوتاه‌تر انجام شد. اندازه‌گیری‌ها با متر مدرج با دقت 0.5 تا 1 میلی‌متر صورت گرفت.

برای دو مدل منتخب (پایه دایره‌ای و مستطیلی با $L/D=2$ و $\alpha=0^\circ$)، توپوگرافی بستر در پایان آزمایش ثبت شد. داده‌ها با عمق سنج نقطه‌ای و نسبت به نقطه مرجع در بستر مسطح اولیه برداشت شدند. به دلیل تقارن در زاویه صفر درجه، داده‌ها فقط برای یک طرف پایه برداشت شدند.

مدل پایه‌ها در خط مرکزی کانال نصب و سطح بستر تسطیح شد. هر آزمایش به مدت ۸ ساعت اجرا و عمق آبشستگی ثبت گردید. در مجموع ۱۳ آزمایش شامل پایه دایره‌ای و پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد با نسبت‌های مختلف L/D و 3 زاویه انحراف انجام شد. خلاصه آزمایش‌ها در جدول ۲، آمده است.

معیارهای ارزیابی

در این مطالعه، برای بررسی تأثیر گروه‌های بی بعد بر عمق آبشستگی از آنالیز ابعادی استفاده شد. برای پایه مستطیلی دماغه‌گرد، رابطه بین عمق آبشستگی (d_s) و پارامترهای مؤثر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_s = f(g, \rho, v, U, y, d_{50}, \sigma_g, \rho'_s, U_c, D, L, W, t, \alpha) \quad (14)$$

که در آن؛ f تابع مجهول، g شتاب گرانشی، ρ چگالی آب، v لزجت سینماتیکی آب، U سرعت متوسط جریان، y عمق جریان، d_{50} اندازه میانه مواد رسوبی بستر، σ_g انحراف معیار هندسی

جدول ۱- شرایط جریان و گروه‌های بی بعد

D (cm)	d ₅₀ (mm)	Q (m ³ /s)	y (cm)	U (m/s)	U _c (m/s)	U* _c (m/s)	U/U _c	D/d ₅₀	W/D	W/y	y/D	σ _g	Fr	Re _p
۳	۰.۷۷	۰.۰۵	۱۸.۸	۰.۲۹۶	۰.۳۴۶	۰.۱۹۲	۰.۸۶	۳۸.۹۶	۳۰	۴.۷۹	۶.۲۷	۱/۰.۶	۰.۲۲	۸۸۳۸

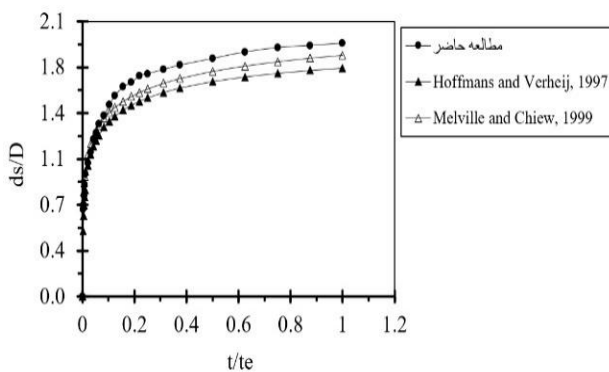
جدول ۲- جزئیات و تنظیمات مربوط به هر آزمایش

تست	پارامترهای هندسی		
	α (°)	L/D	L (cm)
C1	-	۱	۳
R2-0	۰	۲	۶
R2-5	۵	۲	۶
R2-10	۱۰	۲	۶
R2-20	۲۰	۲	۶
R3-0	۰	۳	۹
R3-5	۵	۳	۹
R3-10	۱۰	۳	۹
R3-20	۲۰	۳	۹
R4-0	۰	۴	۱۲
R4-5	۵	۴	۱۲
R4-10	۱۰	۴	۱۲
R4-20	۲۰	۴	۱۲

در حالت بیشینه عمق آبستگي نیز مطابق با جدول ۳، مشخص شد که مقدار عمق آبستگي انتهای آزمایش در این مطالعه، با نتایج به دست آمده از روابط CSU و Melville and Sutherland (1988) همخوانی دارد. بیشتر روابط استفاده شده، مقدار عمق آبستگي را بیشتر از عمق آبستگي مطالعه حاضر تخمین زده‌اند؛ زیرا این روابط به طور معمول بیشینه عمق آبستگي را پیش‌بینی می‌کنند.

تفاوت در نتایج به دست آمده را بیشتر می‌توان به شدت جریان (U/U_c) نسبت داد. (Melville and Chiew (1999) و Park et al. (2016) بیان کردند که تغییرات عمق آبستگي با شدت جریان مرتبط است.

به طور کلی از دو بخش ارائه شده برای اعتبارسنجی نتایج مطالعه حاضر، می‌توان فهمید که نتایج این مطالعه صحیح بوده و می‌توان به آنها اطمینان کرد.



شکل ۵- مقایسه تغییرات عمق آبستگي پایه دایره‌ای مطالعه حاضر با روابط سایر پژوهشگران

جدول ۳- مقایسه نتایج حداکثر عمق آبستگي مطالعه حاضر با سایر پژوهشگران

محققان	d_s (cm)	d_s/D
مطالعه حاضر	۵٫۸	۱٫۹۳
Melville and Sutherland, 1988	۶٫۱۶	۲٫۰۵
CSU معادله	۵٫۹۲	۱٫۹۷

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود ضرایب تجربی روابط فوق برای پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد به صورت زیر اصلاح شوند:

$$K_\alpha = 1.0 + 0.025 \alpha \left(\frac{L}{D}\right)^{0.6} \quad (18)$$

که در محدوده‌ی $5^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ و $2 \leq \frac{L}{D} \leq 4$ ضریب همبستگی $R^2 = 0.94$ را به دست می‌دهد.

با اعمال این فرضیات، رابطه (۱۵) به شکل ساده‌تر در می‌آید:

$$\frac{ds}{D} = f\left(\frac{L}{D}, \frac{Ut}{D}, \alpha\right) \quad (16)$$

و در شرایط تعادل یا نزدیک به تعادل، تغییرات ds نسبت به زمان ناچیز بوده و $\frac{Ut}{D}$ بی‌اثر می‌شود. در نتیجه:

$$\frac{ds}{D} = f\left(\frac{L}{D}, \alpha\right) \quad (17)$$

نتایج و بحث

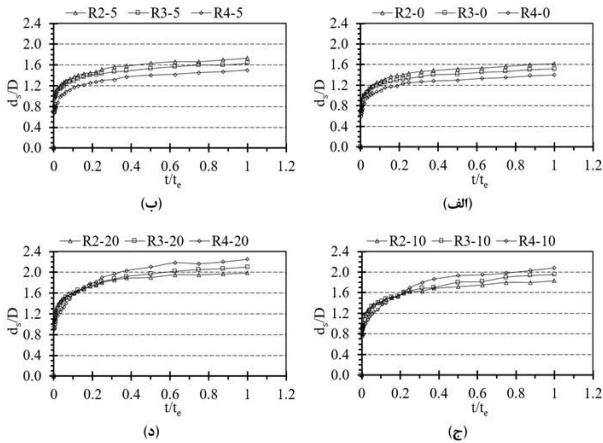
صحت سنجی نتایج با استفاده از پایه استوانه‌ای شاهد

معمولاً آزمایشی به عنوان شاهد روی تک پایه استوانه‌ای انجام می‌شود. آزمایش‌های متعددی توسط محققین مختلف برای پایه استوانه‌ای انجام شده است و روابطی برای محاسبه عمق آبستگي در دو حالت آبستگي با زمان و بیشینه عمق آبستگي توسعه یافته است که برخی از آنها در بخش اول مقاله ارائه شدند. با استفاده از این روابط مقدار عمق آبستگي محاسبه و با عمق آبستگي پایه استوانه‌ای مطالعه حاضر مقایسه شدند تا تاییدی بر صحت آزمایش‌های بعدی این تحقیق باشد.

مقایسه نتایج در حالت آبستگي با زمان در شکل ۵ و مقایسه نتایج در حالت بیشینه عمق آبستگي در جدول ۳ ارائه شده‌اند. توافق خوبی بین نتایج مطالعه حاضر در حالت آبستگي با زمان با روابط Melville and Chiew (1999) و Hoffmans and Verheij (1997) مشاهده شد. در شکل ۵، تغییرات آبستگي در زمان‌های ابتدایی شدید است.

تأثیر نسبت طول به عرض پایه (L/D)

تغییرات عمق بیشینه آبشستگی (d_s) بر حسب نسبت L/D در زوایای مختلف انحراف پایه در شکل ۷ نشان داده شده است. در زوایای کوچکتر از 5° ، افزایش نسبت L/D باعث کاهش عمق آبشستگی شد. این کاهش را می‌توان ناشی از افزایش سطح تماس پایه و توزیع مجدد تنش برشی در وجه بالادست دانست، که سبب کاهش شدت جریان رو به پایین می‌گردد.



شکل ۷- تأثیر افزایش نسبت L/D بر تغییرات زمانی عمق

آبشستگی در زوایای مختلف انحراف پایه از مسیر جریان: الف)

$\alpha=0^\circ$ (ب) $\alpha=5^\circ$ (ج) $\alpha=10^\circ$ و د) $\alpha=20^\circ$

در مقابل، در زوایای بزرگتر از 10° ، روند تغییرات معکوس شد، یعنی با افزایش L/D ، عمق آبشستگی افزایش یافت. در این حالت، طول بیشتر پایه موجب تمرکز جریان در بخش نوک دماغه و افزایش گرداب‌های عرضی در لبه‌ها شد. این رفتار در مطالعات مشابه مانند Fael et al. (2016) و Rostami (2017) نیز مشاهده شده است.

به‌طور میانگین، افزایش نسبت L/D از ۲ به ۴ در زاویه 20° موجب افزایش عمق آبشستگی تا حدود ۳۵ درصد گردید، در حالی که در زاویه 5° همین تغییر سبب کاهش حدود ۲۰ درصدی عمق آبشستگی شد.

تأثیر زاویه انحراف پایه (α)

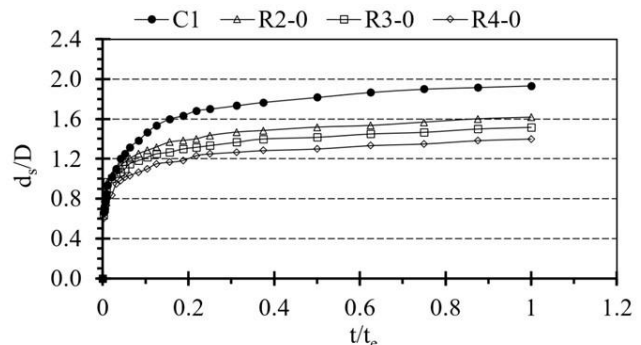
زاویه انحراف پایه از مسیر جریان نقش تعیین‌کننده‌ای در تمرکز جریان و شدت گرداب‌های موضعی دارد. مطابق شکل ۸، با افزایش زاویه انحراف از 5° به 20° ، عمق بیشینه آبشستگی در تمامی نسبت‌های L/D افزایش قابل‌ملاحظه‌ای نشان داد.

به‌منظور ارزیابی اثر هندسی پایه بر میزان و الگوی آبشستگی موضعی، داده‌های حاصل از ۱۳ آزمایش انجام‌شده تحلیل و تفسیر شدند. تمرکز این بخش بر بررسی تغییرات عمق بیشینه آبشستگی و الگوی توپوگرافی بستر در اثر تغییر نسبت طول به عرض پایه (L/D) و زاویه انحراف پایه از مسیر جریان (α) است. ابتدا روند کلی فرایند آبشستگی و نحوه شکل‌گیری گرداب‌ها تشریح می‌شود، سپس تأثیر هر یک از متغیرها به‌صورت جداگانه و در نهایت اثر هم‌زمان آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر تحلیل تجربی، نتایج به‌دست‌آمده با روابط کلاسیک موجود مقایسه و روابط اصلاح‌شده‌ای برای پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد پیشنهاد می‌شود.

روند کلی آبشستگی

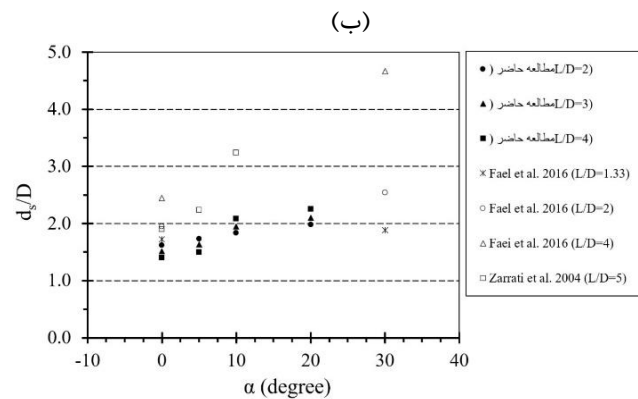
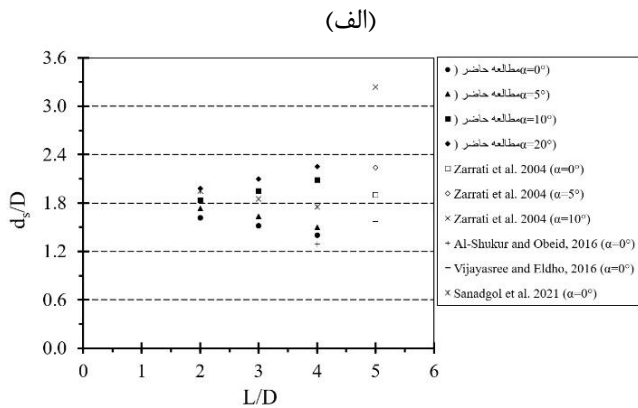
در تمامی آزمایش‌ها، فرایند آبشستگی با تشکیل گرداب نعل‌اسبی در بالادست پایه آغاز شد. این گرداب موجب جدا شدن ذرات از بستر و توسعه تدریجی گودال آبشستگی در طول زمان گردید. با گذشت حدود ۴ تا ۵ ساعت، عمق آبشستگی به مقدار تعادلی خود رسید و تغییرات بعدی ناچیز بود.

الگوی جریان مشاهده‌شده شامل یک جریان قوی رو به پایین در وجه بالادست، ناحیه بازگشتی در پایین‌دست پایه و گرداب‌های برخاستگی بود، که با نتایج Melville and Sutherland (1988)، Zarrati et al. (2004) و Sanadgol et al. (2021) سازگاری دارد. برای نمایش روند زمانی تغییر عمق آبشستگی و مقایسه رفتار دو نوع پایه، شکل ۶ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که بیشترین نرخ تغییر عمق در ساعات اولیه رخ می‌دهد و پس از حدود ۴ تا ۵ ساعت، عمق آبشستگی به مقدار تعادلی نزدیک می‌شود.



شکل ۶- مقایسه روند زمانی تغییرات عمق آبشستگی در پایه

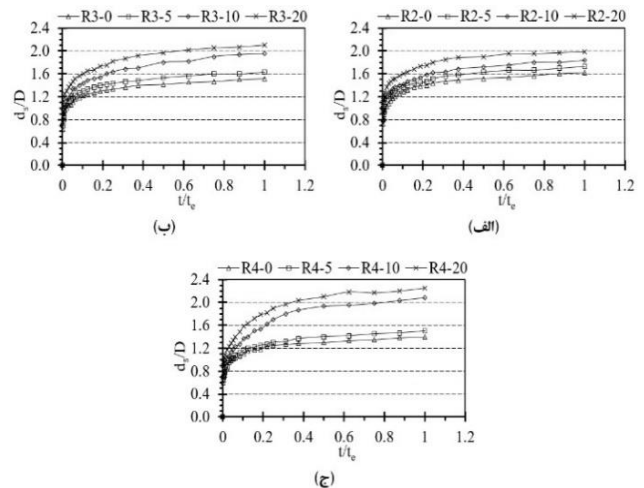
دایره‌ای و مستطیلی دماغه‌گرد



شکل ۹- تاثیر افزایش الف) نسبت L/D و ب) در پایه مستطیلی دماغه‌گرد

تغییرات توپوگرافی بستر

بررسی نقشه‌های توپوگرافی بستر نشان داد که الگوی گودال آبستنگی به‌طور چشمگیری با تغییر زاویه‌ی انحراف پایه و نسبت طول به عرض آن تغییر می‌کند. در زاویه‌های کم‌تر از حدود $10^\circ = \alpha$ ، گودال به‌صورت متقارن و کم‌عمق شکل گرفته و محل بیشترین عمق در مقابل محور مرکزی پایه قرار دارد، در حالی که در زاویه‌های بزرگ‌تر از 20° ، گودال به سمت وجه بالادست پایه متمایل شده و ناحیه‌ی رسوب‌گذاری در پایین‌دست افزایش یافته است. این الگو در شکل ۱۰، به‌صورت خطوط کانتور سطح بستر نمایش داده شده است. در مدل پایه‌ی دایره‌ای (C1) گودال متقارن و عمیق‌تر است، اما در مدل پایه‌ی مستطیلی دماغه‌گرد (R2-0)، با نسبت $L/D = 2$ گودال عریض‌تر شده و عمق موضعی آن کاهش یافته است.



شکل ۸- تاثیر افزایش زاویه انحراف پایه از مسیر جریان (α) بر تغییرات زمانی عمق آبستنگی در نسبت طول به عرض‌های مختلف: الف) $L/D=2$ ب) $L/D=3$ و ج) $L/D=4$

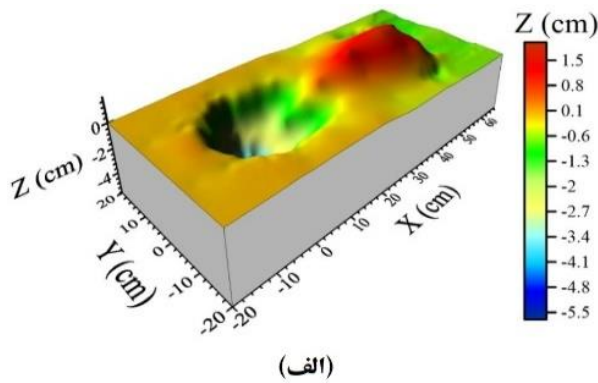
در زاویه‌های کوچک‌تر از 5° ، گرداب نعل‌اسبی به‌صورت متقارن در دو طرف پایه تشکیل شد و مسیر جریان تقریباً پایدار باقی ماند. اما در زاویه‌های بزرگ‌تر از 10° ، گرداب‌های نامتقارن ایجاد شدند و نقطه تمرکز جریان به گوشه بالادست پایه منتقل شد. این امر منجر به افزایش تنش برشی موضعی و تعمیق گودال آبستنگی گردید.

در مقایسه با پایه دایره‌ای، پایه مستطیلی دماغه‌گرد در زوایای کمتر از 5° حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد عمق آبستنگی کمتری نشان داد. با این حال، در زاویه‌های بیشتر از 10° ، تفاوت کاهش یافته و در زاویه 20° حتی عمق آبستنگی پایه مستطیلی از پایه دایره‌ای بیشتر شد.

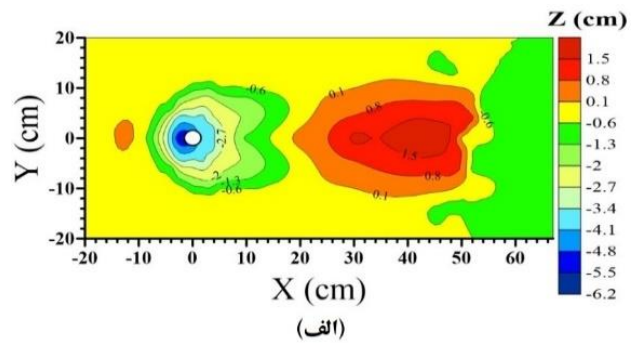
اثر همزمان L/D و α

شکل ۹، نمودار سطحی تغییرات $\frac{d_s}{y}$ بر حسب دو پارامتر L/D و α را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که اثر این دو متغیر غیرخطی و هم‌افزا است، یعنی در مقادیر بزرگ‌تر از آستانه $(L/D > 3 \text{ و } \alpha > 10^\circ)$ ، افزایش همزمان آن‌ها باعث رشد شدید عمق آبستنگی می‌شود.

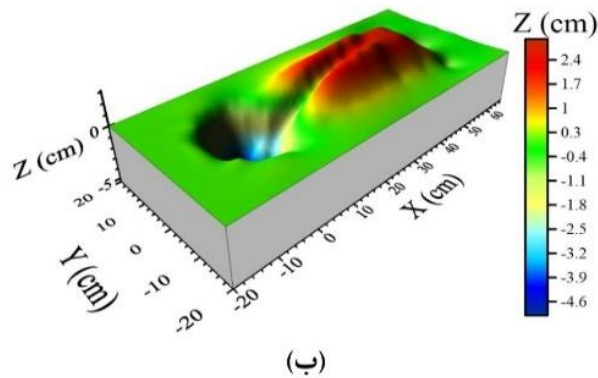
تحلیل رگرسیونی چندمتغیره بین داده‌های آزمایشگاهی و روابط موجود نشان داد که رابطه‌ی پیشنهادی Richardson and Davis (2001) در زاویه‌های کم‌تر از 10° دقت قابل قبولی دارد ($R^2 = 0.92$)، اما در زاویه‌های بالاتر مقدار عمق را تا ۲۵ درصد کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. این انحراف نشان‌دهنده‌ی نیاز به اصلاح ضرایب K_α و K_S برای پایه‌های مستطیلی دماغه‌گرد است.



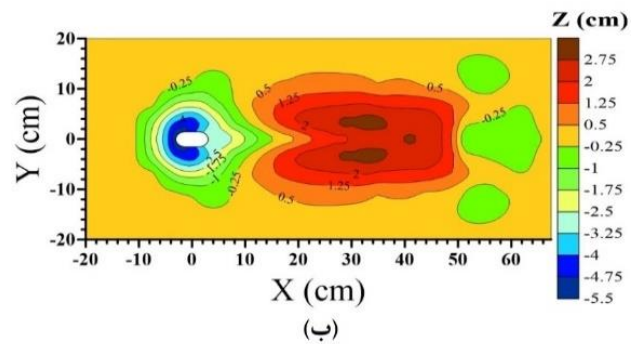
(الف)



(الف)



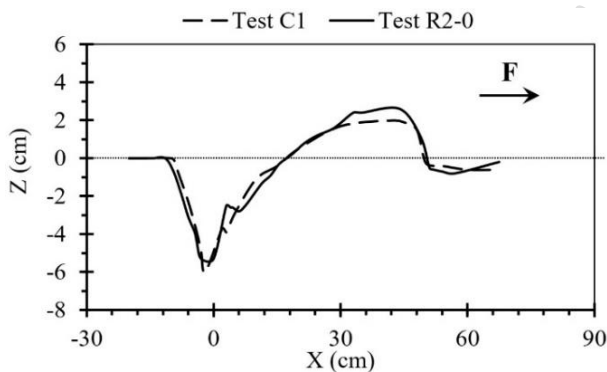
(ب)



(ب)

شکل ۱۰- خطوط کانتور سطح بستر در اطراف پایه: (الف) آزمایش $R2-0$ و (ب) آزمایش CI

شکل ۱۱- نمای سه بعدی توپوگرافی بستر: (الف) آزمایش CI و (ب) آزمایش $R2-0$



شکل ۱۲- تغییرات طولی بستر در محور مرکزی کانال برای دو مدل $R2-0$ و CI

به منظور ارزیابی کمی هندسه‌ی گودال آبستستگی، نتایج استخراج شده از داده‌های توپوگرافی در جدول ۴ ارائه شده‌اند. مطابق این جدول، در مدل مستطیلی دماغه‌گرد ($R2-0$) عمق آبستستگی حدود ۱۶/۳۸ درصد، حجم گودال حدود ۳۷/۵ درصد و سطح گودال حدود ۴۰/۱۳ درصد کمتر از مدل پایه‌ی دایره‌ای (CI) است. این نتایج نشان می‌دهد که شکل دماغه‌ی مستطیلی موجب کاهش تمرکز جریان در جلوی پایه و کاهش میزان فرسایش موضعی می‌شود، هرچند گودال در راستای جریان توسعه‌ی بیشتری پیدا می‌کند.

نمای سه‌بعدی بستر در شکل ۱۱ تفاوت آشکار هندسه‌ی بستر در دو مدل را نشان می‌دهد. در مدل مستطیلی، گودال در بخش‌های انتهایی پایه گسترش یافته و در پایین دست دو تپه‌ی رسوبی مجزا تشکیل شده که در انتها به یکدیگر متصل شده‌اند. این پدیده ناشی از الگوی گرداب‌های برخاستگی و جابجایی محور جریان در پیرامون پایه است. تغییرات طولی و عرضی بستر نیز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ترسیم شده‌اند. شکل ۱۲، نشان می‌دهد که در امتداد محور مرکزی کانال، در مدل مستطیلی دماغه‌گرد، گودال در محدوده‌ی جلوی پایه عریض‌تر و کم‌عمق‌تر است و شیب آن کاهش یافته است؛ در مقابل، ارتفاع تپه‌ی آبستستگی پشت پایه افزایش یافته است. شکل ۱۳ نیز تغییرات عرضی بستر را در سه محور جلوی پایه، مرکز و پشت پایه نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که در محور جلوی پایه، لبه‌ی فوقانی گودال در دو مدل تفاوت زیادی ندارد اما عمق گودال در پایه‌ی مستطیلی کمتر از پایه‌ی دایره‌ای است. علت این امر، توزیع یکنواخت‌تر تنش برشی در طول پایه و کاهش جریان رو به پایین در گوشه‌های دماغه است.

پایه باعث توزیع یکنواخت تر فشار و کاهش شدت جریان رو به پایین در وجه بالادست می گردد.

۳. در زوایای بزرگ تر از 10° ، افزایش $\frac{L}{D}$ اثر معکوس دارد و فرسایش را تشدید می کند. به دلیل تمرکز جریان در دماغه، عمق آبستنگی به طور قابل توجهی افزایش می یابد.

۴. پایه های مستطیلی دماغه گرد در زوایای انحراف کم تر از 5° حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد عمق آبستنگی کمتری نسبت به پایه های دایره ای نشان دادند، اما در زوایای بیش از 10° ، عملکرد آنها از پایه دایره ای ضعیف تر است.

۵. الگوی توپوگرافی بستر نشان داد که افزایش زاویه انحراف موجب نامتقارن شدن گودال آبستنگی و انتقال محل فرسایش به سمت گوشه بالادست پایه می شود.

۶. رابطه ی تجربی اصلاح شده ی پیشنهادی در این پژوهش (رابطه ۱۸) برای پایه های مستطیلی دماغه گرد در محدوده $2 \leq \frac{L}{D} \leq 4$ و $5^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ دقت زیادی در پیش بینی عمق آبستنگی نشان داد ($R^2 = 0.94$).

۷. ترکیب زاویه زیاد و طول زیاد پایه، بیشترین اثر تخریبی را بر بستر دارد. رابطه ی اصلاح شده ی پیشنهادی در این پژوهش پیش بینی دقیق تری از عمق آبستنگی ارائه می دهد.

پیشنهادها

با توجه به نتایج این پژوهش، توصیه های زیر برای طراحی مهندسی و ادامه تحقیقات ارائه می شود:

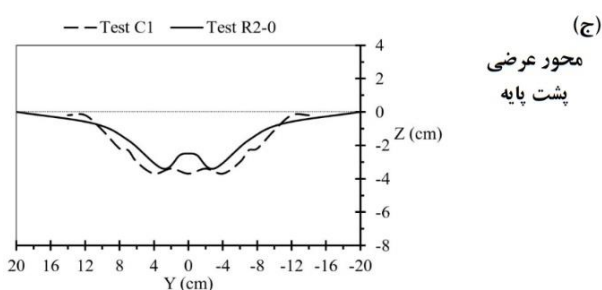
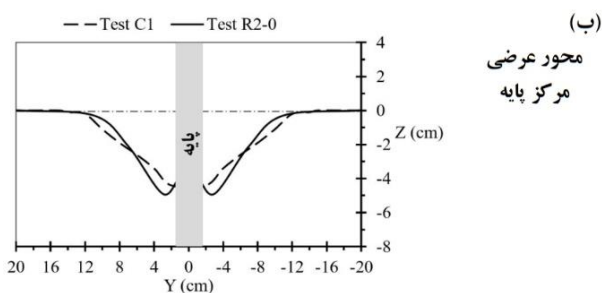
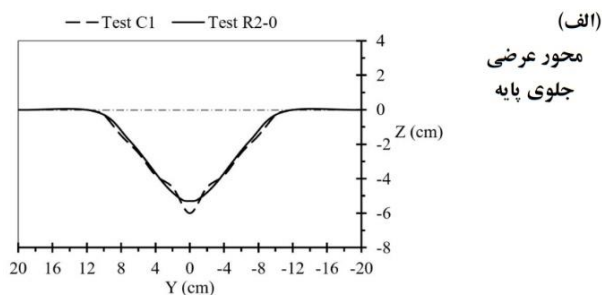
۱. در طراحی پل ها، زاویه انحراف پایه از مسیر جریان تا حد ممکن کمتر از 10° در نظر گرفته شود تا از افزایش موضعی فرسایش جلوگیری شود.

۲. برای پایه های مستطیلی دماغه گرد با نسبت $\frac{L}{D} > 3$ ، لازم است تمهیدات حفاظتی (مانند طوق یا کف بند) در وجه بالادست در نظر گرفته شود.

۳. با وسیع تر کردن دامنه متغیرها و افزایش تعداد آنها، مطالعات تکمیلی در پایه های مستطیلی دماغه گرد انجام شود.

۴. خصوصیات جریان، میدان سرعت و گردابه ها با دقت و کیفیت بالاتری در اطراف پایه های مستطیلی دماغه گرد بررسی شود.

۵. اقدامات حفاظتی آبستنگی برای کنترل و کاهش عمق آبستنگی پایه های مستطیلی دماغه گرد در زوایای مختلف انحراف پایه از مسیر جریان استفاده شده و مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱۳- تغییرات عرضی بستر برای دو مدل $R2-0$ و $C1$ در محور عرضی: الف) جلوی پایه، ب) مرکز پایه و ج) پشت پایه

جدول ۴- تغییرات هندسه گودال آبستنگی در اطراف دو مدل پایه

تست	d_s (cm)	V_o (m^3)	A_r (m^2)	d_s/D	Γ_{de} (%)	Γ_{Vo} (%)	Γ_{Ar} (%)
C1	۵٫۸	۰٫۰۰۱۶	۰٫۲۵۶۴	۱٫۹۳	-	-	-
R2-0	۴٫۸۵	۰٫۰۰۱۰	۰٫۱۵۳۵	۱٫۶۲	۱۶٫۳۸	۳۷٫۵	۴۰٫۱۳

نتیجه گیری

۱. در این پژوهش، تأثیر هم زمان نسبت طول به عرض پایه (L/D) و زاویه انحراف پایه از مسیر جریان (α) بر عمق آبستنگی موضعی در پایه های مستطیلی دماغه گرد به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش ها در شرایط جریان آب زلال و بستر ماسه ای یکنواخت انجام شدند تا اثرات هندسی پایه به صورت مجزا ارزیابی گردد. تحلیل داده ها و مقایسه با روابط تجربی موجود، نتایج زیر را نشان داد:

۲. در زوایای انحراف کوچک تر از 5° نسبت طول به عرض پایه (L/D) موجب کاهش عمق آبستنگی می شود، زیرا افزایش طول

Journal of Hydraulic Engineering, 133(4), pp.399-413. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:4\(399\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:4(399)).

6. Dietz, J.W., 1972. Ausbildung von langen Pfeilern bei schraganströmung am beispiel der BAB-mainbrücke eddersheim. *Mitteilungsblatt der BAW*, 31, pp.79-94.
7. Ettema, R., 1980. *Scour at bridge piers* (Doctoral dissertation, ResearchSpace@ Auckland).
8. Fael, C., Lança, R. and Cardoso, A., 2016. Effect of pier shape and pier alignment on the equilibrium scour depth at single piers. *International Journal of Sediment Research*, 31(3), pp.244-250. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.04.001>.
9. Franzetti, S., Malavasi, S. and Piccinin, C., 1994. Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare. Proc. XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, GNDICI-CNR, P13-24, Perugia, Italy. [In Italian].
10. Garg, V., Setia, B. and Verma, D.V.S., 2008. Combination of scour protection devices around oblong bridge pier. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 14(3), pp.56-68. <https://doi.org/10.1080/09715010.2008.10514922>.
11. Hoffmans, G. J. C. M. and Verheij, H. J., 1997. *Scour Manual*. A. A. Balkema. Rotterdam, Brookfield. 209p.
12. Hosseini Matin, S.M., Bahrami Yarahmadi, M., Ghomeshi, M. and Shafai Bejestan, M., 2024. Experimental study of the effect of transverse distance between the rectangular piers on local scour around them. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(2), pp.43-58. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10621.1123>.
13. Hosseini-Matin, S. M., Bahrami-Yarahmadi, M., Ghomeshi, M. and Shafaei-Bejestan, M., 2024. Experimental study of the effect of transverse distance between the rectangular piers on local scour around them. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(2), 43-58. [In Persian].
14. Javidi Vahdati, V., Yaghoobi, S., Torabipour, A., Correia, J.A., Fazeris-Ferradosa, T. and Taveira-Pinto, F., 2020. Combined solutions to reduce scour around complex foundations: An experimental study. *Marine Systems & Ocean Technology*, 15(1), pp.81-93. <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00068-x>.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان و با حمایت گروه مهندسی آب انجام شد که بدینوسیله نویسندگان از همکاری آنها تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

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

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها و نگارش مقاله
نویسنده دوم: طراحی و مدیریت اجرای تمام مراحل پروژه، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله و کنترل نتایج

اصول اخلاقی

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

منابع

1. Brice, J.C. and Blodgett, J.C., 1979. *Countermeasures for Hydraulic Problems at Bridges*. Department of Transportation, Federal Highway Administration, U.S. Offices of Research and Development, Washington, DC. 187p.
2. Chiew, Y.M. and Melville, B.W., 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 25(1), pp.15-26. <https://doi.org/10.1080/00221688709499285>.
3. Chiew, Y.M., 1984. *Local scour at bridge piers* (Doctoral dissertation, ResearchSpace @ Auckland).
4. Dargahi, B., 1990. Controlling mechanism of local scouring. *Journal of hydraulic engineering*, 116(10), pp.1197-1214. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:10\(1197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:10(1197)).
5. Dey, S. and Raikar, R.V., 2007. Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers.

- at sacrificial piles on bridge pier scour: I. Experimental results. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), pp.1546-1551. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0207-5>.
25. Pourghasemzadeh, B. and Ghomeshi, M., 2022. Experimental investigation of the angle effect of the cylindrical bridge group piers relative to the flow direction on the maximum scour depth of the piers. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), pp.131-145. [In Persian]. <https://doi.org/10.22055/JISE.2017.19147.1379>.
 26. 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)).
 27. Richardson, E.V. and Davis, S.R., 2001. Evaluating scour at bridges. 4th Ed. Publication No. FHWA-NHI-01-001, HEC-18, *Federal Highway Administration*, Washington, D.C. 387p.
 28. Richardson, E.V., Simons, D.B., Karaki, S., Stevens, M.A. and Mahmood, K., 1975. Highways in the river environment, hydraulic and environmental design considerations: training and design manual. U.S. Department of Transportation, *Federal Highway Administration*, Washington, D.C. 453p.
 29. Rostami, H., 2017. Investigation of the effect of length-to-width ratio of round-nosed rectangular bridge piers on the performance of cable in controlling local scour. *M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture*, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. [In Persian].
 30. Safaripour, N., Vaghefi, M. and Mahmoudi, A., 2024. The influence of the submergence ratio of submerged vanes on the slope of the hole around the pier groups in a sharp bend. *Journal of Hydraulic Structures*, 10(3), pp.90-118. <https://doi.org/10.22055/jhs.2024.46967.1300>.
 31. Sanadgol, E. 2022. Three-dimensional analysis of coherent turbulent flow structure around a single round-nosed rectangular pier with and without protection measures. Ph.D Thesis. Faculty of Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch. [In Persian].
 32. Sanadgol, E., Heidarpour, M. and Mohammadpour, R., 2021. Reduction of local scouring at round-nosed rectangular piers using a downstream bed sill. *Journal of the South African Institution of Civil*
 15. Khilaj, M., Nohani, E. and Afrous, A., 2023. Experimental Investigation of the Effect of Sills on the Hole of Local Scour Around the Bridge Pier with Different Geometric Shapes. *Water Resources*, 16(56), pp.69-78. <https://doi.org/10.30495/wej.2023.28918.2337>.
 16. Kothiyari, U.C., Garde, R.C.J. and Ranga Raju, K.G., 1992. Temporal variation of scour around circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8), pp.1091-1106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:8\(1091\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:8(1091)).
 17. Laursen, E.M. and Toch, A., 1956. *Scour around bridge piers and abutments* (No. Bulletin No. 4).
 18. Mashahir, M.B., Zarrati, A.R. and Mokallaf, E., 2010. Application of riprap and collar to prevent scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(3), pp.183-187. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000145).
 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:1\(59\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59)).
 20. Melville, B.W. and Coleman, S.E., 2000. Bridge scour. *Water Resources Publication*, LLC, University of Auckland, Auckland, New Zealand. 550p.
 21. Melville, B.W. and Sutherland, A.J., 1988. Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), pp.1210-1226. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:10\(1210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210)).
 22. Moghanloo, M., Vaghefi, M. and Ghodsian, M., 2020. Experimental investigation on the effect of increasing the collar thickness on the flow pattern around the oblong pier in 180 sharp bend with balanced bed. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(1), pp. 245-260. <https://doi.org/10.29252/jafm.13.01.30164>.
 23. Monti, R., 1994. Indagine sperimentale delle caratteristiche fluidodinamiche del campo di moto intorno ad una pila circolare. Tesi di Dottorato di Ricerca, *Polytechnic of Milan, Milan, Italy*, [in Italian].
 24. Park, J.H., Sok, C., Park, C.K. and Do Kim, Y., 2016. A study on the effects of debris accumulation

Engineering, 63(3), pp.62-70.
<http://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2021/v63n3a6>.

33. Shen, H.W., Schneider, V.R. and Karaki, S., 1969. Local scour around bridge piers. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(6), pp.1919-1940.
<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002197>.
34. Van-Ballegooy, S. 2005. Bridge abutment scour countermeasures (Doctoral dissertation, ResearchSpace@ Auckland).
35. Zarrati, A.R., Gholami, H. and Mashahir, M.B., 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 42(1), pp.97-103.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641188>.
36. Zarrati, A.R., Nazariha, M. and Mashahir, M.B., 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2), pp.154-162.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:2\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:2(154)).

نسخه پیش نویس