

# The Effect of the Slot in Reducing Scour of Bridge Pier in Uniform and Non-Uniform Sediment Beds


Milad Kazemian<sup>1</sup>, Saeed Gohari<sup>2\*</sup>, Kazem Shahverdi<sup>3</sup>

1- M.Sc student, Dep. of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

2- Assistant Professor, Dep. of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

3- Assistant Professor, Dep. of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

\* [s.gohari@basu.ac.ir](mailto:s.gohari@basu.ac.ir)

Received: 10 May 2021, Accepted: 3 September 2021  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Bridge scour is one of the most important challenges in the river engineering. Every year, thousands of bridges around the world are destroyed due to scouring. Hence, the accurate prediction of maximum scour depth for saving financial resources and the safety of human lives is of paramount importance. One way to reduce scouring is to use slot at the pier of the bridge. Research on the effect of the slots, in reducing scour around the bridge pier, has been done bed sediments of uniform type and in most cases Constant flow depth is considered. The aim of the present study is to examine the effect of sediment non-uniformity in the presence or absence of slots in the bridge pier and the relative effect of increasing the depth of flow (with increasing flow rate) on the scour depth around the cylindrical pier.

**Methodology:** The present experiments have been conducted in hydraulic laboratory at Bu-Ali Sina University, Hamadan (Iran). The pier model with a diameter of 4 cm was put inside a rectangular flume with dimensions of 0.5 m wide, 10.5 m long and 0.5 m height. Three different types of slots were used along with the pier without slot. In order to obtain the effect of sediments on scour depth, two types of bed were used. The bed of the first and second types respectively had uniform and non-uniform sediments. In this experiment, flow rates of 8, 10 and 12 l/s were used with corresponding flow depths of 5.7, 6.6 and 7.4 cm, respectively, Melville and Chiew (1999) chose a time as equilibrium after which scour depth changes of less than 0.5% of the pier diameter over a 24-hour period. According to this criterion, the time of all experiments was considered to be 6 hours.

**Results and Discussion:** The percentage of scour depth reduction varies according to the height of the slot and its location. Comparison of S1 and S2 models for two slot models in the same dimensions showed that the closer the slot is to the bed, the greater its effect in reducing scour depth. Moreover, increasing the height of the slot under the bed (S3 compared to S2) is more effective in reducing the scour depth. Comparison of the first and second beds showed that by converting uniform to non-uniform sediments under constant particle diameter conditions, the maximum scour depth in models S0, S1, S2 and S3 at a flow rate of 8 l/s was 76, 78, 76 and 79%, is respectively reduced. The reason for this can be the formation and expansion of a layer of coarse particles on the bed surface (armor layer). As the flow rate increases due to the increase in flow depth, the scour dimensions increased. According to the obtained results, the scour hole in the non-uniform bed reaches equilibrium with less time than the uniform bed. The formation of an armor layer in a non-uniform bed is the reason for less equilibrium time in similar conditions than in a uniform bed. With increasing the Froude number of Flow in all base models, the depth and dimensions of the scour hole have increased. Increasing the Froude number makes the downflow current stronger, and as a result, horseshoe vortices are formed and act with less time. In

clear water conditions, the maximum scouring depth will occur in the state  $u/u_c=1$  (Melville and Chiew, 1999). The results showed that with increasing the ratio  $u/u_c$  of clear water scouring conditions, scouring depth increases in a variety of models and beds. According to Guo (2012) if the ratio of flow depth to pier diameter is less than 6. By increasing this ratio, the scour depth in uniform and non-uniform sediments increases.

**Conclusion:** The results of this research showed that the use of slots in cylindrical bridge pier was more effective in reducing scouring than the use of bridge piers. With the conversion of uniform to non-uniform bed due to the formation of the armor layer, the scour depth has decreased by an average of 77% in different base models and also the time to reach the scour equilibrium has been reduced. Scour depth has increased with increasing flow rate, Froude number and ratio  $u/u_c$  in different pier and bed models. In general, the closer the slot is to the bed, the more it reduces the scouring depth and the non-uniformity of sediments due to the formation of an armor layer around the pier causes a significant reduction in scouring depth.

**Keywords:** Scour, Bridge Pier, Geometric standard deviation, Slot near the bed, Slot near the Surface of the water



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# تأثیر شکاف در کاهش آبستگی پایه پل در بستر با رسوب‌های یکنواخت و نایکنواخت

میلاذ کاظمیان<sup>۱</sup>، سعید گوهری<sup>۲\*</sup>، کاظم شاهوردی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\* S.gohari@basu.ac.ir\*

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده** - آبستگی از مهم‌ترین عامل‌های تخریب پایه‌ی پل‌هاست. یکی از راه‌های کاهش و مهار آبستگی، استفاده از شکاف در پایه‌ی پل است. با توجه به اینکه رسوب‌های رودخانه‌ها از مصالح طبیعی (رسوبات نایکنواخت) می‌باشد بررسی تأثیر و کارکرد شکاف در رسوب‌های نایکنواخت دارای اهمیت است. در این پژوهش آزمایشگاهی، سه سرعت نسبی ۰/۸۳، ۰/۸۷ و ۰/۹۲ و سه مدل شکاف، به همراه پایه بدون شکاف به عنوان پایه شاهد، در رسوب‌های یکنواخت و نایکنواخت با اندازه متوسط یک میلی‌متر و انحراف معیار هندسی به ترتیب ۱/۳ و ۲ بررسی شد. نتایج نشان داد با تبدیل رسوبات یکنواخت به نایکنواخت تا ۷۷ درصد از عمق آبستگی در مدل‌های مختلف پایه کاسته می‌شود. برای دو نوع شکاف با ابعاد یکسان، شکاف هم‌تراز با بستر تأثیر بیشتری نسبت به شکاف نزدیک به سطح آب دارد. افزایش ارتفاع شکاف هم‌تراز با بستر به اندازه ۱/۵۵ برابر قطر پایه (بیشینه عمق آبستگی در سرعت نسبی ۰/۹۲ برای پایه شاهد در رسوب‌های یکنواخت) در زیر بستر در رسوبات یکنواخت و نایکنواخت، منجر به کاهش عمق آبستگی به طور میانگین به ترتیب ۴۷ و ۴۳ درصد نسبت به پایه شاهد می‌شود. با افزایش سرعت نسبی و عدد فرود جریان، عمق آبستگی در مدل‌های مختلف پایه و بستر افزایش یافته است.

**کلیدواژگان:** آبستگی، پایه پل، انحراف معیار هندسی، شکاف هم‌تراز با بستر، شکاف نزدیک به سطح آب

## ۱- مقدمه

روش‌های حفاظتی و روش‌های اصلاح‌کننده جریان، تقسیم می‌شوند. در روش اول، مقاومت بستر در مقابل نیروهای محرک با سنگ‌چین و لایه‌های حفاظت بتنی، افزایش می‌یابد. در روش دوم، با استفاده از شمع کوبی و شکاف الگوی جریان در پیرامون پایه تغییر و از قدرت جریان رو به پایین و سامانه‌های گردابی کاسته می‌شود (Mashahir et al., 2008). یکی از راه‌های تغییر الگوی جریان که با تضعیف گرداب‌های پیرامون سازه باعث کاهش آبستگی می‌شود، استفاده از شکاف است. Chiew (1992) تأثیر شیارهای پایه‌ها را در کاهش عمق آبستگی موضعی در پایه‌های پل دایره‌ای در رسوب‌های یکنواخت بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از شکاف‌های مستطیل شکل به طول‌های مختلف

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند و به عنوان کلید راه‌های ارتباطی از اهمیت زیادی دارند. یکی از مهم‌ترین و موثرترین عامل‌های تخریب پایه‌ی پل‌ها آبستگی پیرامون پایه‌ی پل می‌باشد. بنابر بررسی‌های سازمان فدرال ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۳، ۲۵ درصد شکست پل‌ها به دلیل آبستگی پایه‌های آن بوده است (Richardson et al., 1993). برخورد جریان به پایه‌ی پل باعث ایجاد جریان‌های گردابی شده و جدایی جریان از پایه باعث بوجود آمدن گردابه‌ای موسوم به گرداب نعل اسبی می‌شود. روش‌های کاهش آبستگی به دو دسته‌ی اصلی، شامل

کردند. نتایج آنان نشان داد با افزایش تراز قرارگیری شکاف از بستر، عمق آبشستگی بالادست پایه‌ها افزایش می‌یابد. Nekhadian and Hamidifar (2020) تأثیر با هم شکاف و جسم شناور بر آبشستگی پیرامون پایه پل را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که هر چند استفاده از شکاف می‌تواند به تنهایی باعث کاهش ۲۰ درصد عمق آبشستگی شود اما تجمع اجسام شناور این میزان را تا ۱۵ درصد کاهش می‌دهد. در تحقیق Sehat and Kamandast (2020)، اثرگذاری‌های شکاف‌های همگرا و واگرا در تکیه‌گاه‌های پل بررسی شد. نتایج نشان داد شکاف‌های همگرا تا ۵۰ درصد و شکاف‌های واگرا تا ۳۴ درصد می‌تواند در کاهش آبشستگی موثر باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه‌ی تحقیقات انجام شده در مورد تأثیر شکاف در کاهش آبشستگی پیرامون پایه‌ی پل، رسوب‌های بستر از نوع یکنواخت و در بیشتر موارد عمق جریان به عنوان یک عامل ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین هدف از این پژوهش، (۱) بررسی تأثیر نایکنواختی رسوب‌ها بر کاهش عمق آبشستگی با وجود شکاف در پایه‌ی پل استوانه‌ای، (۲) بررسی تأثیر جابه‌جایی و افزایش ارتفاع شکاف با توجه به تشکیل لایه‌ی سپر در این نوع از رسوب‌ها و (۳) بررسی تأثیر نسبی افزایش عمق جریان (با افزایش دبی جریان) بر عمق آبشستگی و زمان رسیدن به تعادل گودال آبشستگی، در صورت وجود شکاف در رسوب‌های یکنواخت و نایکنواخت است که برای اولین بار است که انجام می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- فلوم آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه بوعلی‌سینا همدان انجام گرفته‌است. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰/۵، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر انجام گرفت. دیواره فلوم از جنس شیشه با کف پلی‌گلاس و شیب آن ۰/۰۰۱ بود.

محل قرارگیری پایه، یک صفحه‌ی پلاستیکی از جنس تفلون به ضخامت ۰/۰۲، عرض ۰/۵ و طول ۱/۰۶ متر بود که در بالادست و پایین‌دست آن دو سکو به ارتفاع ۰/۱۲، عرض ۰/۵ و طول یک متر قرار داشتند. شکل ۱ نگاره‌ای از

و اندازه‌های بازشونده در دو شرایط مختلف، یعنی در سطح آب و نزدیک به بستر آبراهه، آزمایش را انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که با ایجاد شکاف به عرض ۰/۲۵ قطر پایه و ارتفاع دو برابر قطر پایه می‌توان عمق آبشستگی را در منطقه‌های نزدیک به بستر و نزدیک به سطح به ترتیب ۲۰ و ۵ درصد کاهش داد. Kumar et al. (1999) آزمایشی را با استفاده از شکاف‌هایی به عرض ۰/۲۵ قطر پایه در ارتفاع-های مختلف به اندازه‌ی عمق جریان، و عمق جریان به اضافه‌ی عمق آبشستگی در پایه‌ی میانی انجام دادند. نتایج آزمایش آنان نشان داد که اگر ارتفاع شکاف تا سطح بستر افزایش یابد ۱۸ درصد و اگر در زیر بستر گسترش یابد، آبشستگی می‌تواند ۳۳ درصد کاهش یابد.

Monocad et al. (2009) تأثیر شیارها و طوق‌ها را بررسی کردند، نتایج نشان داد که در صورت استفاده همزمان از شکاف و طوق با افزایش ارتفاع شکاف، آبشستگی از ۵۵ درصد به ۹۶ درصد کاهش می‌یابد. El-ghorab (2013) ۳۳۶ آزمایش را در سه پایه پل مدور، مستطیل و مربع انجام داد و اثرات بازشدگی شکاف را در آغاز جلوی پل‌ها و پس از آن دو طرف جانبی پایه‌ها در کاهش آبشستگی بررسی کرد. در این آزمایش‌ها قطر باز شدگی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد قطر پایه و فاصله بین بازشدگی‌ها تا بستر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر قطر یا طول پایه بودند. نتایج نشان داد که استفاده از این روش باعث کاهش ۴۵ و ۶۴ درصد به ترتیب در عمق آبشستگی و میزان رسوب‌های فرسایش یافته می‌شود.

Osroush et al. (2019) اثرگذاری‌های ارتفاع و موقعیت عمودی شکاف تکیه‌گاه پایه پل مستطیلی را در کاهش سطح عمق گودال آبشستگی بررسی کردند. آنان ۲۵ آزمایش را در شرایط آب زلال و رسوب‌های یکنواخت انجام دادند، نتایج این بررسی نشان داد که هر چه شکاف به بستر نزدیک‌تر شود، باعث کاهش بیشتر عمق آبشستگی در مدل‌هایی با ابعاد و ارتفاع یکسان شکاف می‌شود. Ardalani et al. (2019) تأثیر گسترده شکاف بر آبشستگی پیرامون پایه مستطیلی را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که بیشینه‌ی عمق آبشستگی با گستره شکاف رابطه‌ی عکس دارد. Heidaribani et al. (2019) تأثیر استفاده از شکاف در پایه پل مستطیلی در جهت کنترل آبشستگی را بررسی

که در آن  $\frac{h}{b}$  عدد بی بعد تراز قرارگیری شکاف از بستر و عدد بی بعد گستره شکاف است.

### ۳-۲- مدل‌های پایه و شکاف

پایه‌های استفاده شده در این پژوهش به شکل استوانه و از جنس تفلون گزینش شد. برای اطمینان از نبود تاثیر دیواره باید  $b < 0.12B$  (Melville and Sutherland.,1988). با توجه به این معیار قطر پایه‌ها ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد ( $B$  عرض فلوم و  $b$  قطر پایه می باشد). در این آزمایش از چهار نوع پایه  $S_0, S_1, S_2$  و  $S_3$  استفاده شد. پایه  $S_0$  بدون شکاف است و به عنوان پایه شاهد در نظر گرفته شده است، پایه  $S_1$  دارای شکاف به ارتفاع  $b$  (قطر پایه) می‌باشد که محل قرارگیری ابتدای آن به اندازه  $b$  از کف بستر بالاتر است. پایه  $S_2$  دارای ابعاد شکاف یکسان با  $S_1$  ولی محل قرارگیری ابتدای آن هم تراز با بستر است و پایه  $S_3$  دارای شکاف به ارتفاع  $b$  از کف بستر به علاوه  $1/5b$  (بیشینه عمق آبستنگی پایه شاهد در سرعت نسبی  $0.92$ ) در زیر بستر است. عرض همه‌ی شکاف‌ها  $\frac{b}{4}$  در نظر گرفته شد. شکل ۲ نگره‌ای از پایه و فراسنجه‌های مختلف شکاف و شکل ۳ مدل‌های پایه را در آزمایشگاه نمایش می‌دهد.

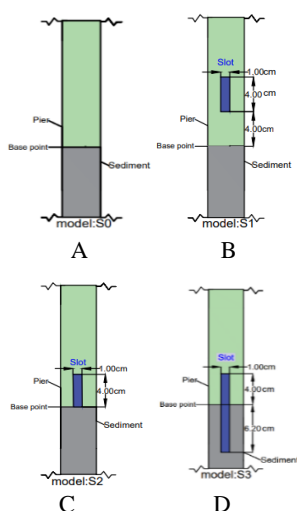


Fig.2 The illustration of pier and various parameters in pier models  $S_0$  (A),  $S_1$  (B),  $S_2$  (C) and  $S_3$  (D)

شکل ۲ نگره پایه و فراسنجه‌های مختلف شکاف در پایه‌های

(D)  $S_3$  و (C)  $S_2$ ، (B)  $S_1$ ، (A)  $S_0$

شمای کلی آبراهه و محل انجام آزمایش‌ها را نمایش می‌دهند.

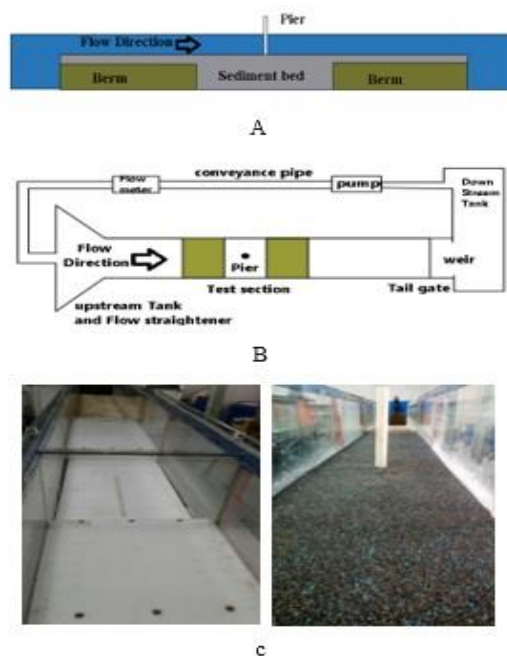


Fig.1 Longitudinal section (A), Flume schematic (B) and Sediment bed region (C)

شکل ۱ مقطع طولی (A)، نمای کلی فلوم (B) و منطقه بستر رسوبی (C)

### ۲-۲- تحلیل ابعادی

Lança et al. (2013) نشان داد که عمق آبستنگی پیرامون تک پایه دایره‌ای در زمان  $t$ ، در یک کانال مستطیلی و در شرایط آب زلال به فراسنجه‌های بی بعد عنوان شده در رابطه ۱ وابسته است. در این رابطه،  $d_s$  عمق آبستنگی،  $b$  قطر پایه،  $u$  سرعت میانگین جریان در بالادست پایه،  $u_c$  سرعت آستانه حرکت رسوب‌های،  $d_{50}$  قطر میانه ذرات رسوب،  $y$  عمق جریان در بالادست پایه،  $\sigma_g$  انحراف معیار هندسی ذرات و  $\theta$  زاویه قرارگیری پایه نسبت به امتداد جریان است.

$$\frac{d_s}{b} = \varphi\left(\frac{y}{b}; \frac{u}{u_c}; \frac{b}{d_{50}}; \frac{ut}{b}; \sigma_g; \theta\right) \quad (1)$$

با توجه به وجود شکاف در پایه‌ی پل و با در نظر گرفتن  $\theta = 0$  رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید.

$$\frac{d_s}{b} = \varphi\left(\frac{y}{b}; \frac{u}{u_c}; \frac{b}{d_{50}}; \frac{h}{b}; \sigma_g; \frac{A}{b^2}\right) \quad (2)$$

این صورت نایکنواخت به شمار می‌آیند. در این پژوهش از رسوب‌های با انحراف معیار هندسی در حدود ۱/۳ و ۲ به ترتیب در بستر اول و دوم استفاده شد. جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی بسترهای مورد استفاده نشان داده شده و شکل ۴ نمودار دانه‌بندی مربوط به بستر یکنواخت و نایکنواخت رسم شده است. محور افقی اندازه ذره و محور عمودی درصد عبوری را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ ویژگی‌های رسوب‌های مورد استفاده در تحقیق

Bed Configuration	$D_{16}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{84}$ (mm)	$\sigma_g$ (mm)
Configuration 1	0.77	0.98	1.38	1.33
Configuration 2	0.62	0.97	2.81	2.12

Table 1 Sediment characteristics used in the present study

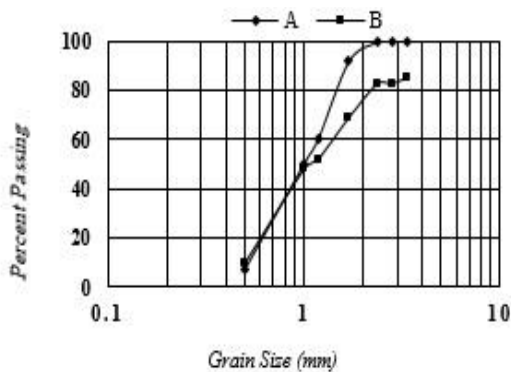


Fig.4 Sieve curve for uniform Sediment(A) & non-uniform (B)

شکل ۴ نمودار دانه‌بندی برای رسوب‌های یکنواخت (A) و نایکنواخت (B)

#### ۵-۲- سرعت نسبی و عمق جریان

آبشستگی از نظر وضعیت حمل رسوب به دو دسته‌ی آبشستگی درحالت آب زلال (سرعت جریان کمتر از سرعت آستانه حرکت رسوبات) و آبشستگی در حالت بستر زنده (سرعت جریان بیشتر از سرعت آستانه حرکت رسوبات) تقسیم می‌شود. Melville (1997) برای تعیین سرعت برشی بحرانی برای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز رابطه‌های زیر را ارائه نمود که برآورد خوبی برای منحنی شیلدز است.

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (4)$$

$$0.1\text{mm} < d_{50} < 1\text{mm}$$

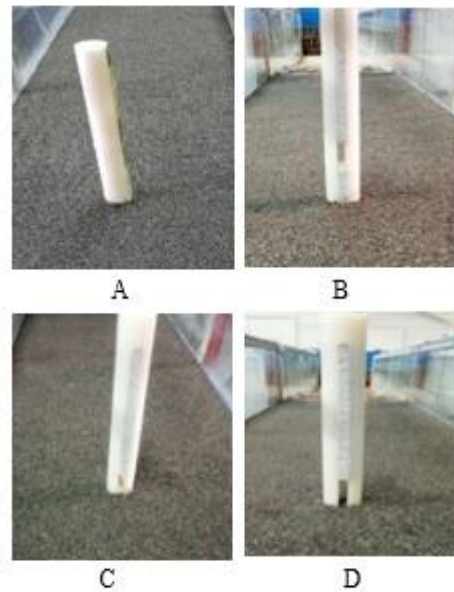


Fig.3 pier models  $S_0$  (A),  $S_1$  (B),  $S_2$  (c) and  $S_3$  (D) in laboratory

شکل ۳ مدل‌های پایه  $S_0$  (A)،  $S_1$  (B)،  $S_2$  (C) و  $S_3$  (D) در آزمایشگاه

#### ۴-۲- بستر جریان

به منظور به دست آوردن تأثیر رسوب‌ها بر عمق آبشستگی از دو نوع بستر استفاده شد. بستر نوع اول، رسوبات یکنواخت و نوع دوم رسوب‌های نایکنواخت انتخاب شد. رسوب‌های بستر از نوع درشت‌دانه و از جنس شن و ماسه در نظر گرفته شدند. همچنین رسوب‌ها پیش از انجام آزمایش‌ها شسته شده‌اند. طبق نظر Breusers and Raudkivi (1991) برای جلوگیری از تشکیل رپیل در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، باید قطر میانگین بزرگتر از ۰/۷ میلی‌متر ( $D_{50} \geq 0.7\text{mm}$ ) باشد. با توجه به شرط ذکر شده از رسوب‌های با قطر متوسط در حدود ۱ میلی‌متر در هر دو نوع بستر استفاده شد. انحراف معیار هندسی رسوبات بستر معیاری است که به وسیله آن نایکنواختی رسوب‌ها مشخص می‌گردد و به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود.

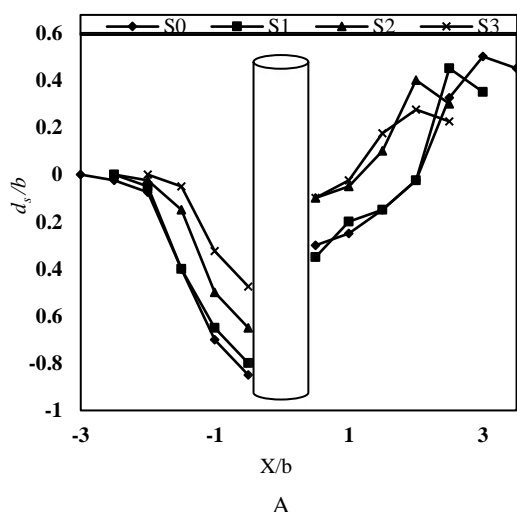
$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (3)$$

$d_{16}$  و  $d_{84}$  به ترتیب اندازه ذراتی هستند که ۱۶ و ۸۴ درصد ذرات از آن کوچک‌ترند. بنا بر نظر Chiew (1987) and Melville اگر  $\sigma_g < 1/4$  رسوب‌های یکنواخت و در غیر

تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی کمتر از ۲ میلی‌متر (با در نظر گرفتن قطر پایه ۴ سانتی‌متر) در مدت زمان ۲۴ ساعت می‌باشد. با توجه به این معیار زمان انجام همه‌ی آزمایش‌ها ۶ ساعت در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی در ساعت‌های اولیه زیاد است، در ساعت اول هر ۵ دقیقه یک بار، در ساعت دوم هر ۱۰ دقیقه و از ساعت سوم به بعد هر ۳۰ دقیقه عمق آبشستگی اندازه‌گیری شد.

### ۳- نتایج و بحث

در این بررسی ۲۴ آزمایش در قالب ۴ پایه‌ی پل، دو نوع بستر رسوبی و سه سرعت نسبی متفاوت انجام شد. در این بخش تاثیر شکاف‌های مختلف، انحراف معیار هندسی، دبی و عدد فرود جریان بر میزان آبشستگی بررسی می‌شود. درصد کاهش عمق آبشستگی با توجه به ارتفاع شکاف و موقعیت قرارگیری آن متفاوت است. عمق آبشستگی در سرعت نسبی ۰/۸۳ برای مدل‌های S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب در حدود ۵، ۲۳ و ۴۴ درصد در بستر یکنواخت و ۱۲، ۲۵ و ۵۰ درصد در رسوب‌های نایکنواخت نسبت به مدل شاهد (S<sub>0</sub>) کاهش یافته است. شکل ۵ رخنمای طولی عمق آبشستگی در مدل‌های مختلف پایه در سرعت نسبی ۰/۸۳ را نمایش می‌دهد. محور افقی نسبت طول به عمق پایه و محور عمودی عمق آبشستگی به قطر پایه را نمایش می‌دهد. و شکل ۵ پستی و بلندی سه بعدی خروجی از نرم افزار سورفر برای پایه شاهد در سرعت نسبی ۰/۸۳ را نمایش می‌دهد.



$$u_{*c} = 0.03D_{50}^{0.5} - 0.0065D_{50}^{-1} \quad (5)$$

$$1mm < d_{50} < 100mm$$

همچنین برای سرعت بحرانی از رابطه‌ی زیر (توزیع لگاریتمی سرعت) استفاده کرد.

$$\frac{u_c}{u_{*c}} = 5.75 \log(5.53y / d_{50}) \quad (6)$$

که  $u_{*c}$  سرعت برشی بحرانی،  $u_c$  سرعت بحرانی،  $d_{50}$  قطر میانگین رسوب و  $y$  عمق جریان می‌باشد. در این آزمایش برای به‌دست آوردن سرعت بحرانی از روابط‌های یاد شده استفاده و سرعت‌های نسبی ۰/۸۳، ۰/۸۷ و ۰/۹۲ به کار گرفته شد. با توجه به شرایط آستانه حرکت رسوب‌ها بدون حضور پایه پل، در نظر گرفتن آزمایش در حالت آب زلال و همچنین بررسی تاثیر گذاری نسبی عمق جریان بر میزان آبشستگی از عمق‌های به ترتیب ۵/۷، ۶/۶ و ۷/۴ سانتی‌متر متناظر با سرعت‌های نسبی یاد شده استفاده شد. ویژگی‌های هیدرولیکی مورد استفاده در هر دو بستر در جدول ۲ ارائه شده است که در آن  $Q$  عمق جریان،  $y$  عمق جریان،  $u$  سرعت جریان،  $u_c$  سرعت بحرانی و  $F_r$  عدد فرود جریان است.

جدول ۲ ویژگی‌های هیدرولیکی جریان

Table 1 Hydraulic Characteristic of the flow

Number	Q (l/s)	y (cm)	u (m/s)	u <sub>c</sub> (m/s)	u/u <sub>c</sub>	F <sub>r</sub>
1	8	5.7	0.280	0.337	0.830	0.374
2	10	6.6	0.303	0.346	0.875	0.376
3	12	7.4	0.324	0.352	0.920	0.380

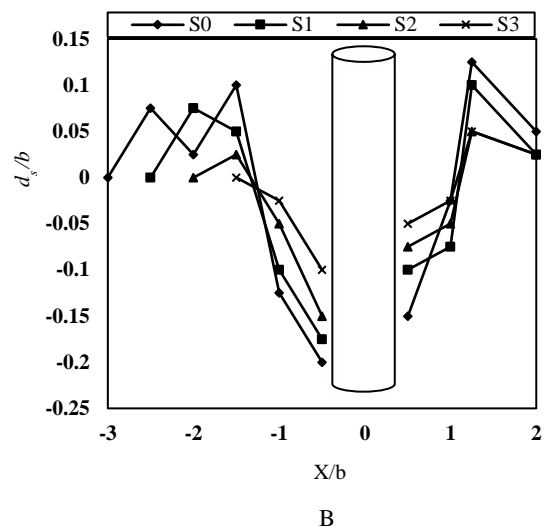
### ۲-۶- زمان آزمایش

مدت زمان انجام آزمایش باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتوان به بیشینه عمق آبشستگی رسید. بنابراین آزمایش‌ها باید تا زمانی ادامه یابند که در گودال آبشستگی و درمحل پایه‌ها تعادل ایجاد شود. Melville and Chiew (1999) زمانی را به عنوان تعادل گزینش کردند که پس از آن تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی کمتر از ۰/۵ درصد قطر پایه در مدت زمان ۲۴ ساعت باشد. بدین منظور آزمایش‌های دراز مدت بیشتر از ۳۰ ساعت، در هر دو بستر انجام شد و مشخص شد از ساعت ششم به بعد

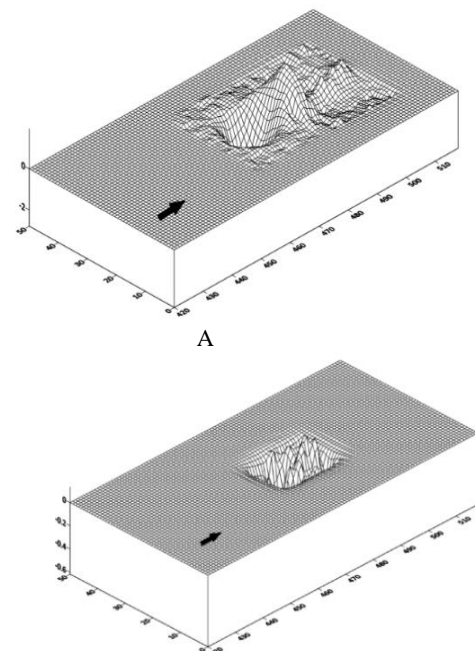
عبوری از شکاف شبیه به یک جت افقی است که عمود بر جریان پایین رونده، مانند سپرشدگی رسوبها در برابر بستر باعث انحراف جریان پایین رونده گشته و بازدارنده از برخورد مستقیم آن با بستر می شود و در ادامه گردابهای نعل اسبی که در زیر جت افقی شکل می گیرد نیز ضعیف خواهند شد. استفاده از شکاف، جریان رو به پایین که عامل اصلی ایجاد گرداب نعل اسبی و یکی از عوامل فرسایش پایه پل است، به فاصله‌ی دورتر از پایه منتقل کرده و باعث کاهش عمق آبشستگی می شود. مقایسه‌ی بستر اول و دوم نشان داد که با تغییر انحراف معیار هندسی ذرات از  $1/3$  به  $2$  (تبدیل رسوبهای یکنواخت به نایکنواخت) در شرایط ثابت ماندن قطر میانگین ذرات ( $D_{50} = 1mm$ ) عمق بیشینه‌ی آبشستگی در مدل‌های  $S_0$ ،  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  در سرعت نسبی  $0.83$  به ترتیب  $0.76$ ،  $0.78$ ،  $0.76$  و  $0.79$  درصد کاهش می یابد. دلیل این امر را می توان تشکیل و گسترش لایه‌ای از ذرات درشت بر روی ذرات ریز در سطح بستر (لایه‌ی سپر) عنوان کرد (Okhravi and Gohari, 2018). در لایه سپری که در رسوبهای نایکنواخت شکل می گیرد ذرات ریزدانه از سطح بستر انتقال می یابند و ذرات درشت دانه به عنوان یک لایه از ذرات ریزدانه زیرین محافظت کرده و بازدارنده از فرسایش آنها می شود.

در شرایط نزدیک به آستانه‌ی حرکت  $1 \approx \frac{u}{u_c}$  پدیده سپرشدگی در ورودی گودال آبشستگی رخ می دهد. تشکیل لایه‌ی سپر در ناحیه‌ی فرسایشی پیرامون گودال آبشستگی و آبراهه بالادست به میزان شایان ملاحظه‌ای از عمق آبشستگی می کاهد. در میزان‌های بالای  $\frac{u}{u_c}$  که جریان قابلیت حرکت اغلب ذرات رسوب را دارد، نایکنواختی ذرات تاثیر بسیار کمی بر عمق آبشستگی دارد. در میزان‌های میانگین  $\frac{u}{u_c}$ ، با افزایش سرعت جریان از تاثیر نایکنواختی ذرات در پایین دست کاسته می شود. شکل ۷ تشکیل لایه‌ی سپر در بستر دوم در مدل  $S_1$  را نمایش می دهد. رسوبها قرمز و آبی رنگ که از ذرات درشت و متوسط تشکیل شده‌اند همانند یک سپر مانع از آبشستگی ذرات ریزدانه شدند.

زمان تعادل آبشستگی متناظر سرعت‌های نسبی  $0.83$ ،  $0.87$  و  $0.92$  در بستر یکنواخت به ترتیب  $270$ ،  $300$  و



**Fig. 5** Topography of the bed in the selected tests with relative velocity 0.83 at bed configurations 1 (A) & 2 (B) شکل ۵ پستی و بلندی سطح بستر در آزمایش‌های برگزیده با سرعت نسبی  $0.83$  در بسترهای اول (A) و دوم (B)



**Fig. 6** 3D topography output of Surfer software for the model S0 with relative velocity 0.83 at bed configurations 1 (A) & 2 (B)

شکل ۶ پستی و بلندی سه بعدی خروجی از نرم افزار سورفر با سرعت نسبی  $0.83$  برای پایه  $S_0$  در بستر اول (A) و بستر دوم (B) مقایسه‌ی مدل‌های  $S_1$  و  $S_2$  برای دو مدل شکاف در ابعاد یکسان نشان می دهد که هر چه شکاف به بستر نزدیک تر باشد، تاثیر آن در کاهش عمق آبشستگی بیشتر است. همچنین افزایش ارتفاع شکاف در زیر بستر ( $S_3$  نسبت به  $S_2$ ) در کاهش عمق آبشستگی موثرتر است. کارکرد جریان



منحنی گسترش زمانی آبهستگی در سرعت‌های نسبی مختلف نشان داده شده است.

با افزایش عمق جریان ناشی از افزایش سرعت نسبی، عمق آبهستگی با توجه به نوع بستر و نوع مدل پایه افزایش خواهد یافت. در مدل‌های  $S_0$ ،  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  در بستر یکنواخت با افزایش سرعت نسبی از ۰٫۸۳ به ۰٫۸۷ عمق آبهستگی به ترتیب ۴۴، ۳۴، ۵۰ و ۴۷ درصد و در بستر نایکنواخت ۲۵، ۲۸، ۳۳ و ۵۰ درصد افزایش یافته است.

هم‌چنین افزایش سرعت نسبی از ۰٫۸۷ به ۰٫۹۲ در بستر یکنواخت به ترتیب ۲۶، ۲۳، ۱۷ و ۷ درصد و در بستر نایکنواخت ۲۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۶ درصد افزایش پیدا کرده است. نتایج هیدرولیکی به‌دست آمده از آزمایش‌ها در جدول ۳ درج شده‌اند. با توجه به داده‌های به‌دست آمده ابعاد گودال آبهستگی نیز با افزایش دبی در هر دو نوع بستر افزایش می‌یابد.

محور افقی نسبت زمان بر زمان آزمایش (۳۶۰ دقیقه) و محور عمودی نسبت عمق آبهستگی به قطر پایه را نشان می‌دهد.

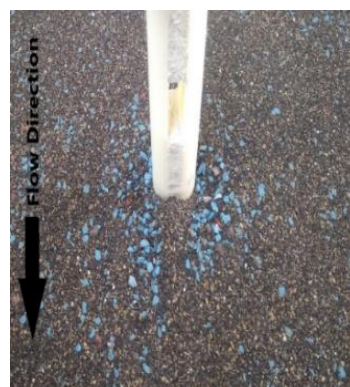


Fig 7. Developed armor layer at the vicinity of sediment bed configuration 2

شکل ۷ لایه سپر ایجاد شده پیرامون پایه در بستر دوم ( $S_1$ )

۲۴۰ دقیقه و در بستر نایکنواخت به ترتیب در دقیقه ۶۰، ۵۰ و ۴۰ رخ داده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده گودال آبهستگی در بستر نایکنواخت با زمان کمتری نسبت به بستر یکنواخت به تعادل می‌رسد. تشکیل لایه‌ی سپر در بستر نایکنواخت دلیل زمان کمتر در شرایط همسان نسبت به بستر یکنواخت می‌باشد. همچنین با افزایش دبی جریان زمان تعادل آبهستگی کاهش می‌یابد. شکل ۸، ۹ و ۱۰

جدول ۳ نتایج هیدرولیکی

Table 3 Hydraulic results

Number	Bed Configurations	Q (l/s)	y(cm)	$d_s$ (cm)				Scour hole dimension (x×y) (cm)			
				$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
1	configuration1	8	5.7	3.4	3.2	2.6	1.9	17×16	16×15	12×13	10×11
2	Uniform sediment bed	10	6.6	4.9	4.3	3.9	2.8	19×18	18×17	14×14	12×14
3	$D_{50} = 1mm, \sigma_g = 1.3$	12	7.4	6.2	5.3	4.6	3	24×22	19×20	20×19	15×16
1	configuration 2	8	5.7	0.8	0.7	0.6	0.4	7×11	7×10	7×9	6×7
2	Non-uniform sediment bed	10	6.6	1	0.9	0.8	0.6	8×11	8×10	9×8	6×8
3	$D_{50} = 1mm, \sigma_g = 2$	12	7.4	1.2	1	0.9	0.7	11×9	7×10	9×9	6×9

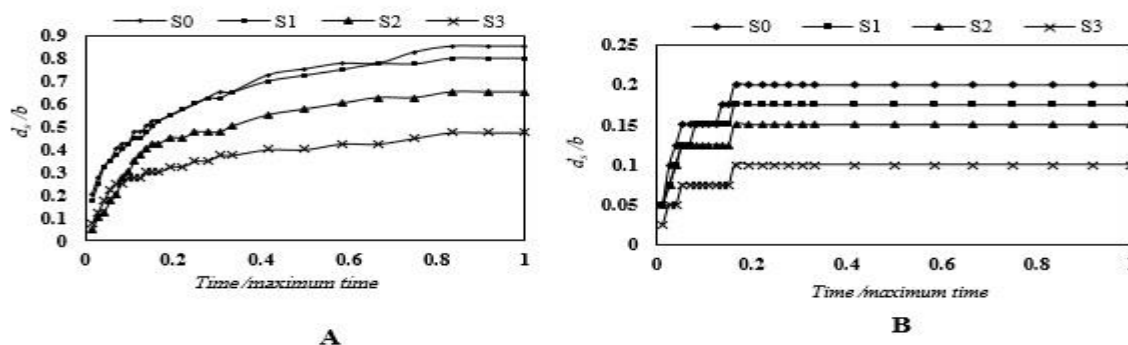
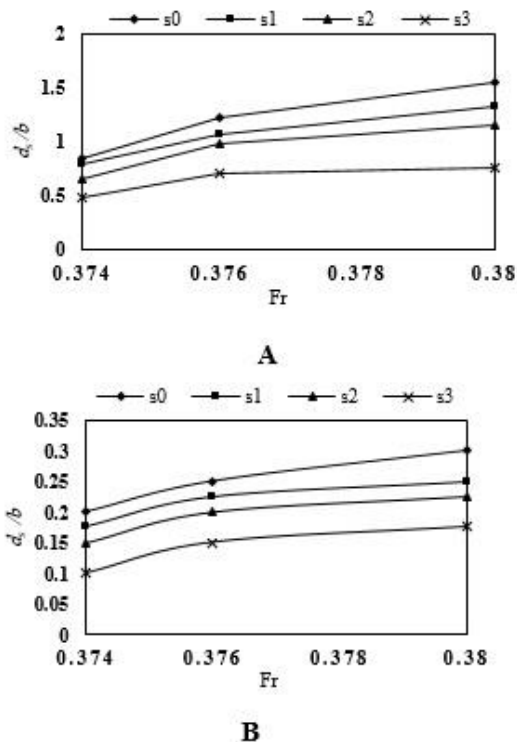


Fig. 8 curve Temporal variation of scour at uniform bed (A) & non-uniform (B) for relative velocity 0.83  
شکل ۸ منحنی گسترش زمانی آبهستگی برای بستر یکنواخت (A) و بستر نایکنواخت (B) با سرعت نسبی ۰٫۸۳

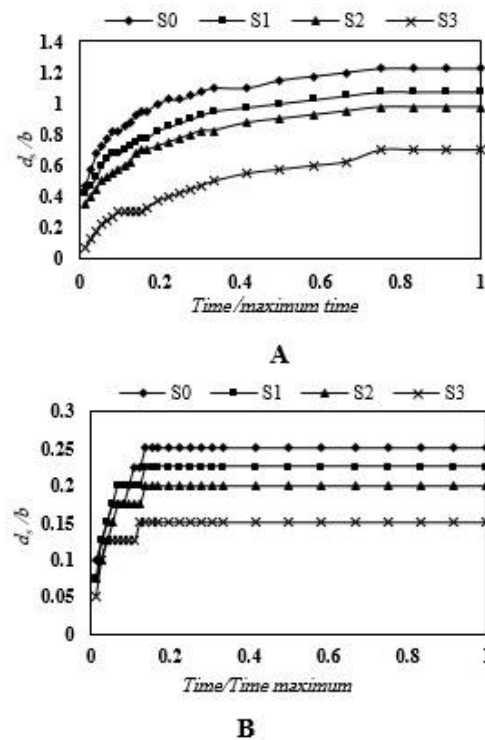
در این بررسی از اعداد فرود  $0.374$ ،  $0.376$  و  $0.380$  استفاده شد. با افزایش عدد فرود جریان در همه مدل‌های پایه، عمق و ابعاد حفره آبشستگی افزایش پیدا کرده است. افزایش عدد فرود باعث قوی‌تر شدن جریان پایین‌رونده می‌شود و در پی آن گرداب‌های نعل اسبی با زمان کمتری شکل گرفته و تأثیر می‌کنند (شکل ۱۱).



**Fig.11** The effect of Froude number on the ratio of scour depth to pier diameter in uniform bed (A) & non-uniform bed (B)

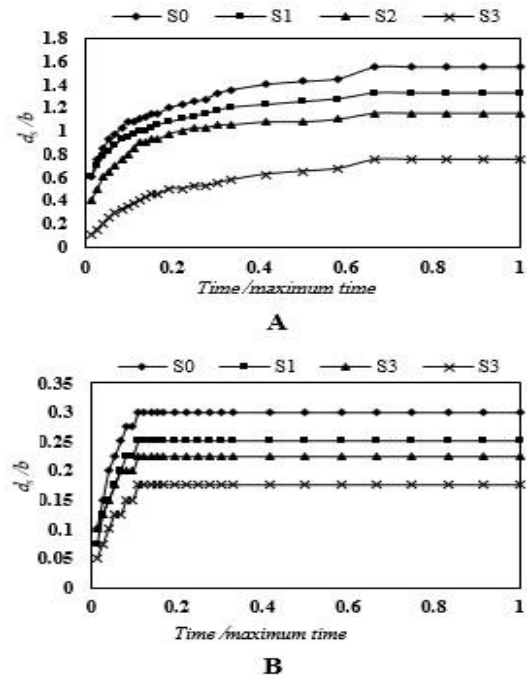
شکل ۱۱ تأثیر عدد فرود بر نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه در رسوب‌های یکنواخت (A) و رسوبات نایکنواخت (B)

با گذشت ۳۰ دقیقه از زمان آزمایش با سرعت‌های نسبی مختلف در مدل‌های  $S_0$ ،  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  در بستر یکنواخت به ترتیب ۶۱، ۶۰، ۵۷ و ۴۶ درصد و در بستر نایکنواخت ۷۸، ۸۷، ۸۶ و ۷۶ درصد از عمق آبشستگی بیشینه رخ داده است. بنابراین در هر دو نوع بستر و مدل‌های مختلف شکاف درصد بالایی از عمق آبشستگی بیشینه در مرحله‌های آغازین و دقیقه‌های اولیه ساز و کار آبشستگی رخ داده است که این میزان در بستر نایکنواخت با توجه به تشکیل سریع لایه‌ی سپر در پیرامون پایه‌ی پل بیشتر است. پارامتر موثر دیگر بر عمق آبشستگی، عمق جریان است. بنابر نتایج



**Fig.9** curve Temporal variation of scour at uniform bed (A) & non-uniform (B) for relative velocity 0.87

شکل ۹ منحنی گسترش زمانی آبشستگی با سرعت نسبی  $0.87$  برای بستر یکنواخت (A) و بستر نایکنواخت (B) با سرعت نسبی  $0.87$



**Fig.10** curve Temporal variation of scour at uniform bed (A) & non-uniform (B) for relative velocity 0.92

شکل ۱۰ منحنی گسترش زمانی آبشستگی برای بستر یکنواخت (A) و بستر نایکنواخت (B) با سرعت نسبی  $0.92$

نایکنواخت به ترتیب ۱۲، ۲۳ و ۴۳ درصد باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شوند. با تبدیل بستر یکنواخت به نایکنواخت به دلیل تشکیل لایه‌ی سپر به طور میانگین تا ۷۷ درصد عمق آبشستگی در مدل‌های مختلف پایه کاهش یافته است. و همچنین زمان رسیدن به تعادل آبشستگی کاهش یافت. عمق آبشستگی با افزایش سرعت نسبی، عدد فرود و نسبت  $\frac{u}{u_c}$  در مدل‌های مختلف پایه و بستر افزایش پیدا کرده است. به طور کلی هر چه شکاف به بستر نزدیک‌تر باشد تاثیر آن در کاهش عمق آبشستگی بیشتر و نایکنواختی رسوب‌ها به دلیل تشکیل لایه‌ی سپر در پیرامون پایه باعث کاهش شایان توجه عمق آبشستگی می‌شود.

#### ۵- منابع

Ardalani, A., Bakhtiari, M., Saneie, M. and Kashefipour, S.M. (2019). Experimental investigation of the effect of slot pier opening area on local scouring of bridge pier. *Water and Soil Science*. 29(3), 67-79. (in Persian)

Abousaeidi, Z., Qaderi, K., Rahimpour, M. and Ahmadi, M.M. (2018). Laboratory investigation of the effect of debris accumulate on the local scour at bridge pier and abutment. *J. of Water and Soil Conservation*. 25(2), 267-282. (in Persian)

Bahrami, N. and Ghomeshi, M. (2019). Effect of netted collar on local scouring around the bridge cylindrical pile groups. *Irrigation Sciences and Engineering*. Accepted. In press. doi: 10.22055/jise.2018.25526.1756 (in Persian)

Breusers, H.N.C., and Raudkivi, A.J. (1991). *Scouring. Hydraulic Structures Design Manual* Balkama publication, Rotterdam, Netherlands, 560p.

Baker, R.E. (1986). Local scour at bridge piers in non-uniform sediment. thesis presented to the University of Auckland, at Auckland, New Zealand, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering, 91p.

Bakhtiari, M., Heidarihani, M., Kashefipour, M. and Sanei, M. (2019). Experimental investigation uses of slot at pier for control of scouring. *Journal of Water Resources Engineering*. 13(3), 23-38. (in Persian)

Chiew, Y.M. and Melville, B.W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26.

Guo(2012) اگر نسبت عمق جریان به قطر پایه کمتر از ۶ باشد ( $y/b < 6$ )، با افزایش این نسبت عمق آبشستگی در رسوب‌های یکنواخت و نایکنواخت افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۲ در مدل پایه شاهد و مدل‌های شکاف دار در رسوب‌های یکنواخت و نایکنواخت با افزایش عمق جریان همراه با افزایش دبی عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

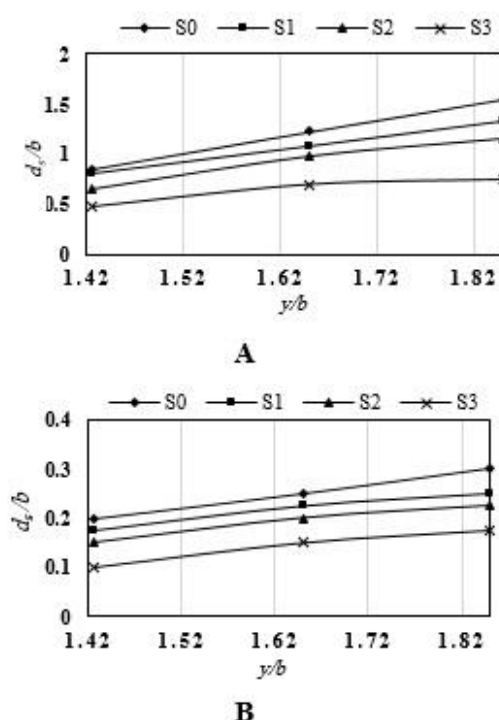


Fig.12 The effect of flow shallowness on scour depth for uniform bed (A) and non-uniform (B)

شکل ۱۲ تاثیر عمق جریان بر میزان عمق آبشستگی در بستر یکنواخت (A) و نایکنواخت (B)

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل استوانه‌ای با در نظر گرفتن سه شکاف مختلف در پایه‌ی پل در بستر یکنواخت و نایکنواخت پرداخته شده است. نتایج نشان داد که در سرعت‌های نسبی متفاوت به طور میانگین در بستر یکنواخت شکاف نزدیک به سطح آب (S1) ۱۰ درصد، شکاف هم تراز با بستر (S2) ۲۳ درصد و افزایش ارتفاع شکاف S2 به اندازه‌ی ۶/۲ سانتی‌متر (بیشینه عمق آبشستگی در سرعت نسبی ۰/۹۲ در پایه شاهد) در زیر بستر (S3) تا ۴۷ درصد می‌تواند در کاهش عمق آبشستگی موثر باشد. همچنین در بستر

- Monocad, M.A.T., Aguirre-Pe, J., Bolivar, J.C., Flores, E.J. (2009). Scour protection of circular bridgepiers with collars and slots. *Journal of Hydraulic Resource*, 47(1), 119–26.
- Melville, B.W., Sutherland, A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(10), 1210-1226
- Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publications, Highland's ranch, Colorado, USA, 550pp.
- Melville, B.W., and Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), 59-65.
- Mellvil, B.W. (1997). Pier and abutment scour. Integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 132(2), 125 -136 .
- Nekhadian, D. and Hamidifar, H. (2020). Effect of floating Debris and slot on scouring around a Bridge pier. *Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics*. (in Persian)
- Osroush, M., Hosseini, S.A., Kamanbedast, A.A. and Khosrojerdi, A. (2019). The effects of height and vertical position of slot on the reduction of scour hole depth around bridge abutments. *Ain Shams Engineering Journal*. 10(3), 651-659.
- Okhravi, S.S. and Gohari, S. (2018). Determination of form friction factor of armored gravel-bed rivers. *J. Hydraul*. 13(3), 1-16. (in Persian)
- Sheppard, D.M. and Renna, R. (2005). *Bridge scour manual*. Florida Department of Transportation, 605p.
- Sehat, M., Kamanbedast, A.A., Bordbar, A., Masjedi, A. and Heidarnejad, M. (2021). The study of convergent and divergent slots on scour reduction around abutment. *Ain Shams Engineering Journal*. 12(2), 1241-1253.
- Sousa, A.M. and Ribeiro, T.P. (2019). Local scour at complex bridge piers—experimental validation of current prediction methods. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 1-8.
- Shafaei bajestan, M. (2016). *Hydraulic of sediment transport*. 4nd ed., Shahid Chamran University of Ahvaz Publications. (in Persian)
- Chiew, Y. (1992). Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(9), 1260-1269.
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., Desineh, M. and Ghaderi, A. (2019). The experimental study of the effects of river mining holes on the bridge piers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50(7), 1619-1633. (in Persian)
- Davodi, H., Masjedi, A.R., Heidarnejad, M., Bordbar, A. and Kamanbedast, A.A. (2019). Investigation of the effect of cable on the control of scour around the piles group in the river. *Journal of Water and Soil Science*. 23(2), 73-86. (in Persian)
- EL-Ghorab, E.A. (2013). Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. *Alexandria Engineering Journal*. 52(3), 467–478.
- Grimaldi, C. (2005). *Non-conventional counter-measures against local scouring at bridge piers*, PhD Thesis, University of Calabria, Cosenza, Italy.
- Guo, J. (2012). Pier scour in clear water for sediment mixtures. *J. Hyd. Research., IAHR*. 50(1), 18-27.
- Johnson , P.A. and Dock, D.A. (1998). Probabilistic bridge scour estimates. *J. Hydr. Eng., ASCE*. 124(7), 750 -754.
- Kumar, V., RangaRaju, K.G. and Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), 1302–5.
- Keshavarzi, A., Hamidifar, H. and Khajehnoori, L. (2019). Mean flow structure and local scour around single and two columns bridge piers. *Irrigation Sciences and Engineering*. doi: 10.22055/jise.2018.22861.1631. (In Persian)
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J.P. and Cardoso, A.H. (2013). Clear-water scour at pile groups. *J. Hyd. Eng., ASCE*, 139(10), 1089-1098.
- Mashahir, M.B., Zarrati, A.R. and Mokallaf Sarband, E. (2008). Effect of collar on time development of scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulics*, 3(2), 19-11. (in Persian)
- Majedi Asl, M., Daneshfaraz, R. and Valizadeh, S. (2019). The experimental study of the river sand and gravel mining on the scouring pattern around pier group. *J. of Hydraulics*, 14(3), 115-130. (in Persian)