

# Experimental Investigation of the Effect of Hydrographs with Different Skewness and Duration Time on Temporal Variations of Scour Around a Single Cylindrical Pier

Leila Hashemi<sup>1</sup>, Seyed Mahmood Kashefipour<sup>2\*</sup>, Mehdi Ghomeshi<sup>2</sup>, Mohammad Bahrami Yarahmadi<sup>3</sup>

1- Ph.D of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\* Kashefipour@scu.ac.ir

Received: 15 July 2023

Accepted: 14 August 2023

Discussion: 22 September 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

## Abstract

**Introduction:** For a bridge pier situated within a river's flow path, a complex three-dimensional flow pattern emerges around the pier, resulting in the formation of a scour hole. The development of this scour hole can destabilize the bridge pier, potentially leading to the collapse of both the pier and the bridge. This issue becomes critically important during floods, when river flow escalates rapidly, posing the greatest threat of destruction. While most studies have focused on scouring under steady flow conditions, flood events alter the river's natural conditions, creating unsteady flows that rapidly change the velocity patterns and shear stresses around the pier, significantly impacting the scour depth (Shaker et al., 2020). Notably, the maximum scour depth occurring under a flood hydrograph can be substantially less than the equilibrium depth observed under steady flow at peak discharge (Kothyari et al., 1992; Lai et al., 2009). Consequently, designing based on the peak discharge of floods may significantly overestimate the maximum scour depth compared to actual flood conditions (Chang et al., 2004). Given the critical need for scour investigations under unsteady flow conditions and the scarcity of studies in this area, further research is imperative. The goal of this research is to explore how the timing of the rising and falling limbs of the hydrograph, as well as the duration of the hydrograph, affect the temporal variations and maximum values of scour depth around a cylindrical pier.

**Methodology:** The experiments were carried out in a rectangular flume with glass walls and a straight length of 10 m, a width of 0.74 m and a depth of 0.6 m in the Physical and Hydraulic Modeling Laboratory of Shahid Chamran University, Ahvaz. The test section in the flume was covered with uniform sand with an average size of  $d_{50}=0.7$  mm and geometric standard deviation  $\sigma=1.3$ . In order to achieve the goals of this study, a total of 13 experiments were examined. In order to investigate the effect of the time of the rising and falling limbs of the hydrograph on the temporal variation and the maximum scour depth, a number of 6 hydrographs with a constant duration of 100 minutes and the ratio of the time to reach the

peak ( $T_p$ ) to the duration time ( $T_d$ ) of the hydrograph (skewness) equal to 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 0.9 were designed. To investigate the impact of flood duration on scouring, seven hydrographs with Gaussian distributions and durations of 10, 20, 45, 80, 100, 120, and 160 minutes were simulated (refer to Fig. 3 and Table 1). A hydrograph generation system facilitated the creation of unsteady flow conditions within the flume. This system comprised a programmable inverter used to modulate the flow rate according to the hydrograph's requirements. The inverter was connected to both the pump and an electromagnetic flow meter, and was controlled via a computer using specialized software.

**Results and discussion:** The temporal variations in scouring patterns revealed that scouring initiates at the sides of the pier, progressively reaches the nose, and ultimately, the maximum scour depth is observed at the pier's nose. It was found that the maximum scour depth for a hydrograph with a Gaussian distribution typically occurs after the peak time, approximately 10% into the duration (Fig. 5). Examination of the rising limb's effect indicated that although the time to reach the hydrograph's peak does not alter the maximum scour depth in hydrographs of similar duration, it significantly influences the temporal changes in shear stress and scour depth (Fig. 6). Shortening the rising limb time from 90 minutes to 10 minutes resulted in a ninefold increase in shear stress change rate and a sixfold increase in the scour rate. Further, the falling limb's influence on the maximum scour depth becomes more pronounced as the rising limb's duration decreases. The study also observed increases in maximum scour depth of 51.35, 21.28, 12, 5.56, and 1.79 percent for hydrographs with skewness values of 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, and 0.8, respectively, compared to the depth at peak discharge. Additionally, with longer falling limb durations, the maximum scour depth increased by 30.23, 14, and 1.82 percent, respectively, correlating with 9, 4, and 1.5 times increases in the duration of the falling limb. An increase in hydrograph duration was found to enhance both the depth and dimensions of the scour hole, with maximum scour depths for durations of 20, 45, 80, 100, 120, and 160 minutes being 19.44, 38.89, 52.78, 58.33, 66.67, and 69.44% greater than that of a 10-minute duration hydrograph, respectively (Fig. 7). Additionally, the slope of the temporal variations in scour depth decreased with longer duration times due to extended intervals of flow rate changes along the rising limb (Fig. 8).

**Conclusion:** This study, investigated scouring around a cylindrical pier under unsteady flow conditions. Results indicated that while the duration of the rising limb significantly affects the temporal variations in shear stress and scour depth, it has minimal impact on the maximum scour depth for hydrographs with similar peak discharge and duration. Moreover, a shorter rising limb duration increased the influence of the falling limb on the maximum scour depth. The study further demonstrated that an increase in the duration of the hydrograph leads to greater maximum scour depths and a decrease in the slope of temporal scour depth variations.

**Keywords:** Local scouring, Unsteady flow, Temporal variation, Cylindrical pier.



© 2024 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/>)

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر آب نگارهای دارای چولگی و زمان تداوم متفاوت بر تغییرات زمانی آبستگي پيرامون تک پایه استوانه‌ای

لیلا هاشمی<sup>۱</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۲\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، محمد بهرامی یاراحمدی<sup>۲</sup>

- ۱- دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.  
 ۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.  
 ۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\*Kashefipour@scu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** آبستگي بیش از حد در هنگام سیلاب به عنوان تهدیدی برای پایداری سازه‌های واقع در بستر فرسایش‌پذیر به شمار می‌رود. در این تحقیق به بررسی آبستگي پیرامون تک پایه استوانه‌ای در شرایط جریان ناماندگار با شبیه‌سازی آب نگارهای مختلف پرداخته شد. اثر گذاری‌های شاخه‌های خیزان و افتان آب نگار و همچنین زمان تداوم آب نگار بر روی توسعه زمانی عمق آبستگي ارزیابی شد. نتایج نشان داد که برای آب نگارهای با دبی اوج و زمان تداوم همانند، زمان شاخه خیزان آب نگار بر روی توسعه زمانی تنش برشی و عمق آبستگي به شدت تاثیرگذار است اما روی بیشینه عمق آبستگي تاثیر ناچیزی دارد. با کاهش زمان شاخه خیزان، اثرگذاری شاخه افتان آب نگار بر روی بیشینه عمق آبستگي افزایش می‌یابد. افزون بر این نتایج نشان داد که با افزایش زمان تداوم آب نگار از ۱۰ دقیقه به ۱۶۰ دقیقه، بیشینه عمق آبستگي ۶۹/۴۴ درصد افزایش و شیب تغییرات زمانی عمق آبستگي کاهش می‌یابد.

**کلید واژگان:** آبستگي موضعی، جریان ناماندگار، تغییرات زمانی، تک پایه استوانه‌ای

## ۱- مقدمه

محققان مختلف انجام شده است و از این رابطه‌ها به طور گسترده برای طراحی پایه پل استفاده می‌شود. در این رابطه‌ها دبی اوج سیلاب با دوره بازگشت مشخص به عنوان دبی طراحی در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در حین رخداد سیلاب ممکن است زمان استمرار اوج جریان در مقایسه با جریان ماندگار کمتر باشد و بیشینه عمق آبستگي ناشی از عبور آب نگار سیل کمتر از عمق تعادلی ناشی از جریان ماندگار شود (Kothyari et al., 1992; Lai et al., 2009). بنابراین استفاده از دبی اوج سیلاب برای طراحی می‌تواند بیشینه عمق آبستگي را در مقایسه با شرایط واقعی رخداد سیلاب تا میزان زیادی بیش از حد برآورد کند (Chang et al., 2004). این نتیجه توسط Lu et al. (2008) با مقایسه داده‌های میدانی آبستگي موضعی و میزان‌های محاسبه شده با استفاده از رابطه‌های رایج آبستگي تعادلی تایید شده است.

هنگامی که پایه پل در مسیر جریان قرار می‌گیرد، الگوی جریان سه بعدی و پیچیده‌ای پیرامون پایه شکل می‌گیرد که منجر به تشکیل حفره آبستگي پیرامون پایه می‌شود. توسعه حفره آبستگي سبب ناپایداری پایه پل و در نهایت تخریب پایه و پل خواهد شد. این مسئله در حین رخداد سیلاب که جریان در رودخانه به سرعت افزایش می‌یابد و بیشترین توان بالقوه تخریب را به همراه دارد اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. بدیهی است هزینه‌های مربوط به ساخت و ساز پل بسیار زیاد است و آسیب و زیان‌های مربوط به خرابی پل جبران‌ناپذیر است. شکل ۱ نمایی از تخریب پل را در اثر آبستگي در زمان سیلاب نشان می‌دهد.

تاکنون بررسی‌های زیادی به‌منظور ارائه رابطه‌ای برای برآورد بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه‌های پل توسط

متفاوت ارزیابی و بیان کردند عمق آبشستگی در طول شاخه خیزان آب نگار به طور پیوسته افزایش می‌یابد اما در طول شاخه‌ی افتان تغییرات ناچیزی دارد. ایشان نیز مانند Kothyari et al. (1992) بر اساس مدل آب نگار پله‌ای به بررسی تغییرات زمانی عمق آبشستگی در جریان ناماندگار پرداختند. (Lu et al. (2008) با بررسی میدانی بر روی آبشستگی پل Si-Lo در پایین‌دست رودخانه Cho-Shui، طولانی‌ترین رودخانه تایوان، دریافتند که بیش از ۷۹ درصد از کل عمق آبشستگی در طول سیلاب به آبشستگی موضعی نسبت داده می‌شود و با توجه به دهانه‌های به نسبت گسترده بین پایه‌های پل، تنها حدود ۵ درصد از کل عمق آبشستگی مربوط به آبشستگی انقباضی می‌باشد. (Lai et al. (2009) تاثیر شاخه خیزان آب نگار بر روی بیشینه عمق آبشستگی را در شرایط آب زلال بررسی کردند و رابطه‌ای برای برآورد بیشینه عمق آبشستگی در شرایط جریان ناماندگار ارائه دادند. در رابطه پیشنهادی ایشان، اثر ناپایداری جریان توسط یک فراسنجه جریان ناماندگار که ترکیبی از شدت اوج جریان و زمان رسیدن به اوج است، در نظر گرفته شد. ایشان با بیان اینکه شاخه افتان آب نگار تنها نقش کوچکی در فرآیند آبشستگی ایفا می‌کند، عمق آبشستگی در اوج جریان را به عنوان بیشینه عمق آبشستگی تحت یک آب نگار سیلاب در نظر گرفتند. (Borghesi et al. (2012) آبشستگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای شکل را در شرایط جریان ناماندگار با شبیه‌سازی آب نگارهای مثلثی شکل بررسی کردند. نتایج نشان داد زمان رسیدن به اوج آب نگار تاثیری بر عمق نهایی آبشستگی ندارد اما اختلاف معنا داری در تکامل عمق آبشستگی تا رسیدن به بیشینه عمق آبشستگی ایجاد می‌کند. (Tabarestani and Zarrati (2017) آب نگارهایی با مدت زمان متفاوت را برای بررسی اثر شاخه‌های خیزان ( $T_p$ ) و افتان ( $T_f$ ) آب نگار بر عمق و عرض حفره آبشستگی پیرامون پایه مستطیلی آزمایش کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت زمان شاخه افتان به زمان شاخه خیزان آب نگار، عمق حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، عمق آبشستگی نهایی برای یک آب نگار با نسبت  $T_p/T_f$  برابر با ۹/۲۵ حدود ۴۲



**Fig. 1** A view of the destruction of the pier and bridge due to local scouring during the flood

شکل ۱ نمایی از تخریب پایه و پل در اثر آبشستگی موضعی در زمان رخداد سیلاب

با توجه به اهمیت پدیده آبشستگی، محققان زیادی در دهه‌های اخیر آبشستگی پیرامون پایه پل را از جنبه‌های مختلفی مانند بیشینه عمق آبشستگی، توسعه زمانی آبشستگی، رسوبات بستر یکنواخت و غیر یکنواخت و شرایط آب زلال و بستر زنده بررسی کرده‌اند. مروری بر این نتایج نشان می‌دهد که بیشتر آن تحقیقات در شرایط جریان ناماندگار صورت گرفته است. رخداد سیلاب در یک رودخانه که می‌تواند ناشی از بارش شدید باران، ذوب شدن برف‌های فصلی و یا شکست سد باشد، شرایط طبیعی رودخانه را تغییر داده و منجر به شکل‌گیری یک جریان ناماندگار می‌شود که الگوی سرعت و تنش برشی پیرامون پایه را به سرعت تغییر می‌دهد و بر عمق آبشستگی تاثیر می‌گذارد. بنابر نتایج بررسی‌های Kothyari et al. (1992) هنگامی که صحبت از ناپایداری جریان است، تاثیر زمان بر آبشستگی و تغییرات زمانی عمق آبشستگی اهمیت پیدا می‌کند و ابزاری برای برآورد عمق آبشستگی در شرایط جریان ناماندگار می‌شود. بر این مبنا ایشان تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون پایه استوانه‌ای را با به‌کارگیری طرح آب نگار پله‌ای بررسی کردند. در این طرح عمق آبشستگی در هر پله با به‌کارگیری رابطه جریان ناماندگار ارائه شده توسط ایشان برآورد می‌شد و از مجموع عمق‌های آبشستگی در هر پله، عمق آبشستگی در شرایط جریان ناماندگار به‌دست می‌آمد. (Chang et al. (2004) آبشستگی پیرامون پایه استوانه‌ای در شرایط جریان ناماندگار را توسط آب نگارهای پله‌ای با زمان تداوم ثابت ۷ ساعت، سه دبی اوج مختلف و سه زمان رسیدن به اوج

تداوم و زمان رسیدن به اوج جریان را بر بیشینه عمق آبشستگی و تغییرات زمانی آن نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت بررسی آبشستگی در شرایط جریان ناماندگار و محدود بودن بررسی‌های موجود در این زمینه، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر زمان شاخه‌های خیزان و افتان آب نگار و همچنین زمان تداوم آب نگار بر روی تغییرات زمانی عمق آبشستگی و بیشینه میزان آن پیرامون تک پایه استوانه‌ای می‌باشد که در این زمینه تحقیقات انجام شده اندک می‌باشد. در این تحقیق برای بررسی تاثیر زمان شاخه‌های خیزان و افتان آب نگار از ۶ آب نگار با چولگی‌های متفاوت (۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۹) استفاده شد. افزون بر این از ۷ آب نگار نرمال (با توزیع گوسی) با زمان‌های تداوم متفاوت (۱۰، ۲۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه) برای بررسی تاثیر زمان تداوم آب نگار بر بیشینه عمق آبشستگی و تغییرات زمانی آن استفاده شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- سامانه آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی با دیواره‌های شیشه‌ای به طول مستقیم ۱۰ متر، عرض ۰/۷۴ متر و عمق ۰/۶ متر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. محدوده آزمایش در فلوم شامل یک بازه رسوبی به طول ۲ متر و عمق ۰/۱۸ متر بود که در فاصله ۳/۶ متری پایین‌دست ورودی فلوم قرار داشت. یک توری مشبک در ورودی فلوم برای از بین بردن آشفتگی و نوسان‌های جریان ورودی به فلوم و یک سرریز مستطیلی در انتهای فلوم برای تنظیم عمق جریان تعبیه شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک دبی سنج الکترومغناطیس (مگاب ۳۰۰۰ با دقت  $\pm 0.25$  درصد) میزان اندازه‌گیری شده نصب شده بر روی لوله ورودی به فلوم استفاده شد. شکل ۲ شمای کلی از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات آن را نشان می‌دهد.

یک پایه استوانه‌ای شکل از جنس تفلون با قطر ۰/۴۵ متر برای مدل‌سازی پایه پل استفاده شد. بنا بر نتایج

درصد بزرگتر از آب نگار همانند با یک شاخه بالارونده است.

Gumgum and Guney (2020) آبشستگی پیرامون پایه استوانه‌ای را در شرایط بستر زنده و جریان ناماندگار با به کارگیری آب نگارهای مثلثی بررسی کردند. ایشان با بررسی اثرگذاری‌های دبی اوج و زمان تداوم آب نگار دریافتند که در طول شاخه خیزان آب نگار سیل، عمق آبشستگی به سرعت افزایش یافته و حرکت رسوب تاثیر ناچیزی بر عمق آبشستگی و ارتفاع نوسان‌های عمق دارد. اما در طول شاخه افتان آب نگار سیل، بزرگی نوسان‌های عمق آبشستگی بیشتر می‌شود و رسوب‌های عرضه شده به حفره آبشستگی باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود. Shaker et al. (2020) به بررسی و ارزیابی آبشستگی زیر خط لوله عبوری از بستر رودخانه در شرایط جریان ناماندگار پرداختند. ایشان با بررسی زمان رسیدن به اوج آب نگار بیان کردند که افزایش شیب شاخه خیزان آب نگار در افزایش نرخ آبشستگی بسیار تاثیرگذار است اما شیب شاخه افتان آب نگار تاثیر چندانی در عمق نهایی و توسعه زمانی آبشستگی ندارد. Abolfathi et al. (2021) تاثیر ناپایداری جریان در تغییرات زمانی آبشستگی پیرامون گروه پایه متشکل از سه پایه استوانه‌ای را بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد در صورت وجود شرایط خاصی از آب نگار، حفره‌های آبشستگی پایه‌های دوم و سوم پس از فروکش کردن دبی اوج می‌تواند توسط ذره‌های رسوبی فرسایش یافته از پایه بالادست دوباره پر شود که بیشینه میزان آن حدود ۲۴ درصد از قطر پایه می‌باشد. Hakim et al. (2022) به بررسی تاثیر آبشکن محافظ با نفوذپذیری‌های مختلف بر کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه جانبی کوتاه در شرایط جریان ناماندگار پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که حضور آبشکن باعث کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه جانبی می‌شود که با افزایش نفوذپذیری آبشکن این اثرگذاری کاهش می‌یابد.

مرور نتایج بررسی و ارزیابی‌های صورت گرفته در زمینه آبشستگی پیرامون پایه پل در شرایط جریان ناماندگار، اهمیت فراسنجه‌های مختلف آب نگار سیل مانند زمان

به ترتیب عبارت اند از اندازه ذره‌ای که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن کوچکتر هستند) پوشانده شد. بنا بر معیار Chiew and Melville (1987) زمانی که  $D/d_{50} > 50$  باشد (که در آن قطر پایه است) اندازه ذرات رسوبی بستر بر عمق آبستگی تأثیر نمی‌گذارد. در این تحقیق، این نسبت برابر با ۶۴/۲۸ می‌باشد.

بررسی‌های Melville و Raudkivi and Ettema (1983) and Chiew (1999) به منظور به کمینه رساندن تاثیر انسداد، لازم است عرض پایه کمتر از ۱۲ درصد عرض فلوم نگه داشته شود که در این تحقیق این میزان برابر با ۶ درصد است. محدوده رسوبی فلوم توسط رسوباتی از جنس ماسه با اندازه متوسط  $d_{50}=0.7$  میلی‌متر و انحراف استاندارد هندسی  $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ ،  $\sigma = 1.3$

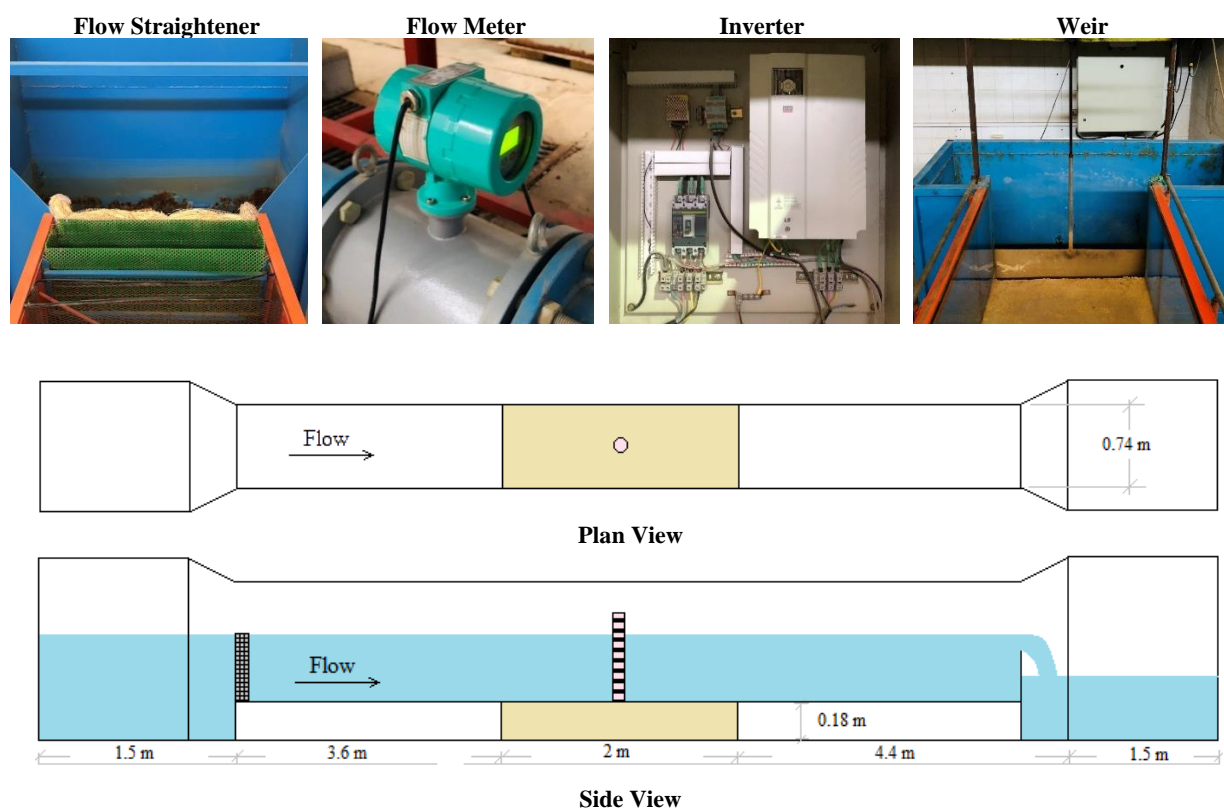


Fig 2 A view of the laboratory flume and the equipment used for this study  
 شکل ۲ نمایی از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده برای انجام این پژوهش

اوج و پایه آب نگار بر مبنای رابطه (۱)، به ترتیب از عمق جریان در شرایط اوج و پایه آب نگار استفاده شد. در این تحقیق برای برقراری جریان ناماندگار در فلوم، از آب نگار جریان ناماندگار استفاده شد. برای دستیابی به هدف‌های این پژوهش در مجموع ۱۳ آزمایش اجرا و بررسی شد. به منظور بررسی تاثیر جریان سیلاب با تداوم‌های مختلف بر آبستگی، از ۷ آب نگار نرمال (توزیع گوسی) با زمان‌های تداوم ( $T_d$ ) ۱۰، ۲۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه استفاده شد. همچنین به منظور بررسی تاثیر زمان شاخه‌های خیزان و افتان آب نگار بر تغییرات

آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شد. بر این اساس پارامتر  $U/U_c$  سرعت متوسط جریان در بالادست پایه و  $U_c$  سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر است) در تمام آزمایش‌ها کوچک‌تر از یک بود (جدول ۱). برای محاسبه  $U_c$  از معادله Neill استفاده شد (Melville and Neill, 2000):

$$U_c = 1.41 [(G_s - 1) g d_{50}]^{0.5} (h / d_{50})^{1/6} \quad (1)$$

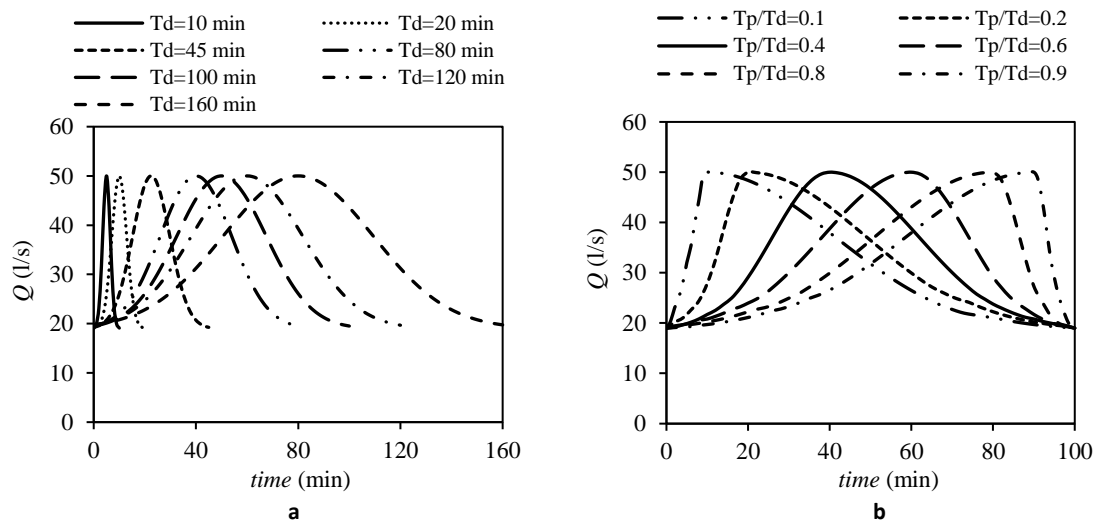
در رابطه بالا  $h$  عمق جریان،  $G_s$  چگالی نسبی ذرات رسوبی و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد. برای محاسبه  $U_c$  در دبی

## ۲-۲- چگونگی انجام آزمایش‌ها

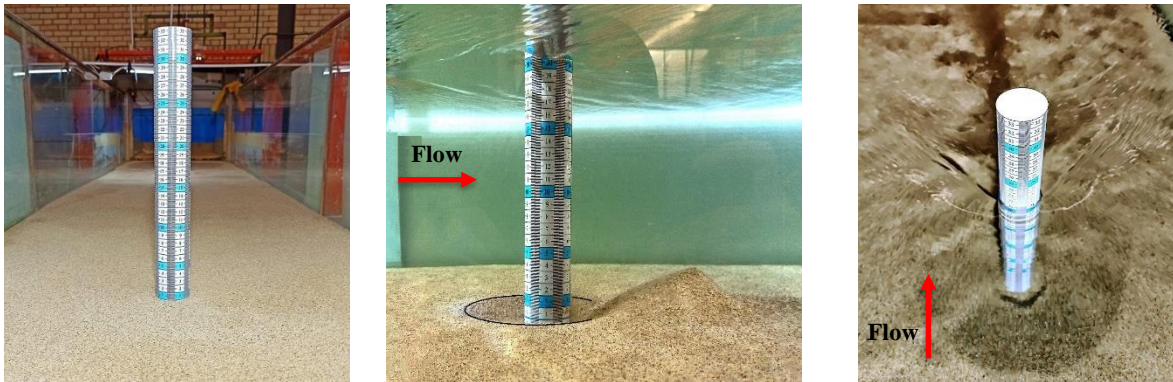
در آغاز هر آزمایش بستر رسوبی به دقت تسطیح می‌شد. پس از آن آب با دبی بسیار کم وارد فلوم می‌شد تا بخش رسوبی به آرامی اشباع شود. پیش از آغاز هر آزمایش برای جلوگیری از آبشستگی پیرامون پایه، یک دریچه دستی به صورت موقت در پایین دست بخش رسوبی فلوم قرار می‌گرفت تا عمق جریان درون فلوم به آرامی افزایش یابد و به عمق جریان در دبی پایه آب نگار برسد. پس از آن دریچه دستی اندکی بالا آورده می‌شد تا عمق جریان دو طرف دریچه در طول فلوم برابر شود. در نهایت با برابر شدن عمق آب در دو طرف آن، دریچه دستی از فلوم خارج می‌شد و عمق و دبی جریان برای دبی پایه آب نگار تنظیم می‌شد. پس از برقراری شرایط پایه آب نگار، سامانه اجرای جریان ناماندگار فعال می‌شد و جریان آب نگار مورد نظر برای هر آزمایش وارد فلوم می‌شد. با آغاز آزمایش عمق جریان متناسب با افزایش دبی در فلوم افزایش می‌یافت و پس از عبور دبی اوج آب نگار و با کاهش دبی جریان، عمق جریان نیز کاهش می‌یافت و به میزان پایه می‌رسید. پس از خروج کامل آب نگار، پمپ به صورت خودکار خاموش و جریان ورودی به فلوم قطع می‌شد. آب درون فلوم از طریق شیرهای زهکش نصب شده در زیر بخش رسوبی خارج می‌شد. در طول مدت اجرای آب نگار تغییرات زمانی آبشستگی پیرامون پایه توسط یک دوربین اندوسکوپ HD720p با قطر ۰/۵۵ میلی‌متر که درون جریان و در بالادست پایه‌ها نصب شده بودند، ثبت می‌شد. محل قرارگیری دوربین به گونه‌ای تنظیم شد تا تاثیری روی الگوی جریان پیرامون پایه نداشته باشد. یک برچسب مقیاس با دقت یک میلی‌متر دورتادور سطح پایه چسبانده شد تا مشاهده مستقیم عمق آبشستگی در طول عبور جریان آب نگار را آسان کند. تغییرات زمانی آبشستگی در دماغه و کناره پایه برداشت شد. در پایان هر آزمایش و پس از زهکشی کامل بستر رسوبی، تغییرات بستر رسوبی پیرامون پایه توسط دستگاه برداشت نیمرخ بستر<sup>۲</sup> (ساخت شرکت آداک تجهیز ایرانیان) برداشت می‌شد. این دستگاه مجهز به یک لیزر (با دقت ۰/۵ میلی‌متر) برای برداشت

زمانی و بیشینه عمق آبشستگی، شمار ۶ آب نگار با زمان تداوم ثابت ۱۰۰ دقیقه و نسبت  $T_p/T_d$  (که در آن  $T_p$  زمان رسیدن به اوج آب نگار می‌باشد) برابر با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۹ بررسی و ارزیابی شد. آب نگارهای با  $T_p/T_d$  برابر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ دارای چولگی به چپ و آب نگارهای با  $T_p/T_d$  برابر ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۹ دارای چولگی به راست می‌باشند. شکل ۳ آب نگارهای شبیه‌سازی شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. میزان دبی پایه و اوج به گونه‌ای انتخاب شد که شرایط بستر آب زلال در همه لحظه‌های عبور آب نگار برقرار باشد و همچنین در دبی پایه آب نگار هیچگونه آبشستگی پیرامون پایه رخ ندهد. بر این مبنا دبی پایه معادل ۱۹ لیتر بر ثانیه با عمق جریان ۱۵ سانتی‌متر و دبی اوج آب نگار معادل ۵۰ لیتر بر ثانیه با عمق جریان ۲۰/۳ سانتی‌متر انتخاب شد. در جدول ۱ ویژگی‌های آزمایش‌های صورت گرفته ارائه شده است. در این جدول فراسنجه‌های  $T_p$  و  $T_d$  به ترتیب بیان‌کننده زمان تداوم و زمان رسیدن به اوج آب نگار،  $h_b$  عمق جریان در شرایط پایه،  $h_p$  عمق جریان در شرایط اوج آب نگار،  $U_p/U_c$  و  $U_b/U_c$  به ترتیب بیان‌کننده شرایط پایه و اوج آب نگار می‌باشند. در بخش نام هر آزمایش US معرف جریان ناماندگار، N، L و R به ترتیب معرف آب نگارهای با توزیع نرمال، چولگی به چپ و چولگی به راست می‌باشد.

فلوم مجهز به سامانه تولید جریان ناماندگار بود. این سامانه شامل یک نوسان ساز الکترونیکی<sup>۱</sup> برنامه ریزی شده بود که برای تنظیم دبی متغیر آب نگار استفاده شد. نوسان ساز الکترونیکی از یک سو به پمپ و از سوی دیگر به دبی سنج الکترومغناطیس متصل بود و از طریق یک نرم افزار توسط رایانه اجرا می‌شد. فایل اکسل آب نگار به صورت تغییرات دبی نسبت به زمان از طریق نرم افزار نصب شده روی رایانه، فراخوانی می‌شد. سپس نرم افزار با انجام پردازش‌های مورد نیاز دستور کار لازم را برای تنظیم دبی پمپ به سامانه ارسال می‌کرد. این سامانه قادر بود داده‌های آب نگار صادر شده را با دقت ۱ لیتر بر ثانیه پیاده سازی کند.



**Fig 3** Hydrographs used in this study, a) hydrographs with different duration times, b) hydrographs with different  $T_p/T_d$   
 شکل ۳ آب‌نگارهای استفاده شده در این پژوهش، الف) آب‌نگارهای با زمان‌های تداوم مختلف، ب) آب‌نگارهای با  $T_p/T_d$  های مختلف



**Fig 4** A view of the graded pier and the sediment bed before the start of the experiment and during the hydrograph flow  
 شکل ۴ نمایی از پایه مدرج و بستر رسوبی پیش از آغاز آزمایش و در حین عبور جریان آب‌نگار

**جدول ۱** ویژگی‌های آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

**Table 1** The characteristics of the tests performed in this study

NO.	Name	$T_d$ (min)	$T_p$ (min)	$h_b$ (cm)	$h_p$ (cm)	$U_b/U_c$	$U_p/U_c$
1	US-N-10	10	5	15	20.3	0.50	0.93
2	US-N-20	20	10	15	20.3	0.50	0.93
3	US-N-45	45	22.5	15	20.3	0.50	0.93
4	US-N-80	80	40	15	20.3	0.50	0.93
5	US-N-100	100	50	15	20.3	0.50	0.93
6	US-N-120	120	60	15	20.3	0.50	0.93
7	US-N-160	160	80	15	20.3	0.50	0.93
8	US-L-0.1	100	10	15	20.3	0.50	0.93
9	US-L-0.2	100	20	15	20.3	0.50	0.93
10	US-L-0.4	100	40	15	20.3	0.50	0.93
11	US-R-0.6	100	60	15	20.3	0.50	0.93
12	US-R-0.8	100	80	15	20.3	0.50	0.93
13	US-R-0.9	100	90	15	20.3	0.50	0.93

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی توسعه زمانی آبشستگی در دماغه

##### و کناره پایه استوانه‌ای

در شکل ۵ تغییرات زمانی آبشستگی در دماغه و کناره پایه استوانه‌ای برای زمان‌های تداوم ۴۵ و ۱۶۰ دقیقه به عنوان نمونه نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی نشان‌دهنده عمق آبشستگی بی بعد ( $ds/D$ ) و محور افقی نشان‌دهنده  $t/T_d$  می‌باشد. مشاهده می‌شود که آبشستگی از کناره‌های پایه آغاز می‌شود و در دقیقه‌های اولیه عبور آب نگار، آبشستگی کناره‌های پایه بیش از دماغه می‌باشد. با گذشت زمان عمق آبشستگی کناره و دماغه پایه به هم نزدیک شده و در نهایت عمق آبشستگی در دماغه پایه از آبشستگی کناره‌های پایه پیشی می‌گیرد و بیشینه عمق آبشستگی در دماغه پایه رخ می‌دهد. دو عامل اصلی شکل‌گیری گودال آبشستگی پیرامون پایه پل شامل گرداب‌های برخاستگی ناشی از جدایی خطوط جریان در پشت پایه و گرداب‌های نعل اسبی ناشی از برخورد جریان به جلوی پایه می‌باشد. در دقیقه‌های اولیه آب نگار به علت سرعت و دبی کم جریان، قدرت گردابه‌های نعل اسبی جلوی پایه ضعیف است. جدایش خطوط جریان پیرامون پایه موجب افزایش تنش برشی موضعی در کناره‌های پایه می‌شود و آغاز آبشستگی در دو طرف پایه را به دنبال دارد. به گفته Oliveto and Hager (2002) حرکت اولیه رسوب‌ها در دو طرف پایه در حدود ۷۰ درجه پایین دست محور آبراهه رخ می‌دهد و آبشستگی دماغه پایه همیشه با تاخیر آغاز می‌شود. با توسعه گودال آبشستگی گرداب نعل اسبی عامل اصلی آبشستگی در جلوی پایه می‌شود (Yang et al., 2020). با افزایش دبی در طول عبور آب نگار و قدرت گرفتن گردابه‌های نعل اسبی، آبشستگی به سمت دماغه پایه پیش روی می‌کند و بیشینه عمق آبشستگی در دماغه پایه شکل می‌گیرد. نتایج نشان داد که عمق آبشستگی کناره پایه برای زمان‌های تداوم ۱۰، ۲۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه به ترتیب در  $t/T_d < 0.35$ ،  $t/T_d < 0.36$ ،  $t/T_d < 0.4$ ،  $t/T_d < 0.4$ ،  $t/T_d < 0.32$  و  $t/T_d < 0.28$  بیش از عمق آبشستگی دماغه پایه می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش

ناهمواری‌های بستر بود و از طریق یک نرم‌افزار رابط توسط رایانه اجرا می‌شد. داده‌های برداشت شده توسط دستگاه به صورت فایل اکسل به رایانه منتقل می‌شد. نمایی از پایه استوانه‌ای مدرج و آبشستگی پیرامون آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### ۳-۲- تحلیل ابعادی

برای انجام تحلیل ابعادی فراسنجه‌های تاثیرگذار بر عمق آبشستگی در شرایط جریان ناماندگار به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته شد.

$$ds = f(D, U_p, U_b, h_p, h_b, \rho, \rho_s, \sigma, \theta, t, T_d, T_p, U_c, g, d_{50}) \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $U_b$  سرعت جریان در دبی پایه آب نگار،  $U_p$  سرعت جریان در اوج آب نگار،  $\rho_s$  چگالی رسوب،  $\theta$  لزوجت جنبشی و  $t$  زمان از آغاز آزمایش می‌باشد. تحلیل ابعادی با استفاده از نظریه باکهنینگام انجام شد و فراسنجه‌های بی بعد به صورت رابطه (۳) به دست آمد.

$$d_s/D = f\left(\frac{U_b}{U_c}, \frac{U_p}{U_c}, \frac{\rho_s}{\rho} = G_s, \sigma, \frac{T_p}{T_d}, \frac{t}{T_d}, \frac{t}{T_p}, Fr_b, Fr_p, Re_b, Re_p\right) \quad (3)$$

در این تحقیق میزان‌های  $G_s$  و  $\sigma$  ثابت هستند. فراسنجه‌های  $Fr_p$  و  $Fr_b$  به ترتیب معرف عدد فرود جریان در شرایط پایه و اوج و فراسنجه‌های  $Re_p$  و  $Re_b$  به ترتیب معرف عدد رینولدز در شرایط پایه و اوج آب نگار هستند که در همه آب نگارها میزان ثابتی داشتند زیرا مقادیر دبی و عمق جریان در شرایط پایه و اوج همه آب نگارهای این تحقیق ثابت بود. با حذف فراسنجه‌های ثابت و ادغام برخی از فراسنجه‌ها با یکدیگر در نهایت فراسنجه‌های بی بعد تاثیرگذار در شرایط جریان ناماندگار به صورت رابطه (۴) حاصل شد.

$$d_s/D = f\left(\frac{t}{T_d}, \frac{T_p}{T_d}, \frac{U_p T_p}{h_p} = T^*\right) \quad (4)$$

در رابطه بالا فراسنجه  $T^*$  مقیاس زمانی آب نگار است که توسط Hakim et al. (2022) معرفی شده است.

Hager and Unger (2010) بر روی آبشستگی پایه پل در جریان ناماندگار نیز نتیجه همانندی گزارش شده است. در بررسی‌های Farshad (2023) بر روی آبشستگی آبشکن تیغه‌ای در جریان ناماندگار، رخداد بیشینه عمق آبشستگی ۱۳ درصد پس از زمان اوج آب‌نگار نرمال گزارش شده است.

زمان تداوم آب‌نگار بیشینه عمق آبشستگی به دماغه پایه زودتر نزدیک می‌شود. شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد بیشینه عمق آبشستگی بعد از دبی اوج آب‌نگار و در ابتدای شاخه‌ی افتان رخ می‌دهد. محاسبات نشان داد بیشینه عمق آبشستگی در آب‌نگارهای نرمال ۱۰ درصد پس از زمان اوج آب‌نگار رخ می‌دهد. در بررسی‌های

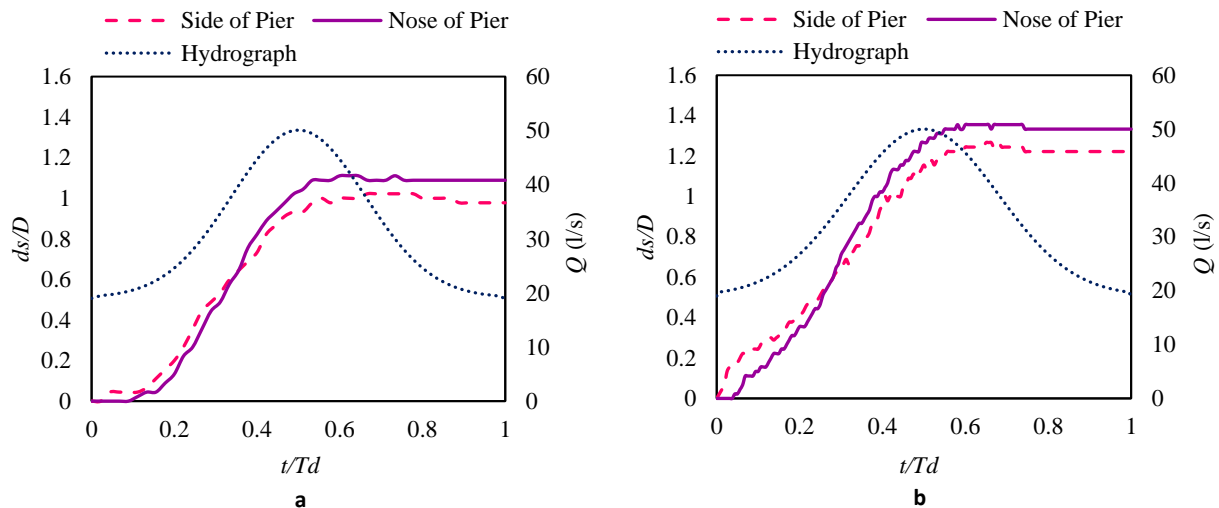


Fig 5 Temporal variations of scouring depth on the side and nose of the cylindrical pier, a) 45 minutes duration, b) 160 minutes duration

شکل ۵ تغییرات زمانی عمق آبشستگی در کناره و دماغه پایه استوانه‌ای، الف) زمان تداوم ۴۵ دقیقه، ب) زمان تداوم ۱۶۰ دقیقه

انرژی است که از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$S_e = \frac{Q^2}{C^2 \times R_h \times A^2} \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $Q$  دبی جریان،  $A$  سطح مقطع جریان و  $C$  ضریب شزی است. سرعت برشی به روش آزمون و خطا محاسبه شد. به این صورت که در آغاز با حدس یک میزان اولیه برای ضریب شزی، سرعت برشی با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۵) محاسبه شد و میزان به دست آمده در معادله لگاریتمی نیمرخ سرعت (رابطه ۷) قرار داده شد تا میزان ضریب شزی جدیدی به دست آید. پس از آن سرعت برشی با ضریب شزی به دست آمده از رابطه (۷) دوباره محاسبه شد و مرحله‌های پیشین تا جایی تکرار شد که اختلاف بین دو میزان سرعت برشی متوالی ناچیز شود. در نهایت با محاسبه میزان‌های سرعت برشی در طول زمان تداوم آب‌نگار، تغییرات زمانی تنش برشی بر مبنای رابطه (۵) برآورد شد.

### ۲-۳- بررسی تاثیر زمان شاخه‌های خیزان و

#### افتان آب‌نگار بر آبشستگی

تغییرات دبی جریان در طول شاخه خیزان آب‌نگار منجر به تغییرات زمانی تنش برشی اعمالی به بستر می‌شود. بسته به شدت تغییرات دبی، شدت تغییرات تنش برشی نیز متفاوت بوده و تاثیر بسیاری در روند تغییرات زمانی عمق آبشستگی دارد. به همین دلیل برای بررسی روند تغییرات زمانی عمق آبشستگی، در آغاز تغییرات زمانی تنش برشی در طول زمان تداوم آب‌نگارهای با زمان تداوم ثابت و زمان اوج مختلف بررسی شد. در اینجا تنش برشی در بالادست پایه مقصود می‌باشد و نه در پیرامون پایه. بدین منظور در آغاز، سرعت برشی در طول زمان آب‌نگار با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد (Bajestan, 2016).

$$U_* = \sqrt{\tau / \rho} = \sqrt{R_h g S_e} \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $U_*$  سرعت برشی،  $\tau$  تنش برشی بستر،  $R_h$  شعاع هیدرولیکی (در بالادست پایه پل) و  $S_e$  شیب خط

**جدول ۲** نرخ تغییرات آبستگي در مقابل نرخ تغییرات تنش برشی در طول شاخه خیزان آب نگار

**Table 2** The rate of variations of scour versus the rate of variations of shear stress along the hydrograph's rising limb

$T_p$ (min)	$\Delta\tau/\Delta T_p$	$\Delta ds/\Delta T_p$
10	0.0221	0.37
20	0.0111	0.24
40	0.0055	0.13
60	0.0037	0.09
80	0.0028	0.07
90	0.0025	0.06

بیرون از حفره آبستگي منتقل کند، بنابراین این ذرات درون حفره ته‌نشین می‌شوند و عمق آبستگي در پایان آزمایش را کاهش می‌دهند. این مسئله در آب نگارهای با چولگی به راست به دلیل افت سریع دبی جریان و نبود زمان کافی برای تثبیت بیشینه عمق آبستگي در مقایسه با آب نگارهای با چولگی به چپ بیشتر نمایان می‌شود. میانگین میزان کاهش عمق آبستگي در نتیجه ته‌نشینی ذرات رسوبی معلق درون حفره آبستگي برای آب نگارهای با چولگی به راست حدود ۵ درصد قطر پایه و برای آب نگارهای با چولگی به چپ حدود ۲ درصد قطر پایه است. در بررسی‌های Tabarestani and Zarrati (2017) بر روی پایه مستطیلی، بیشینه کاهش عمق ناشی از ته‌نشینی رسوب‌ها ۵ درصد عرض پایه گزارش شد. شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد بیشینه عمق آبستگي برای آب نگارهایی با زمان تداوم و دبی اوج همانند تا حدودی برابر است و زمان رسیدن به اوج آب نگار تاثیر چندانی در بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه ندارد. نتایج همانندی در بررسی‌های Chang et al. (2004)، Borghei et al. (2012) و Shaker et al. (2020) یافت می‌شود.

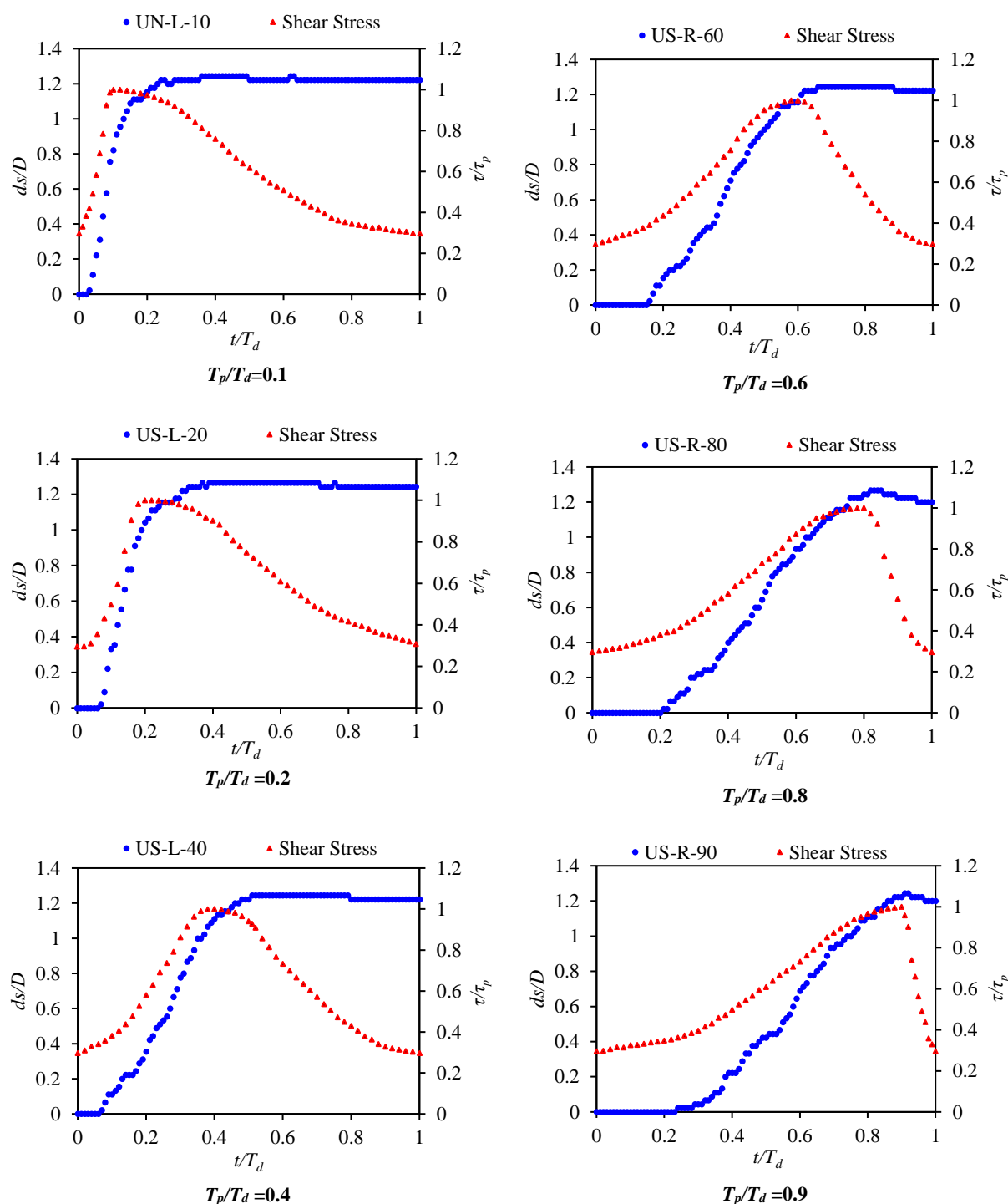
به منظور بررسی اثر شاخه افتان آب نگار بر بیشینه عمق آبستگي، مقادیر بیشینه عمق آبستگي و عمق آبستگي در اوج برای آب نگارهای با چولگی‌های مختلف مقایسه شد. محاسبه‌ها نشان داد که بیشینه عمق آبستگي در آب نگارهای با چولگی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ به ترتیب ۵۱/۳۵، ۲۱/۲۸، ۱۲، ۵/۵۶ و ۱/۷۹ درصد

$$C = 18 \log \left( \frac{12R_h}{d_{50} + \frac{3.3v}{U_*}} \right) \quad (7)$$

شکل ۶ تغییرات زمانی تنش برشی بستر و عمق آبستگي در دماغه پایه استوانه‌ای را به ازای آب نگارهای با زمان تداوم ثابت ۱۰۰ دقیقه و  $T_p/T_d$  های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل محور عمودی سمت راست نشان‌دهنده تنش برشی بی‌بعد بستر ( $\tau/\tau_p$ ) که در آن  $\tau_p$  تنش برشی در اوج آب نگار می‌باشد) و محور عمودی سمت چپ نشان‌دهنده عمق آبستگي بی‌بعد ( $ds/D$ ) می‌باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که روند تغییرات زمانی تنش برشی و عمق آبستگي در طول شاخه خیزان آب نگار همانند یکدیگر می‌باشند. با کاهش زمان شاخه خیزان، شیب منحنی تغییرات زمانی تنش برشی افزایش شدیدی پیدا می‌کند و در بازه زمانی کوتاه‌تری به بیشینه میزان خود می‌رسد. این مسئله باعث می‌شود نرخ آبستگي جلوی پایه نیز به سرعت افزایش یابد. در مقابل با افزایش زمان شاخه خیزان، شدت تغییرات تنش برشی کاهش یافته و با شیب ملایم‌تری افزایش می‌یابد. لذا نرخ آبستگي جلوی پایه نیز کاهش یافته و بیشینه عمق آبستگي با تاخیر بیشتری رخ می‌دهد.

نرخ تغییرات زمانی تنش برشی و عمق آبستگي در طول شاخه خیزان آب نگار در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول فراسنجه  $\Delta\tau/\Delta T_p$  معرف نرخ تنش برشی در طول شاخه خیزان آب نگار و فراسنجه  $\Delta ds/\Delta T_p$  نرخ آبستگي متناظر می‌باشد. مشاهده می‌شود با کاهش زمان شاخه خیزان آب نگار از ۹۰ دقیقه به ۱۰ دقیقه، نرخ تغییرات تنش برشی ۹ برابر افزایش و نرخ آبستگي حدود ۶ برابر افزایش می‌یابد.

شکل ۶ نشان می‌دهد با افزایش زمان شاخه خیزان آب نگار، استمرار بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و عمق آبستگي در پایان آزمایش کمتر از بیشینه عمق گردابه‌های نعل اسبی پیرامون پایه ضعیف می‌شود و جریان قادر نیست رسوب‌های معلق پیرامون پایه را به آبستگي می‌شود. با کاهش دبی در انتهای آب نگار قدرت



**Fig 6** Temporal variations of scour depth and bed shear stress in hydrographs with different  $T_p/T_d$

شکل ۶ تغییرات زمانی عمق آبشستگی و تنش برشی بستر در آب‌نگارهای با  $T_p/T_d$  مختلف

آب‌نگار افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش زمان شاخه خیزان آب‌نگار، جریان فرصت کافی برای حفر بیشتر بستر رسوبی را ندارد و با توجه به عدم تعادل عمق آبشستگی در دبی اوج، امکان رشد آبشستگی برای دبی‌های نزدیک به دبی اوج در آغاز زمان شاخه افتان آب‌نگار وجود دارد. از

بیش از عمق آبشستگی در دبی اوج می‌باشد. نتایج به دست آمده تاثیر زمان شاخه افتان آب‌نگار را بر میزان بیشینه عمق آبشستگی در آب‌نگارهای با چولگی به چپ نشان می‌دهد. می‌توان گفت در یک زمان تداوم ثابت، با کاهش زمان رخداد اوج آب‌نگار اثر گذاری شاخه افتان

است. در این جدول عبارت  $T_d$  % معرف درصد بازه‌های زمانی مختلف آب نگار است. نتایج نشان می‌دهد برای آب نگارهایی با چولگی ۰/۱ و ۰/۲ بیشترین رشد آبشستگی در ۴۰ درصد آغازین زمان تداوم آب نگار رخ داده است. برای آب نگارهایی با چولگی ۰/۴ و توزیع نرمال در بازه زمانی بین ۲۰ تا ۶۰ درصد از زمان تداوم آب نگار، برای آب نگار با چولگی ۰/۶ در بازه زمانی بین ۳۰ تا ۷۰ درصد از زمان تداوم آب نگار و برای آب نگارهایی با چولگی ۰/۸ و ۰/۹ به ترتیب در بازه‌های زمانی بین ۴۰ تا ۹۰ و ۵۰ تا ۱۰۰ درصد از زمان تداوم آب نگار بیشترین رشد آبشستگی رخ داده است. نتایج حاصل تاثیر چولگی آب نگار بر روی تغییرات زمانی عمق آبشستگی را به خوبی نشان می‌دهد. در بررسی‌های Farshad (2023) برای آب نگارهایی با چولگی ۰/۳۳، ۱۰۰ درصد توسعه عمق آبشستگی در ۵۰ درصد آغازین زمان تداوم آب نگار، در آب نگارهایی با توزیع نرمال بیشترین توسعه آبشستگی در مدت زمان بین ۲۵ تا ۶۵ درصد از زمان تداوم آب نگار و در آب نگارهایی با چولگی ۰/۶۶ در مدت زمان بین ۳۳ تا ۷۵ درصد از زمان تداوم آب نگار گزارش شده است.

سوی دیگر، رسوب‌هایی که تحت تنش بیشینه در دبی اوج از دیواره حفره آبشستگی جدا شده و درون حفره به صورت معلق درآمدند نیز در آغاز شاخه افتان آب نگار توسط جریان از حفره خارج می‌شوند. این دو عامل می‌تواند موجب افزایش عمق آبشستگی پس از رخداد دبی اوج آب نگار شود.

مقایسه بیشینه عمق آبشستگی در آزمایش‌های US-N-20 و US-L-10، US-N-45 و US-L-20 و US-N-80 و US-L-40 با شاخه خیزان یکسان و زمان تداوم متفاوت نشان داد به ترتیب با افزایش ۹، ۴ و ۱/۵ برابری زمان شاخه افتان آب نگار، بیشینه عمق آبشستگی ۳۰/۲۳، ۱۴ و ۱/۸۲ درصد افزایش می‌یابد. این نتیجه با یافته‌های Tabarestani and Zarrati (2017) در مورد افزایش عمق حفره آبشستگی با افزایش نسبت زمان شاخه افتان به زمان شاخه خیزان آب نگار همخوانی دارد اما با یافته‌های Chang et al. (2004) و Lai et al. (2009) در مورد ناچیز دانستن تاثیر شاخه افتان آب نگار همخوانی ندارد.

تاثیر بازه‌های زمانی مختلف آب نگار بر توسعه عمق آبشستگی پیرامون پایه برای آب نگارهای با زمان تداوم ۱۰۰ دقیقه و چولگی‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده

جدول ۳ درصد عمق آبشستگی در بازه‌های زمانی مختلف آب نگار با زمان تداوم ۱۰۰ دقیقه و چولگی‌های مختلف

Table 3 Scouring depth percentage in different time intervals of the hydrograph with a duration time of 100 minutes and different skewness

%T <sub>d</sub>	T <sub>p</sub> /T <sub>d</sub>						
	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9
10	66.07	26.32	8.93	3.51	0	0	0
20	92.86	82.46	28.57	12.28	12.28	0	0
30	98.21	92.98	62.5	38.60	29.82	15.79	3.571
40	100	100	89.29	70.18	56.14	31.58	17.857
50	98.21	100	96.43	91.23	78.95	50.88	33.929
60	98.21	100	100	100	91.23	73.68	55.357
70	98.21	100	98.21	98.25	98.25	87.72	75
80	98.21	98.246	96.43	98.25	100	98.25	89.29
90	98.21	98.246	96.43	96.49	96.491	100	98.21
100	98.21	98.246	96.43	96.49	96.491	94.737	100

ازای آب نگارهای با زمان تداوم مختلف نشان می‌دهد. در این شکل از فراسنجه بی بعد  $T^*$  جهت بی بعد کردن شکل استفاده شده است. محور عمودی شکل نشان دهنده

### ۳-۳- بررسی تاثیر زمان تداوم آب نگار

#### ۳-۳-۱- بیشینه عمق آبشستگی

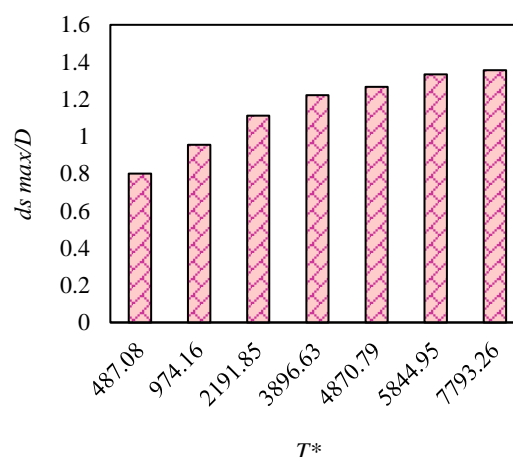
شکل ۷ تغییرات بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه را به

را به ازای آب‌نگارهای با زمان‌های تداوم مختلف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که زمان تداوم آب‌نگار بر روی شیب روند تغییرات زمانی عمق آبشستگی موثر است. با افزایش زمان تداوم آب‌نگار شیب منحنی تغییرات زمانی آبشستگی کاهش می‌یابد، یعنی تغییرات عمق آبشستگی در بازه زمانی طولانی‌تری رخ می‌دهد. در بررسی‌های Abolfathi et al. (2021) و همچنین Farshad (2023) نیز چنین نتیجه‌ای به دست آمده است. در واقع شیب منحنی تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای آب‌نگارهای کوتاه مدت مانند زمان تداوم ۱۰ دقیقه بسیار شدیدتر از آب‌نگارهای طولانی مدت مانند زمان تداوم ۱۶۰ دقیقه می‌باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق دبی‌های پایه و اوج در همه آزمایش‌ها ثابت می‌باشد، لذا میزان تغییرات دبی در شاخه خیزان آب‌نگار ثابت است. با کاهش زمان تداوم آب‌نگار تغییرات دبی در بازه زمانی کوتاه‌تری رخ می‌دهد. این امر موجب افزایش شدت تغییرات دبی در طول شاخه خیزان شده و به دنبال آن قدرت گردابه‌های پیرامون پایه و شدت تنش برشی اعمالی به بستر به سرعت افزایش می‌یابد. در نتیجه ذرات پیرامون پایه با سرعت بیشتری شسته شده و عمق آبشستگی سریع‌تر افزایش می‌یابد و شیب منحنی تغییرات زمانی آبشستگی افزایش شدیدی پیدا می‌کند. محاسبه‌ها نشان داد با کاهش زمان تداوم آب‌نگار از ۱۶۰ به ۱۰ دقیقه نرخ آبشستگی حدود ۹ برابر افزایش می‌یابد.

### ۳-۳-۳ نیمرخ عرضی و طولی حفره آبشستگی

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نیمرخ‌های عرضی و طولی حفره آبشستگی را به ازای زمان‌های تداوم مختلف آب‌نگار نشان می‌دهد. در شکل ۹ محور عمودی نشان‌دهنده تراز بستر رسوبی ( $Z$ ) و محور افقی نشان‌دهنده عرض بستر رسوبی ( $Y$ ) می‌باشد و در شکل ۱۰ محور عمودی نشان‌دهنده تراز بستر رسوبی ( $Z$ ) و محور افقی نشان‌دهنده طول بستر رسوبی ( $X$ ) می‌باشد. شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش زمان تداوم آب‌نگار علاوه بر افزایش بیشینه عمق آبشستگی، عرض حفره آبشستگی نیز گسترش می‌یابد. در زمان‌های تداوم کوتاه‌تر مانند ۲۰ و ۴۵ دقیقه،

بیشینه عمق آبشستگی بی‌بعد شده با قطر پایه ( $ds$ ) می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش  $T^*$  بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. در بررسی‌های Hakim et al. (2022) بر روی تکیه‌گاه جانبی نیز نتایج همانندی یافت می‌شود. با افزایش  $T^*$  که در نتیجه افزایش زمان تداوم آب‌نگار صورت می‌گیرد، مدت زمانی که ذرات رسوبی بستر تحت تاثیر تنش برشی بالاتر از آستانه حرکت قرار می‌گیرند، بیشتر شده و فرصت بیشتری برای کندن ذرات بستر پیرامون پایه و انتقال آن‌ها به پایین دست ایجاد می‌شود، لذا عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. محاسبه‌ها نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی به ازای آب‌نگارهای با  $T^*$  برابر با ۹۷۴/۱۶، ۲۱۹۱/۸۵، ۳۸۹۶/۶۳، ۴۸۷۰/۷۹، ۵۸۴۴/۹۵ و ۷۷۹۳/۲۶ (معادل با آب‌نگارهای با زمان تداوم ۲۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه) به ترتیب ۱۹/۴۴، ۳۸/۸۹، ۵۲/۷۸، ۵۸/۳۳، ۶۶/۶۷ و ۶۹/۴۴ درصد بیش از عمق آبشستگی به ازای  $T^*$  برابر با ۴۷۸/۰۸ (معادل با زمان تداوم ۱۰ دقیقه) است. مشاهده می‌شود با افزایش  $T^*$  روند افزایش بیشینه عمق آبشستگی ملایم‌تر می‌شود و این به دلیل این است که آبشستگی در پیرامون پایه به تعادل نزدیک‌تر می‌شود.

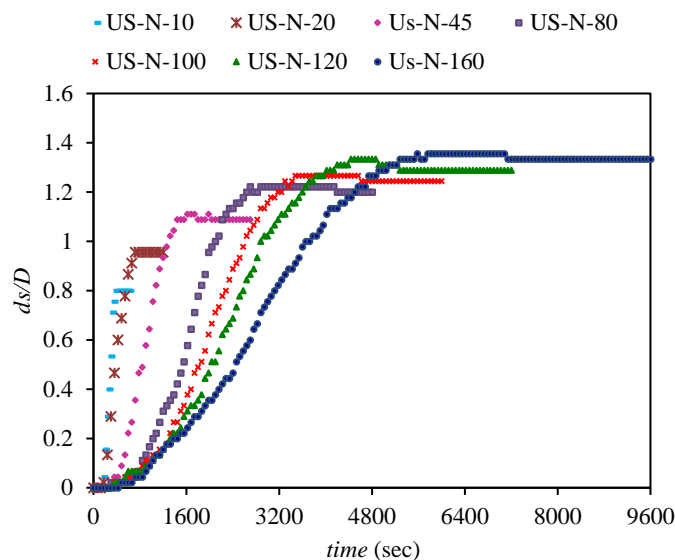


**Fig 7** The maximum dimensionless scour depth around the cylindrical pier for Hydrographs with different  $T^*$

**شکل ۷** بیشینه عمق آبشستگی بی‌بعد پیرامون پایه استوانه‌ای به ازای آب‌نگارهایی با  $T^*$  مختلف

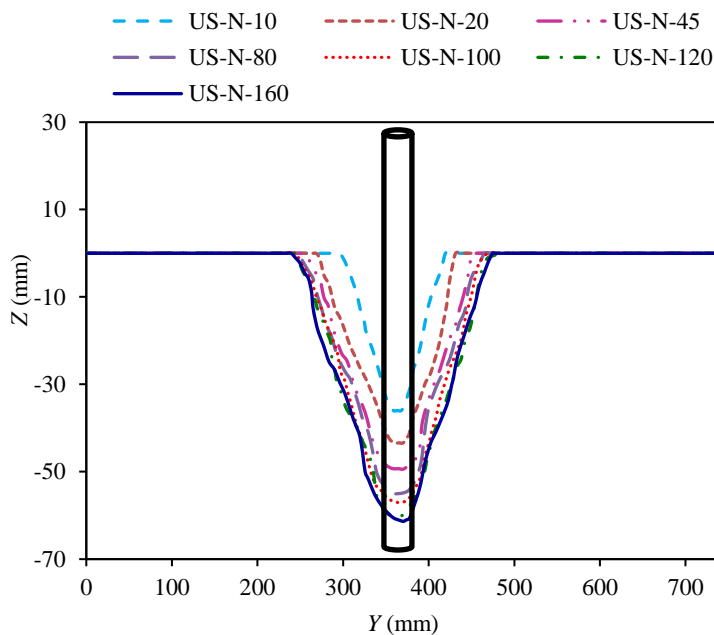
### ۳-۳-۲- شیب منحنی تغییرات زمانی عمق آبشستگی

شکل ۸ تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون تک پایه



**Fig 8** Temporal variations of scouring around the cylindrical pier with Gaussian distribution hydrographs and different durations

شکل ۸ تغییرات زمانی آبشستگی پیرامون پایه استوانه‌ای به ازای آب نگارهای با توزیع گوسی و زمان تداوم‌های مختلف



**Fig 9** Cross-sectional profile of scour hole at the location of the maximum scour depth for different duration times of hydrographs

شکل ۹ نیمرخ عرضی حفره آبشستگی در مقطع بیشترین عمق آبشستگی به ازای زمان‌های تداوم مختلف آب نگار

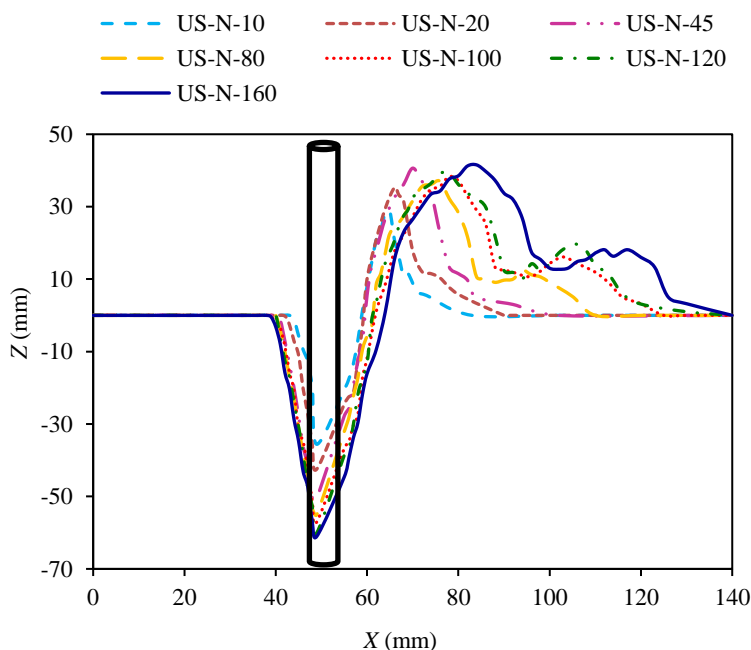
حفره آبشستگی در جلوی پایه برای زمان‌های تداوم ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه تا حدودی با هم برابر است که نشان می‌دهد رشد آبشستگی با گسترش حفره آبشستگی کاهش می‌یابد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزون بر نیمرخ عرضی جلوی پایه، ابعاد حفره آبشستگی در پشت پایه و همچنین ابعاد

ابعاد حفره آبشستگی در جهت‌های عمقی و عرضی تا حدودی به یک اندازه گسترش می‌یابد و عرض حفره آبشستگی شکل پهن‌تر و بزرگ‌تری به خود می‌گیرد. در زمان‌های تداوم بزرگ‌تر، گسترش عمقی حفره آبشستگی بیش از گسترش عرضی آن بوده و حفره آبشستگی با افزایش زمان تداوم شکل گودتری به خود می‌گیرد. عرض

حفره آبشستگی تا حدودی ثابت باقی می‌ماند. با افزایش بیشتر زمان تداوم، ارتفاع پشته رسوبی به نسبت ثابت بوده اما ابعاد پشته رسوبی بزرگ‌تر شده و محل قله آن در فاصله‌ی دورتری پایین دست پایه شکل می‌گیرد.

پشته رسوبی نیز متأثر از زمان تداوم آب نگار می‌باشد. با افزایش تداوم آب نگار عمق حفره در پشت پایه افزایش یافته و شیب پایین دست حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. با افزایش زمان تداوم تا ۴۵ دقیقه، ارتفاع پشته رسوبی پایین دست پایه افزایش می‌یابد، اما شیب پایین دست



**Fig 10** Longitudinal profile of scour hole in the central axis of the flume for different duration of hydrograph  
 شکل ۱۰ نیمرخ طولی حفره آبشستگی در محور مرکزی فلوم به ازای زمان‌های تداوم مختلف آب نگار

عمق آبشستگی به اوج آب نگار نزدیک‌تر می‌شود. بررسی اثر شاخه افتان آب نگار بر روی بیشینه عمق آبشستگی نشان داد در یک زمان تداوم ثابت با کاهش زمان شاخه خیزان آب نگار اثر گذاری شاخه افتان بر روی بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد در آب نگارهایی با زمان اوج یکسان اما زمان تداوم متفاوت نیز زمان شاخه افتان بر مقدار بیشینه عمق آبشستگی موثر است، به عنوان مثال با ۹ برابر شدن زمان شاخه افتان آب نگار، عمق آبشستگی حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. بررسی زمان تداوم آب نگار نشان داد افزایش زمان تداوم موجب افزایش عمق و ابعاد حفره آبشستگی پیرامون پایه می‌شود. با افزایش زمان آب نگار از ۱۰ به ۱۶۰ دقیقه بیشینه عمق آبشستگی حدود ۷۰ درصد افزایش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آبشستگی پیرامون تک پایه استوانه‌ای در شرایط جریان ناماندگار بررسی و ارزیابی شد. به منظور بررسی تاثیر شاخه‌های خیزان و افتان آب نگار و همچنین زمان تداوم آب نگار بر روی توسعه زمانی و بیشینه عمق آبشستگی، ۱۳ آب نگار مختلف شبیه‌سازی شد. بررسی اثر شاخه خیزان آب نگار نشان داد در آب نگارهایی با زمان تداوم همانند، زمان رسیدن به اوج آب نگار تاثیری بر بیشینه عمق آبشستگی ندارد اما بر تغییرات زمانی تنش برشی و عمق آبشستگی به شدت تاثیر گذار است به طوری که با کاهش زمان شاخه خیزان آب نگار از ۹۰ دقیقه به ۱۰ دقیقه، نرخ تغییرات تنش برشی ۹ برابر افزایش و نرخ آبشستگی حدود ۶ برابر افزایش می‌یابد. با افزایش زمان شاخه خیزان آب نگار زمان رخداد بیشینه

$\rho_s$	چگالی رسوب ( $\text{kg/m}^3$ )
$g$	لزوجت جنبشی ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
<b>زیرنویس‌ها:</b>	
$b$	جریان پایه آب نگار
$p$	جریان اوج آب نگار

### ۶ - سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی می‌شود (SCU.WH99.31373).

### ۷ - منبع‌ها

Abolfathi, S., Kashefipour, S.M., Bajestan, M.S. & Fuhrman, D.R. (2021). Experimental investigation of the effect of hydrograph and steady flow properties on bridge group pier scouring for different spacing, *Journal of Hydraulics*, 16(2), 73-90. (In Persian)

Bajestan, M.S. (2016). Basic Theory and Practice of Hydraulics of Sediment Transport, Shahid Chamran University of Ahvaz, 549p. (In Persian)

Borghei, S.M., Kabiri-Samani, A. & Banihashemi, S.A. (2012). Influence of unsteady flow hydrograph shape on local scouring around bridge pier, In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 165(9), 473-480.

Chang, W.Y., Lai, J.S. & Yen, C.L. (2004). Evolution of scour depth at circular bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 905-913.

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

Farshad, R. (2023). Experimental investigation of the effect of hydrograph properties and geometric parameters of single spur dike on time development of scouring around the structure, PhD Thesis, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, 166p. (In Persian)

Gumgum, F. & Guney, M.S. (2020). Time dependent live-bed scour around circular piers under flood waves, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(1), 65-72.

Hager, W.H. & Unger, J. (2010). Bridge pier scour

افزون بر این شیب تغییرات زمانی عمق آبشستگی با افزایش زمان تداوم به علت طولانی شدن بازه تغییرات دبی در طول شاخه خیزان آب نگار کاهش می‌یابد.

### ۵ - فهرست نشانه‌ها

#### نشانه‌های انگلیسی:

$T_p$	زمان رسیدن به اوج آب نگار (min)
$T_d$	زمان تداوم آب نگار (min)
$t$	زمان از آغاز آزمایش (min)
$T^*$	مقیاس زمانی آب نگار
$d_{50}$	اندازه میانگین ذرات رسوبی (m)
$U$	سرعت میانگین جریان ( $\text{m/s}$ )
$U_c$	سرعت آستانه حرکت رسوب بستر ( $\text{m/s}$ )
$U_*$	سرعت برشی ( $\text{m/s}$ )
$G_s$	چگالی نسبی ذرات رسوبی
$g$	شتاب ثقل ( $\text{m/s}^2$ )
$Q$	دبی آب نگار ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$h$	عمق جریان (m)
$R_h$	شعاع هیدرولیکی (m)
$A$	سطح مقطع جریان ( $\text{m}^2$ )
$S_e$	شیب خط انرژی
$D$	قطر پایه (m)
$ds$	عمق آبشستگی (m)
$Fr$	عدد فرود
$Re$	عدد رینولدر
$\Delta \tau / \Delta T_p$	نرخ تنش برشی ( $\text{Pa/min}$ )
$\Delta ds / \Delta T_p$	نرخ آبشستگی ( $\text{cm/min}$ )

#### نشانه‌های یونانی:

$\sigma$	انحراف استاندارد هندسی
$\tau$	تنش برشی (Pa)
$\rho$	چگالی سیال ( $\text{kg/m}^3$ )

under flood waves, *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(10), 842-847.

Hakim, M., Bahrami Yarahmadi, M. & Kashefipour, S.M. (2022). Use of spur dikes with different permeability levels for protecting bridge abutment against local scour under unsteady flow conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(12), 1842-1854.

Kothyari, U.C., Garde, R.C.J. & Ranga Raju, K.G. (1992). Temporal variation of scour around circular bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8), 1091-1106.

Lai, J.S., Chang, W.Y. & Yen, C.L. (2009). Maximum local scour depth at bridge piers under unsteady flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(7), 609-614.

Lu, J.Y., Hong, J.H., Su, C.C., Wang, C.Y. & Lai, J.S. (2008). Field measurements and simulation of bridge scour depth variations during floods, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 810-821.

Melville, B.W. & Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), 59-65.

Melville, B.W. & Coleman, S.E. (2000). Bridge scour, Water Resources Publication, New Zealand, 550p.

Oliveto, G. & Hager, W.H. (2002). Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), 811-820.

Raudkivi, A.J. & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers, *Journal of hydraulic engineering*, 109(3), 338-350.

Shaker, E., Kashefipour, S.M. & Bajestan, M.S. (2020). Experimental investigation on the influence of some unsteady flow parameters on bed scour under the pipeline crossing across the current, *Journal of Water and Soil Science*, 23(4), 83-98. (In Persian)

Tabarestani, M.K. & Zarrati, A.R. (2017). Local scour calculation around bridge pier during flood event, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 1462-1472.

Yang, Y., Qi, M., Wang, X. & Li, J. (2020). Experimental study of scour around pile groups in steady flows. *Ocean Engineering*, 195, 106651, doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106651.