Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics

Research Article
https://doi.org

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[1], Seyed Mahmoud Kashefipour[2*], Mehdi Ghomeshi[3], Mohammad Bahrami Yarahmadi[4]

1- Ph.D Candidate, Department 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- Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
4- Assistant Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Abstract

Introduction: For a bridge pier in the flow path, a three-dimensional and complex flow pattern is formed around the pier leading to the formation of a scour hole around it. The development of the scour hole will cause the instability of the bridge pier and ultimately the destruction of the pier and the bridge. This problem becomes very important during the floods, when the flow in the river increases rapidly and has the highest potential of destruction. Most studies have investigated scouring in steady flow conditions, while the occurrence of flood changes the natural conditions of the river and leads to the formation of an unsteady flow that quickly changes the pattern of speed and shear stress around the pier and affects the scour depth (Shaker et al., 2020). The maximum scour depth that occurs under a flood hydrograph can be much smaller than the equilibrium depth resulting from steady flow under peak discharge conditions (Kothyari et al., 1992; Lai et al., 2009). Therefore, the use of flood peak discharge for design can greatly overestimate the maximum scour depth compared to the actual flood conditions (Chang et al., 2004). Considering the importance of scouring investigation in the conditions of unsteady flow and the limited available studies in this regard, more research in this field is necessary. The purpose of this research is to investigate the effect of the time of the rising and falling limbs of the hydrograph, as well as the duration of the hydrograph on the temporal variations of scour depth and its maximum value around the 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 d50=0.7 mm and geometric standard deviation σ=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 (Tp) to the duration time (Td) of the hydrograph (skewness) equal to 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 0.9 were designed. Also, 7 hydrographs with Gaussian distribution and duration times of

10, 20, 45, 80, 100, 120 and 160 were simulated to investigate the effect of flood duration on scouring (Fig. 3 and Table 1). A hydrograph generation system was used to create unsteady flow in the flume. This system included a programmed inverter that was used to adjust the variable flow rate of the hydrograph. The inverter was connected to the pump on one side and to the electromagnetic flow meter on the other side and was run by a computer through a software.

Results and discussion: The results of the temporal variations of scouring showed that scouring starts from the sides of the pier and reaches the nose of the pier over time, and finally, the maximum depth of scouring occurs in the nose of the pier. The results showed that the maximum scour depth in the hydrograph with a Gaussian distribution occurs after the peak time (about 10% of duration time) (Fig. 5). Investigating of the effect of the rising limb of the hydrograph showed that in hydrographs with similar duration, the time to reach the peak of the hydrograph has no effect on the maximum scour depth, but it has a significant effect on the temporal changes of shear stress and scour depth (Fig. 6). By reducing the time of the rising limb of the hydrograph from 90 minutes to 10 minutes, the shear stress change rate increases 9 times and the scouring rate increases about 6 times. Investigating the effect of the falling limb of the hydrograph on the maximum scour depth showed that the effect of the falling limb on the maximum scour depth increases with the decrease of the time of the rising limb of the hydrograph. The results also showed that the maximum scour depth in hydrographs with skewness of 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 is 51.35, 21.28, 12, 5.56 and 1.79 percent more than the scour depth at peak discharge, respectively. It was also observed that in hydrographs with the same peak time but different duration time, the time of the falling limb is effective on the value of the maximum scour depth. With the increase of 9, 4, and 1.5 times the time of the falling limb of the hydrograph, the maximum scour depth increases by 30.23, 14, and 1.82 percent, respectively. Investigating the duration time of the hydrograph showed that the increase in the duration time increases the depth and dimensions of the scour hole around the pier. It was observed that the maximum scour depth for hydrographs with a duration of 20, 45, 80, 100, 120 and 160 minutes were 19.44, 38.89, 52.78, 58.33, 66.67 and 69.44% more than a hydrograph with a duration of 10 minutes, respectively (Fig. 7). In addition, the slope of the time variations of the scour depth decreases with the increase of the duration time due to the lengthening of the flow rate changes interval along the rising limb of the hydrograph (Fig. 8).

Conclusion: In this study, scouring around a cylindrical pier was investigated under unsteady flow conditions. The results showed that for hydrographs with similar peak discharge and duration time, the time of the rising limb of the hydrograph has a significant effect on the temporal variation of shear stress and scour depth, but it has almost no effect on the maximum scour depth. In addition, it was found that by reducing the time of the rising limb, the influence of the falling limb of the hydrograph on the maximum scour depth increases. Investigating the results of the effect of hydrograph duration time on local scour showed that with the increase of hydrograph duration time, the maximum scour depth increases and the slope of temporal variations of scour depth decreases.

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

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک

مقاله پژوهشی
https://doi.org/

بررسی آزمایشگاهی اثر هیدروگراف‌های دارای چولگی و زمان تداوم متفاوت بر تغییرات زمانی آبشستگی پیرامون تک پایه استوانه‌ای

لیلا هاشمی[۱]، سید محمود کاشفی پور[۲]*، مهدی قمشی[۳]، محمد بهرامی یاراحمدی[۴]

۱- دانشجوی 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- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۴- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده: آبشستگی بیش از حد در هنگام سیلاب به عنوان تهدیدی برای پایداری سازه‌های واقع در بستر فرسایش‌پذیر به شمار می‌رود. در این تحقیق به بررسی آبشستگی پیرامون تک پایه استوانه‌ای در شرایط جریان غیرماندگار با شبیه‌سازی هیدروگراف‌های مختلف پرداخته شد. اثرات شاخه‌های خیزان و افتان هیدروگراف و همچنین زمان تداوم هیدروگراف بر روی توسعه زمانی عمق آبشستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای هیدروگراف‌های با دبی پیک و زمان تداوم مشابه، زمان شاخه خیزان هیدروگراف بر روی توسعه زمانی تنش برشی و عمق آبشستگی به شدت تاثیرگذار است اما روی حداکثر عمق آبشستگی تاثیر ناچیزی دارد. با کاهش زمان شاخه خیزان، اثرگذاری شاخه افتان هیدروگراف بر روی حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج نشان داد که با افزایش زمان تداوم هیدروگرف از ۱۰ دقیقه به ۱۶۰ دقیقه حداکثر عمق آبشستگی ۶۹/۴۴ درصد افزایش و شیب تغییرات زمانی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

کلید واژگان: آبشستگی موضعی، جریان غیرماندگار، تغییرات زمانی، تک پایه استوانه‌ای

۱- مقدمه

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

تاکنون مطالعات زیادی به‌منظور ارائه رابطه‌ای جهت تخمین حداکثر عمق آبشستگی پیرامون پایه‌های پل توسط محققین مختلف انجام شده است و از این روابط به طور گسترده برای طراحی پایه پل استفاده می‌شود. در این روابط دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت مشخص به عنوان دبی طراحی در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در حین وقوع سیلاب ممکن است زمان استمرار پیک جریان در مقایسه با جریان ماندگار کم‌تر باشد و حداکثر عمق آبشستگی ناشی از عبور هیدروگراف سیل کم‌تر از عمق تعادلی ناشی از جریان ماندگار شود (Kothyari et al., 1992; Lai et al., 2009). بنابراین استفاده از دبی پیک سیلاب برای طراحی می‌تواند حداکثر عمق آبشستگی را در مقایسه با شرایط واقعی وقوع سیلاب تا مقدار زیادی بیش از حد برآورد کند (Chang et al., 2004). این نتیجه توسط Lu et al. (2008) با مقایسه داده‌های میدانی آبشستگی موضعی و

مقادیر محاسبه شده با استفاده از فرمول‌های رایج آبشستگی تعادلی تایید شده است.

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 وقوع سیلاب

با توجه به اهمیت پدیده آبشستگی، محققان زیادی در دهه-های اخیر آبشستگی پیرامون پایه پل را از جنبه‌های مختلفی مانند حداکثر عمق آبشستگی، توسعه زمانی آبشستگی، رسوبات بستر یکنواخت و غیر یکنواخت و شرایط آب زلال و بستر زنده مورد بررسی قرار داده‌اند. مروری بر این مطالعات نشان می‌دهد که اکثر آن تحقیقات در شرایط جریان ماندگار صورت گرفته است. وقوع 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 غیرماندگار می‌شود که الگوی سرعت و تنش برشی در اطراف پایه را به سرعت تغییر می‌دهد و بر عمق آبشستگی تاثیر می‌گذارد. بر اساس مطالعه Kothyari et al. (1992) هنگامی که صحبت از ناپایداری جریان است، اثر زمان بر آبشستگی و تغییرات زمانی عمق آبشستگی اهمیت پیدا می‌کند و ابزاری برای تخمین عمق آبشستگی در شرایط جریان غیرماندگار می‌شود. بر این اساس ایشان تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون پایه استوانه‌ای را با بکارگیری طرح هیدروگراف پله‌ای مورد بررسی قرار دادند. در این طرح عمق آبشستگی در هر پله با بکارگیری رابطه جریان ماندگار ارائه شده توسط ایشان برآورد شده و از مجموع عمق‌های آبشستگی در هر پله، عمق آبشستگی در شرایط جریان غیرماندگار حاصل می‌شد. Chang et al. (2004) آبشستگی پیرامون پایه استوانه‌ای در شرایط جریان غرماندگار را توسط هیدروگراف‌های پله‌ای با زمان تداوم ثابت ۷ ساعت، ۳ دبی پیک مختلف و سه زمان رسیدن به پیک متفاوت مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان بیان کردند عمق آبشستگی در طول شاخه خیزان هیدروگراف به طور پیوسته افزایش می‌یابد اما در طول شاخه افتان تغییرات ناچیزی دارد. ایشان نیز مانند Kothyari et al. (1992) بر اساس مدل هیدروگراف پله‌ای به بررسی تغییرات زمانی عمق آبشستگی در جریان غیرماندگار پرداختند. Lu et al. (2008) با مطالعه 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 نسبتاً وسیع بین پایه‌های پل، تنها حدود ۵ درصد از کل عمق آبشستگی مربوط به آبشستگی انقباضی می‌باشد. Lai et al. (2009) اثر شاخه خیزان هیدروگراف بر روی حداکثر عمق آبشستگی را در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار دادند و رابطه‌ای برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی در شرایط جریان غیرماندگار ارائه دادند. در رابطه پیشنهادی ایشان، اثر ناپایداری جریان توسط یک پارامتر جریان ناپایدار که ترکیبی از شدت پیک جریان و زمان رسیدن به پیک است، در نظر گرفته شد. ایشان با بیان این‌که شاخه افتان هیدروگراف تنها نقش کوچکی در فرآیند آبشستگی ایفا می‌کند، عمق آبشستگی در پیک جریان را به عنوان حداکثر عمق آبشستگی تحت یک هیدروگراف سیلاب در نظر گرفتند. Borghei et al. (2012) آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای شکل را در شرایط جریان غیرماندگار با شبیه‌سازی هیدروگراف‌های مثلثی شکل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد زمان رسیدن به پیک هیدروگراف تاثیری بر عمق نهایی آبشستگی ندارد اما اختلاف معنا داری در تکامل عمق آبشستگی تا رسیدن به حداکثر عمق آبشستگی ایجاد می-کند. Tabarestani and Zarrati (2017) هیدروگراف‌هایی با مدت زمان متفاوت را برای بررسی اثر شاخه‌های خیزان (T_p) و افتان (T_f) هیدروگراف بر عمق و عرض حفره آبشستگی پیرامون پایه مستطیلی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت زمان شاخه افتان به زمان شاخه خیزان هیدروگراف، عمق حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، عمق آبشستگی نهایی برای یک هیدروگراف با نسبت T_f/T_p برابر با ۹/۲۵ حدود ۴۲ درصد بزرگ‌تر از هیدروگراف مشابه با یک شاخه بالارونده است.

Gumgum and Guney (2020) آبشستگی پیرامون پایه

استوانه‌ای را در شرایط بستر زنده و جریان غیرماندگار با بکارگیری هیدروگراف‌های مثلثی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با بررسی اثرات دبی پیک و زمان تداوم هیدروگراف دریافتند که در طول شاخه خیزان هیدروگراف سیل، عمق آبشستگی به سرعت افزایش یافته و حرکت رسوب تاثیر ناچیزی بر عمق آبشستگی و ارتفاع نوسانات عمق دارد. اما در طول شاخه افتان هیدروگراف سیل، بزرگی نوسانات عمق آبشستگی بیشتر می‌شود و رسوبات عرضه شده به حفره آبشستگی باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود. Shaker et al. (2020) به مطالعه آبشستگی زیر خط لوله عبوری از بستر رودخانه در شرایط جریان غیرماندگار پرداختند. ایشان با بررسی زمان رسیدن به پیک هیدروگراف بیان کردند افزایش شیب شاخه خیزان هیدروگراف در افزایش نرخ آبشستگی بسیار تاثیرگذار است اما شیب شاخه افتان هیدروگراف تاثیر چندانی در عمق نهایی و توسعه زمانی آبشستگی ندارد. Abolfathi et al. (2021) اثر 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 هیدروگراف، حفره‌های آبشستگی پایه‌های دوم و سوم پس از فروکش کردن دبی پیک می‌تواند توسط رسوبات فرسایش یافته از پایه بالادست مجددا پر شود که بیشینه مقدار آن حدود ۲۴ درصد از قطر پایه می‌باشد. Hakim et al. (2022) به بررسی اثر آبشکن محافظ با نفوذپذیری‌های مختلف بر کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه جانبی کوتاه در شرایط جریان غیرماندگار 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.

بررسی مطالعات صورت گرفته در خصوص آبشستگی پیرامون پایه پل در شرایط جریان غیرماندگار، اهمیت پارامترهای مختلف هیدروگراف سیل مانند زمان تداوم و زمان رسیدن به پیک جریان را بر حداکثر عمق آبشستگی و تغییرات زمانی آن نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت بررسی آبشستگی در شرایط جریان غیرماندگار و محدود بودن مطالعات موجود در این خصوص، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر زمان شاخه‌های خیزان و افتان هیدروگراف و همچنین زمان تداوم هیدروگراف بر روی تغییرات زمانی عمق آبشستگی و حداکثر مقدار آن پیرامون تک پایه استوانه‌ای می‌باشد که در این خصوص تحقیقات انجام شده اندک می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی اثر زمان شاخه‌های خیزان و افتان هیدروگراف از ۶ هیدروگراف با چولگی‌های متفاوت (۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۹) استفاده شد. علاوه بر این از ۷ هیدروگراف نرمال (با توزیع گوسی) با زمان‌های تداوم متفاوت (۱۰، ۲۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه) جهت بررسی اثر زمان تداوم هیدروگراف بر حداکثر عمق آبشستگی و تغییرات زمانی آن استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سیستم 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 تلاطم و نوسانات جریان ورودی به فلوم و یک سرریز مستطیلی در انتهای فلوم برای تنظیم عمق جریان تعبیه شد. برای اندازه-گیری دبی جریان از یک دبی سنج الکترومغناطیس (مگاب ۳۰۰۰ با دقت ۰/۲۵±۰ درصد مقدار اندازه‌گیری شده) نصب شده بر روی لوله ورودی به فلوم استفاده شد. شکل ۲ شماتیکی از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات آن را نشان می-دهد.

یک پایه استوانه‌ای شکل از جنس تفلون با قطر ۰/۰۴۵ متر برای مدل‌سازی پایه پل مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس Raudkivi and Ettema (1983) و Melville and Chiew (1999) به منظور به حداقل رساندن اثر انسداد، لازم است عرض پایه کمتر از ۱۲ درصد عرض فلوم نگه داشته شود که در این تحقیق این مقدار برابر با ۶ درصد بود. محدوده رسوبی فلوم توسط رسوباتی از جنس ماسه با اندازه متوسط d_{50}=0.7 میلی‌متر و انحراف استاندارد هندسی $\sigma = 1.3$، ($\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$، d_{84} و d_{16} به ترتیب عبارتند از اندازه ذره-ای که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن کوچک‌تر هستند) پوشانده شد. طبق معیار Chiew and Melville (1987) زمانی که $D/d_{50} > 50$ باشد (که در آن D قطر پایه است)

اندازه رسوبات بستر بر عمق آبشستگی تأثیر نمی‌گذارد. در این تحقیق، این نسبت برابر ۶۴/۲۸ می‌باشد.

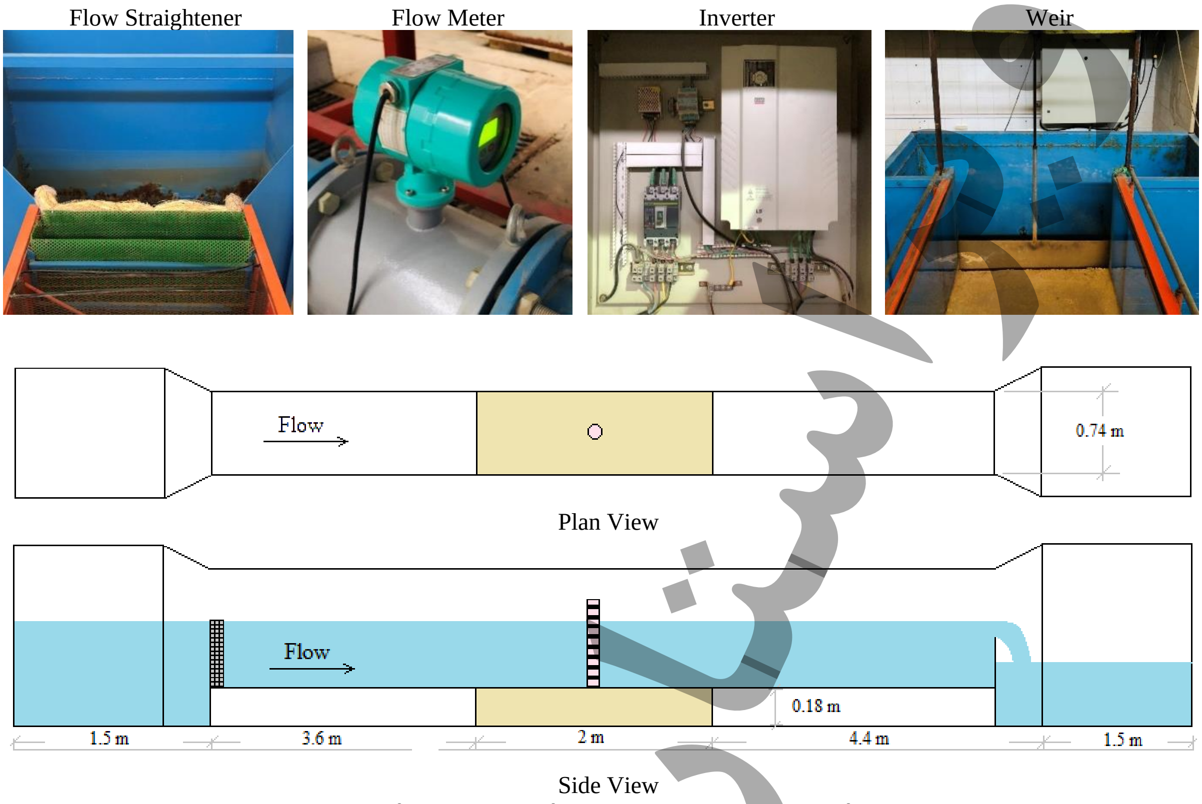


Fig 2 A view of the laboratory flume and the equipment used for this study

شکل ۲ نمایی از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده جهت انجام پژوهش حاضر

آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شد. بر این اساس پارامتر U/U_c (U 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 Coleman, 2002):

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

در رابطه فوق h عمق جریان، Gs چگالی نسبی ذرات رسوبی و g شتاب ثقل می‌باشد. برای محاسبه U_c در دبی پیک و پایه هیدروگراف بر اساس رابطه فوق، به ترتیب از عمق جریان در شرایط پیک و پایه هیدروگراف استفاده شد.

در این تحقیق برای برقراری جریان غیرماندگار در فلوم، از هیدروگراف جریان غیرماندگار استفاده شد. برای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر در مجموع ۱۳ آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی اثر جریان سیلاب با تداوم‌های مختلف بر آبشستگی، از ۷ هیدروگراف 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 هیدروگراف بر تغییرات زمانی و حداکثر عمق آبشستگی، تعداد ۶ هیدروگراف با زمان تداوم ثابت ۱۰۰ دقیقه و نسبت T_p/T_d (که در آن T_p زمان رسیدن به پیک هیدروگراف می‌باشد) برابر با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۹ مورد بررسی قرار گرفت. هیدروگراف‌های با T_p/T_d برابر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ دارای چولگی به چپ و هیدروگراف‌های با T_p/T_d برابر ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۹ دارای چولگی به راست می‌باشند. شکل ۳ هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مقادیر دبی پایه و پیک به‌گونه‌ای انتخاب شد که اولاً شرایط بستر آب زلال در تمام لحظات عبور هیدروگراف برقرار باشد و ثانیاً در دبی پایه هیدروگراف هیچگونه آبشستگی پیرامون پایه رخ ندهد. بر این اساس دبی پایه معادل ۱۹ لیتر بر ثانیه با عمق جریان ۱۵ سانتی‌متر و دبی پیک هیدروگراف معادل

۵۰ لیتر بر ثانیه با عمق جریان ۲۰/۴ سانتی‌متر انتخاب شد. در جدول ۱ مشخصات آزمایش‌های صورت گرفته ارائه شده است. در این جدول پارامترهای T_d و T_p به ترتیب بیان‌کننده زمان تداوم و زمان رسیدن به پیک هیدروگرف، h_b عمق جریان در شرایط پایه، h_p عمق جریان در شرایط پیک هیدروگراف، U_b/U_c و U_p/U_c به ترتیب بیان‌کننده شرایط پایه و پیک هیدروگراف می‌باشند. در بخش نام هر آزمایش US معرف جریان غیرماندگار، N، L و R به ترتیب معرف هیدروگراف‌های با توزیع نرمال، چولگی به چپ و چولگی به راست می‌باشد.

فلوم مجهز به سیستم تولید جریان غیرماندگار بود. این سیستم شامل یک نوسان ساز الکترونیکی[1] برنامه ریزی شده بود که برای تنظیم دبی متغیر هیدروگراف مورد استفاده قرار می‌گرفت. نوسان ساز الکترونیکی از یک طرف به پمپ و از طرف دیگر به دبی سنج الکترومغناطیس متصل بود و از طریق یک نرم افزار توسط کامپیوتر اجرا می‌شد. فایل اکسل هیدروگراف به‌صورت تغییرات دبی نسبت به زمان از طریق نرم افزار نصب شده روی رایانه، فراخوانی می‌شد. سپس نرم افزار با انجام پردازش‌های مورد نیاز دستورات لازم را برای تنظیم دبی پمپ به سیستم ارسال می‌کرد. این سیستم قادر بود داده‌های هیدروگراف صادر شده را با دقت ۱ لیتر بر ثانیه پیاده سازی کند.

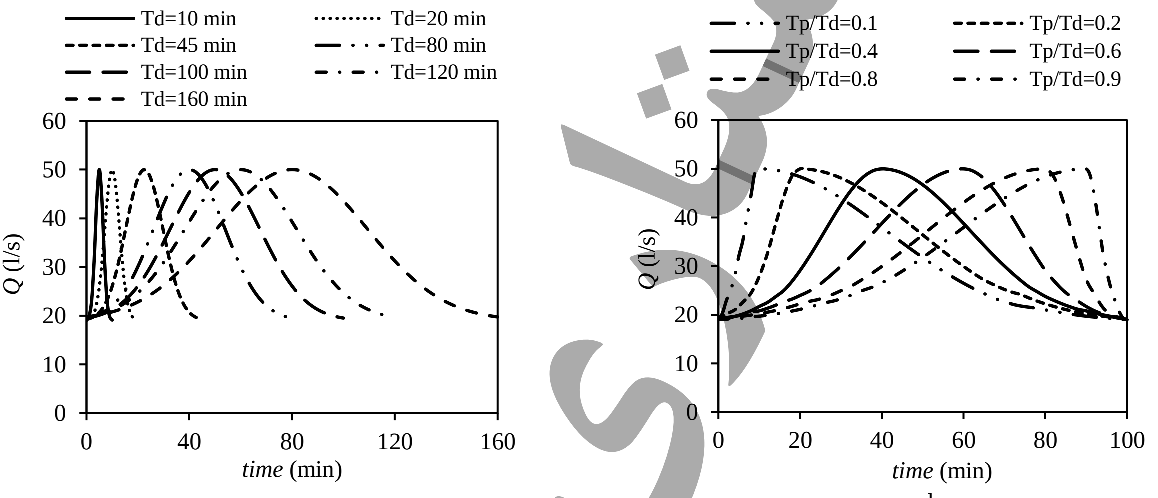


Fig 3 Hydrographs used in this study, a) hydrographs with different duration times, b) hydrographs with different T_p/T_d

شکل ۳ هیدروگراف‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، الف) هیدروگراف‌های با زمان‌های تداوم مختلف، ب) هیدروگراف‌هایی با T_p/T_d های مختلف

۲-۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

در ابتدای هر آزمایش بستر رسوبی به دقت تسطیح شد. سپس آب با دبی بسیار کم وارد فلوم می‌شد تا بخش رسوبی به آرامی اشباع شود. پیش از شروع هر آزمایش جهت جلوگیری از آبشستگی پیرامون پایه، یک دریچه دستی به صورت موقت در پایین‌دست بخش رسوبی فلوم قرار می‌گرفت تا عمق جریان درون فلوم به آرامی افزایش یابد و به عمق جریان در دبی پایه هیدروگراف 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 هیدروگراف تنظیم می‌شد. بعد از برقراری شرایط پایه هیدروگراف، سیستم اجرای جریان غیرماندگار فعال می‌شد و جریان هیدروگراف مورد نظر برای هر آزمایش وارد فلوم می‌شد. با شروع آزمایش عمق جریان متناسب با افزایش دبی در فلوم افزایش می‌یافت و پس از عبور دبی پیک هیدروگراف و با کاهش دبی جریان، عمق جریان نیز کاهش می‌یافت و به مقدار پایه می‌رسید. پس از خروج کامل هیدروگراف، پمپ به صورت اتوماتیک خاموش و جریان ورودی به فلوم قطع می‌گردید. آب درون فلوم از طریق شیرهای زهکش نصب شده در زیر

[1] Inverter

بخش رسوبی خارج می‌شد. در تمام مدت اجرای هیدروگراف 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 به‌گونه‌ای 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 فرآیند آبشستگی را تسهیل کند. تغییرات زمانی آبشستگی در دماغه و کناره پایه برداشت شد. در اتمام هر آزمایش و پس از زهکشی کامل بستر رسوبی تغییرات بستر رسوبی پیرامون پایه توسط دستگاه برداشت پروفیل بستر[1] (ساخت شرکت آداک تجهیز ایرانیان) برداشت می‌شد. این دستگاه مجهز به یک لیزر (با دقت ۰/۵ میلی‌متر) جهت برداشت توپوگرافی 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.

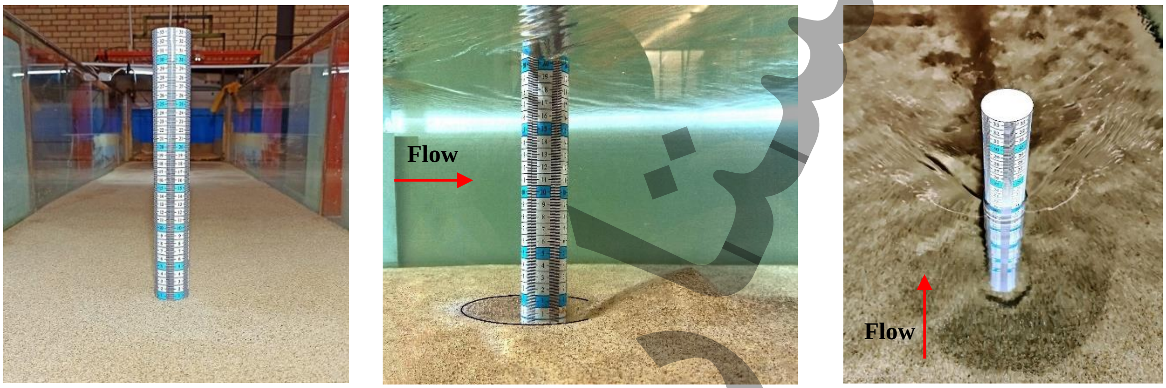


Fig 4 A view of the graded pier and the sediment bed before the start of the experiment and during the hydrograph flow

شکل ۴ نمایی از پایه مدرج و بستر رسوبی قبل از شروع آزمایش و در حین عبور جریان هیدروگراف

Table 1 The characteristics of the tests performed in this study

جدول ۱ مشخصات آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر

N0.	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	20.4	0.52	0.96
2	US-N-20	20	10	15	20.4	0.52	0.96
3	US-N-45	45	22.5	15	20.4	0.52	0.96
4	US-N-80	80	40	15	20.4	0.52	0.96
5	US-N-100	100	50	15	20.4	0.52	0.96
6	US-N-120	120	60	15	20.4	0.52	0.96
7	US-N-160	160	80	15	20.4	0.52	0.96
8	US-L-0.1	100	10	15	20.4	0.52	0.96
9	US-L-0.2	100	20	15	20.4	0.52	0.96
10	US-L-0.4	100	40	15	20.4	0.52	0.96
11	US-R-0.6	100	60	15	20.4	0.52	0.96
12	US-R-0.8	100	80	15	20.4	0.52	0.96
13	US-R-0.9	100	90	15	20.4	0.52	0.96

۳-۲- آنالیز ابعادی

برای انجام آنالیز ابعادی پارامترهای تاثیرگذار بر عمق

[1] Bed profiler

آبشستگی در شرایط جریان غیرماندگار به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته شد.

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

در رابطه (۲) U_b سرعت جریان در دبی پایه هیدروگراف، U_p سرعت جریان در پیک هیدروگراف، ρ_s چگالی رسوب، ϑ لزجت سینماتیک و t زمان نسبت به شروع آزمایش می‌باشد. آنالیز ابعادی با استفاده از نظریه باکهینگام انجام شد و پارامترهای بی بعد به صورت رابطه (۳) حاصل گردید.

$$d_s/D = f(U_b/U_c, U_p/U_c, \rho_s/\rho = G_s, \sigma, T_p/T_d, t/T_d, t/T_p, Fr_b, Fr_p, Re_b, Re_p) \qquad (3)$$

در این تحقیق مقادیر Gs و σ ثابت هستند. پارامترهای Fr_b و Fr_p به ترتیب معرف عدد فرود جریان در شرایط پایه و پیک و پارامترهای Re_b و Re_p به ترتیب معرف عدد رینولدز در شرایط پایه و پیک هیدروگراف هستند که در تمام هیدروگراف‌ها مقادیر ثابتی داشتند زیرا مقادیر دبی و عمق جریان در شرایط پایه و پیک تمام هیدروگراف‌های تحقیق حاضر ثابت بود. با حذف پارامترهای ثابت و ادغام برخی از پارامترها با یکدیگر در نهایت پارامترهای بی بعد تاثیرگذار در شرایط جریان غیرماندگار به صورت رابطه (۴) حاصل شد.

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

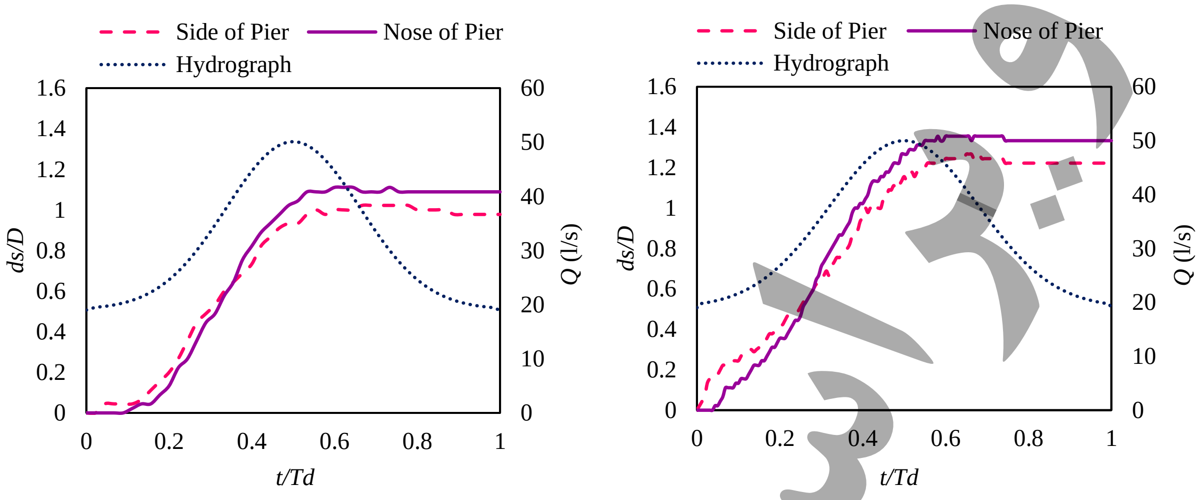
در رابطه فوق پارامتر T^* مقیاس زمانی هیدروگراف است که توسط Hakim et al. (2022) معرفی شده است.

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 شروع می‌شود و در دقایق ابتدایی عبور هیدروگراف، 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 حداکثر عمق آبشستگی در دماغه پایه رخ می‌دهد. دو عامل اصلی شکل‌گیری گودال آبشستگی در اطراف 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 دقایق ابتدایی هیدروگراف به علت سرعت و دبی کم جریان، قدرت گردابه‌های نعل اسبی جلوی پایه ضعیف است. جداشدگی خطوط جریان در اطراف پایه موجب افزایش تنش برشی موضعی در کناره‌های پایه می‌شود و شروع آبشستگی در طرفین پایه را به دنبال دارد. به گفته Oliveto and Hager (2002) حرکت اولیه رسوبات در طرفین پایه در حدود ۷۰ درجه پایین‌دست محور کانال رخ می‌دهد و آبشستگی دماغه پایه همیشه با تاخیر شروع می‌شود. با توسعه گودال آبشستگی گرداب نعل اسبی عامل اصلی آبشستگی در جلوی پایه می‌شود (Yang et al., 2019). با افزایش دبی در طول عبور هیدروگراف و قدرت گرفتن گردابه‌های نعل اسبی، آبشستگی به سمت دماغه پایه پیش روی می‌کند و حداکثر 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 $t/Td<0.4$، $t/Td<0.4$، $t/Td<0.36$، $t/Td<0.35$، $t/Td<0.32$، $t/Td<0.31$ و $t/Td<0.28$ بیش از عمق آبشستگی دماغه پایه می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش زمان تداوم هیدروگراف حداکثر عمق آبشستگی به دماغه پایه زودتر نزدیک می‌شود. شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد حداکثر عمق آبشستگی بعد از دبی پیک هیدروگراف و در ابتدای شاخه‌ی افتان رخ می‌دهد. محاسبات نشان داد حداکثر عمق آبشستگی در هیدروگراف‌های نرمال ۱۰ درصد بعد از زمان پیک هیدروگراف به وقوع می‌پیوندد. در مطالعه Hager and Unger (2010) بر روی آبشستگی پایه پل در جریان غیرماندگار نیز نتیجه مشابهی گزارش شده است. در مطالعه Farshad (2023) بر روی آبشستگی آبشکن تیغه‌ای در

جریان غیرماندگار، وقوع حداکثر عمق آبشستگی ۱۳ درصد بعد از زمان پیک هیدروگراف نرمال گزارش شده است.



a   b

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

۲-۳- بررسی تاثیر زمان شاخه‌های خیزان و افتان هیدروگراف بر آبشستگی

تغییرات دبی جریان در طول شاخه خیزان هیدروگراف 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، ابتدا تغییرات زمانی تنش برشی در طول زمان تداوم هیدروگراف‌های با زمان تداوم ثابت و زمان پیک مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا تنش برشی در بالادست پایه مقصود می‌باشد و نه در پیرامون پایه. بدین منظور ابتدا سرعت برشی در طول زمان هیدروگراف با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد (Bajestan, 2016).

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

در رابطه (۵)، U_* سرعت برشی، τ تنش برشی بستر، R_h شعاع هیدرولیکی (در بالادست پایه پل) و S_e شیب خط انرژی است که از رابطه (۶) بدست می‌آید.

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

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 ابتدا با حدس یک مقدار اولیه برای ضریب شزی، سرعت برشی با استفاده از روابط ۶ و ۵ محاسبه گردید و مقدار حاصل در معادله لگاریتمی پروفیل سرعت (رابطه ۷) قرار داده شد تا مقدار ضریب شزی جدیدی حاصل گردد. سپس سرعت برشی با ضریب شزی حاصل از رابطه (۷) مجددا محاسبه شد و مراحل قبل تا جایی تکرار گردید تا اختلاف بین دو مقدار سرعت برشی متوالی ناچیز شود. در نهایت با محاسبه مقادیر سرعت برشی در طول زمان تداوم هیدروگراف، تغییرات زمانی تنش برشی بر اساس رابطه (۵) برآورد شد.

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

شکل ۶ تغییرات زمانی تنش برشی بستر و عمق آبشستگی در دماغه پایه استوانه‌ای را به ازای هیدروگراف‌های 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 (τ/τ_p: که در آن τ_p تنش برشی در پیک هیدروگراف می‌باشد) و محور عمودی سمت چپ نشان‌دهنده عمق آبشستگی بی‌بعد (ds/D) می‌باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که روند تغییرات زمانی تنش برشی و عمق

آبشستگی در طول شاخه خیزان هیدروگراف مشابه یکدیگر می‌باشد. با کاهش زمان شاخه خیزان، شیب منحنی تغییرات زمانی تنش برشی افزایش شدیدی پیدا می‌کند و در بازه زمانی کوتاه‌تری به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این مسئله باعث می‌شود نرخ آبشستگی 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 آبشستگی جلوی پایه نیز کاهش یافته و حداکثر عمق آبشستگی با تاخیر بیشتری به وقوع می‌پیوندد.

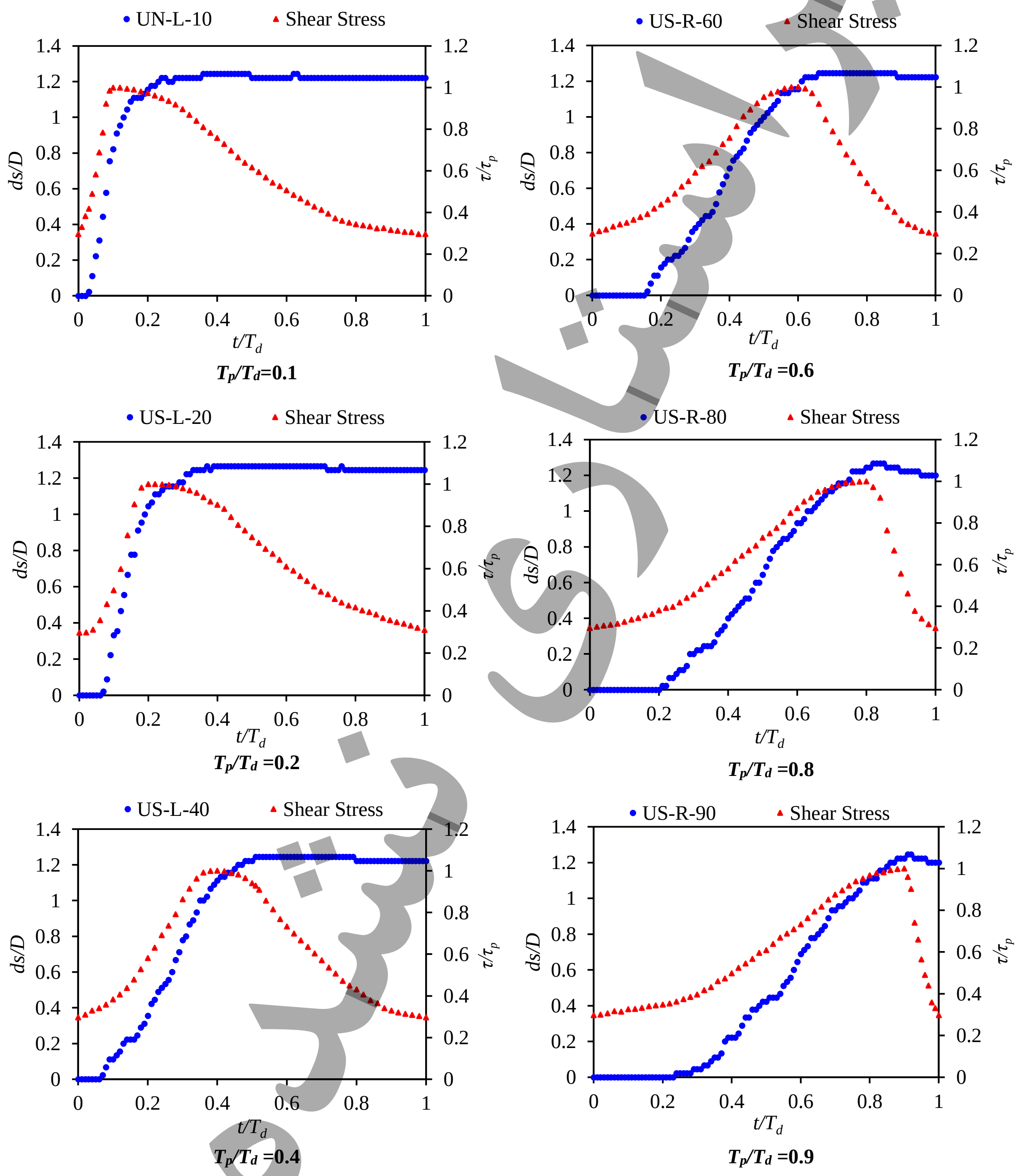


Fig 6 Temporal variations of scour depth and bed shear stress in hydrographs with different T_p/T_d

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

نرخ تغییرات زمانی تنش برشی و عمق آبشستگی در طول شاخه خیزان هیدروگراف در جدول ۲ ارائه شده است. در

این جدول پارامتر $\Delta\tau/\Delta T_p$ معرف نرخ تنش برشی در طول شاخه خیزان هیدروگراف و پارامتر $\Delta ds/\Delta T_p$ نرخ آبشستگی متناظر می‌باشد. مشاهده می‌شود با کاهش زمان شاخه خیزان هیدروگراف از ۹۰ دقیقه به ۱۰ دقیقه، نرخ تغییرات تنش برشی ۹ برابر افزایش و نرخ آبشستگی حدود ۶ برابر افزایش می‌یابد.

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

جدول۲ نرخ تغییرات آبشستگی در مقابل نرخ تغییرات تنش برشی در طول شاخه خیزان هیدروگراف

Tp (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

شکل ۶ نشان می‌دهد با افزایش زمان شاخه خیزان هیدروگراف، استمرار حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و عمق آبشستگی در پایان آزمایش کم‌تر از حداکثر عمق آبشستگی می‌شود. با کاهش دبی در انتهای هیدروگراف قدرت گردابه‌های نعل اسبی پیرامون پایه ضعیف می‌شود و جریان قادر نیست رسوبات معلق اطراف پایه را به بیرون از حفره آبشستگی منتقل کند، بنابراین این ذرات درون حفره ته‌نشین می‌شوند و عمق آبشستگی در پایان آزمایش را کاهش می‌دهند. این مسئله در هیدروگراف‌های با چولگی به راست به دلیل افت سریع دبی جریان و عدم وجود زمان کافی برای تثبیت حداکثر عمق آبشستگی در مقایسه با هیدروگراف‌های با چولگی به چپ بیشتر نمایان می‌شود. متوسط میزان کاهش عمق آبشستگی در اثر ته‌نشینی رسوبات معلق درون حفره آبشستگی برای هیدروگراف‌های با چولگی به راست حدود ۵ درصد قطر پایه و برای هیدروگراف‌های با چولگی به چپ حدود ۲ درصد قطر پایه است. در مطالعه Tabarestani and Zarrati (2017) بر روی پایه مستطیلی حداکثر کاهش عمق ناشی از ته‌نشینی رسوبات ۵ درصد عرض پایه گزارش شد. شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد حداکثر عمق آبشستگی برای هیدروگراف‌هایی با زمان تداوم و دبی پیک مشابه تقریبا برابر است و زمان رسیدن به پیک هیدروگراف تاثیر چندانی در حداکثر عمق آبشستگی پیرامون پایه ندارد. نتایج مشابهی در مطالعات Chang et al. (2004)، Borghei et al. (2012) و Shaker et al. (2020) یافت شد.

به منظور بررسی اثر شاخه افتان هیدروگراف بر حداکثر عمق آبشستگی، مقادیر حداکثر عمق آبشستگی و عمق آبشستگی در پیک برای هیدروگراف‌های با چولگی‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. محاسبات نشان داد حداکثر عمق آبشستگی در هیدروگراف‌های 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 بیش از عمق آبشستگی در دبی پیک می‌باشد. نتایج حاصل تاثیر زمان شاخه افتان هیدروگراف را بر مقدار حداکثر عمق آبشستگی در هیدروگراف‌های با چولگی به چپ نشان می‌دهد. می‌توان گفت در یک زمان تداوم ثابت، با کاهش زمان وقوع پیک هیدروگراف اثر گذاری شاخه افتان هیدروگراف افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش زمان شاخه خیزان هیدروگراف، جریان فرصت کافی برای حفر بیشتر بستر رسوبی را ندارد و با توجه به عدم تعادل عمق آبشستگی در دبی پیک، پتانسیل رشد آبشستگی برای دبی‌های نزدیک به دبی پیک در ابتدای زمان شاخه افتان هیدروگراف وجود دارد، از طرفی رسوباتی که تحت تنش حداکثر در دبی پیک از دیواره حفره آبشستگی جدا شده و درون حفره به صورت معلق درآمدند نیز در ابتدای شاخه افتان هیدروگراف توسط جریان از حفره خارج می‌شوند. این دو عامل می‌تواند موجب افزایش عمق آبشستگی پس از وقوع دبی پیک هیدروگراف شود.

مقایسه حداکثر 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 هیدروگراف حداکثر 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 هیدروگراف همخوانی دارد اما با یافته‌های Chang et al. (2004) و Lai et al. (2009) در مورد ناچیز دانستن تاثیر شاخه افتان هیدروگراف همخوانی ندارد.

تاثیر بازه‌های زمانی مختلف هیدروگراف بر توسعه عمق آبشستگی پیرامون پایه برای هیدروگراف‌های با زمان تداوم

۱۰۰ دقیقه و چولگی‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول عبارت $\%T_d$ معرف درصد بازه‌های زمانی مختلف هیدروگراف است. نتایج نشان می‌دهد برای هیدروگراف‌هایی با چولگی ۰/۱ و ۰/۲ بیش‌ترین رشد آبشستگی در ۴۰ درصد ابتدای زمان تداوم هیدروگراف رخ داده است. برای هیدروگراف‌هایی با چولگی ۰/۴ و توزیع نرمال در بازه زمانی بین ۲۰ تا ۶۰ درصد از زمان تداوم هیدروگراف، برای هیدروگراف با چولگی ۰/۶ در بازه زمانی بین ۳۰ تا ۷۰ درصد از زمان تداوم هیدروگراف و برای هیدروگراف‌هایی با چولگی ۰/۸ و ۰/۹ به ترتیب در بازه‌های زمانی بین ۴۰ تا ۹۰ و ۵۰ تا ۱۰۰ درصد از زمان تداوم هیدروگراف بیش‌ترین رشد آبشستگی رخ داده است. نتایج حاصل تاثیر چولگی هیدروگراف بر روی تغییرات زمانی عمق آبشستگی را به خوبی نشان می‌دهد. در مطالعه Farshad (2023) برای هیدروگراف‌هایی با چولگی ۰/۳۳، ۱۰۰ درصد توسعه عمق آبشستگی در ۵۰ درصد ابتدای زمان هیدروگراف، در هیدروگراف‌هایی با توزیع نرمال بیشترین توسعه آبشستگی در مدت زمان بین ۲۵ تا ۶۵ درصد از زمان تداوم هیدروگراف و در هیدروگراف‌هایی با چولگی ۰/۶۶ در مدت زمان بین ۳۳ تا ۷۵ درصد از زمان تداوم هیدروگراف گزارش شد.

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

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

$\%T_d$	T_p/T_d						
	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

۳-۳- بررسی اثر زمان تداوم هیدروگراف

۳-۳-۱- حداکثر عمق آبشستگی

شکل ۷ تغییرات حداکثر عمق آبشستگی پیرامون پایه را به ازای هیدروگراف‌های با زمان تداوم مختلف نشان می‌دهد. در این شکل از پارامتر بی‌بعد T^* جهت بی‌بعد کردن شکل استفاده شده است. محور عمودی شکل نشان دهنده حداکثر عمق آبشستگی بی بعد شده با قطر پایه ($ds\ max/D$) می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش T^* حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. در مطالعه Hakim et al. (2022) بر روی تکیه‌گاه جانبی نیز نتایج مشابهی یافت شد. با افزایش T^* که در اثر افزایش زمان تداوم هیدروگراف صورت می‌گیرد، مدت زمانی که رسوبات 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 پایین‌دست ایجاد می‌شود، لذا عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. محاسبات نشان داد حداکثر عمق آبشستگی به ازای هیدروگراف‌های با T^* برابر با ۹۷۴/۱۶، ۲۱۹۱/۸۵، ۳۸۹۶/۶۳، ۴۸۷۰/۷۹، ۵۸۴۴/۹۵ و ۷۷۹۳/۲۶ (معادل با هیدروگراف‌های 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 حداکثر عمق آبشستگی ملایم‌تر می‌شود و این به دلیل این است که آبشستگی در پیرامون پایه به تعادل نزدیک‌تر می‌شود.

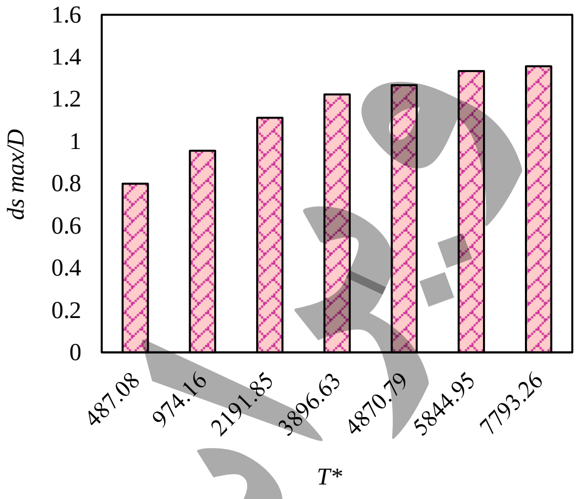


Fig 7 The maximum dimensionless scour depth around the cylindrical pier for Hydrographs with different *T**

شکل ۷ حداکثر عمق آبشستگی بی بعد پیرامون پایه استوانه‌ای به ازای هیدروگراف‌هایی با *T** مختلف

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

شکل ۸ تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون تک پایه را به ازای هیدروگراف‌های با زمان‌های تداوم مختلف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که زمان تداوم هیدروگراف بر روی شیب روند تغییرات زمانی عمق آبشستگی موثر است. با افزایش زمان تداوم هیدروگراف شیب منحنی تغییرات زمانی آبشستگی کاهش می‌یابد، یعنی تغییرات عمق آبشستگی در بازه زمانی طولانی‌تری به وقوع می‌پیوندد. در تحقیق Abolfathi et al. (2021) و همچنین Farshad (2023) نیز چنین نتیجه‌ای بدست آمد. در واقع شیب منحنی تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای هیدروگراف‌های کوتاه مدت مانند زمان تداوم ۱۰ دقیقه بسیار شدیدتر از هیدروگراف‌های طولانی مدت مانند زمان تداوم ۱۶۰ دقیقه می‌باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق دبی‌های پایه و پیک در تمام آزمایش‌ها ثابت می‌باشد لذا میزان تغییرات دبی در شاخه خیزان هیدروگراف ثابت است. با کاهش زمان تداوم هیدروگراف تغییرات دبی در بازه زمانی کوتاه‌تری به وقوع می‌پیوندد. 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. محاسبات نشان داد با کاهش زمان تداوم هیدروگراف از ۱۶۰ به ۱۰ دقیقه نرخ آبشستگی حدود ۹ برابر افزایش می‌یابد.

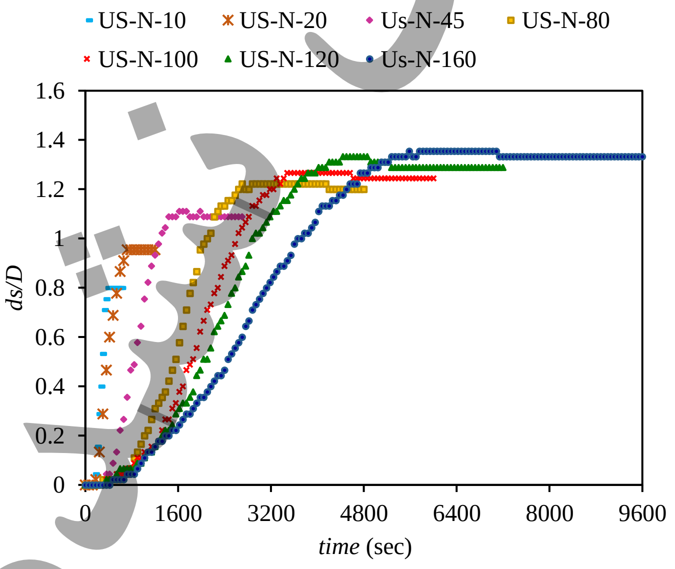


Fig 8 Temporal variations of scouring around the cylindrical pier with Gaussian distribution hydrographs and different durations

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

۳-۳-۳ پروفیل عرضی و طولی حفره آبشستگی

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب پروفیل‌های عرضی و طولی حفره آبشستگی را به ازای زمان‌های تداوم مختلف هیدروگراف نشان می‌دهد. در شکل ۹ محور عمودی نشان

دهنده تراز بستر رسوبی (Z) و محور افقی نشان‌دهنده عرض بستر رسوبی (Y) می‌باشد و در شکل ۱۰ محور عمودی نشان دهنده تراز بستر رسوبی (Z) و محور افقی نشان‌دهنده طول بستر رسوبی (X) می‌باشد. شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش زمان تداوم هیدروگراف علاوه بر افزایش حداکثر عمق آبشستگی، عرض حفره آبشستگی نیز گسترش می‌یابد. در زمان‌های تداوم کوتاه‌تر مانند ۲۰ و ۴۵ دقیقه، ابعاد حفره آبشستگی در جهات عمقی و عرضی تقریباً 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 در جلوی پایه برای زمان‌های تداوم ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه تقریبا با هم برابر است که نشان می‌دهد پتانسیل رشد آبشستگی با گسترش حفره آبشستگی کاهش می‌یابد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که علاوه بر پروفیل عرضی جلوی پایه، ابعاد حفره آبشستگی در پشت پایه و همچنین ابعاد پشته رسوبی نیز متاثر از زمان تداوم هیدروگراف می‌باشد. با افزایش تداوم هیدروگراف عمق حفره در پشت پایه افزایش یافته و شیب پایین‌دست حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. با افزایش زمان تداوم تا ۴۵ دقیقه، ارتفاع پشته رسوبی پایین‌دست پایه افزایش می‌یابد، اما شیب پایین-دست حفره آبشستگی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. با افزایش بیشتر زمان تداوم، ارتفاع پشته رسوبی نسبتا ثابت بوده اما ابعاد پشته رسوبی بزرگ‌تر شده و محل قله آن در فاصله‌ی دورتری پایین‌دست پایه شکل می‌گیرد.

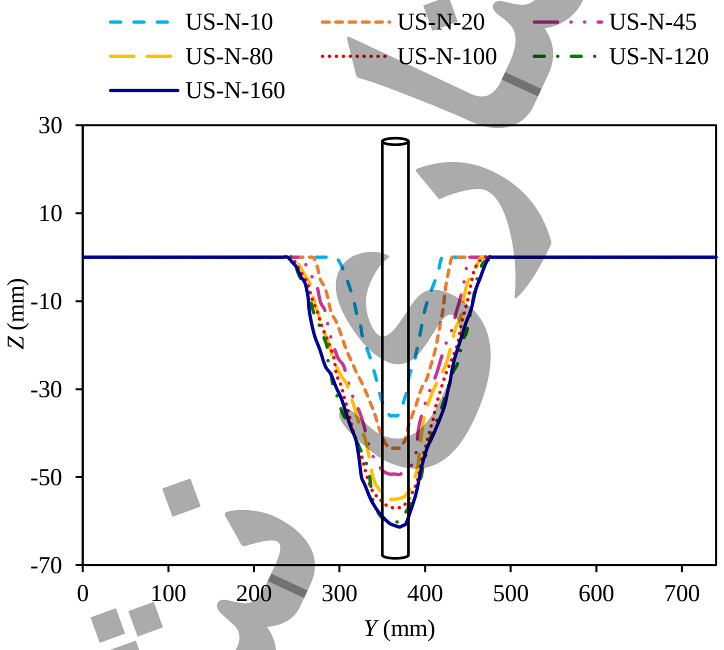


Fig 9 Cross-sectional profile of scour hole at the location of the maximum scour depth for different duration times of hydrographs

شکل ۹ پروفیل عرضی حفره آبشستگی در مقطع بیش‌ترین عمق آبشستگی به ازای زمان‌های تداوم مختلف هیدروگراف

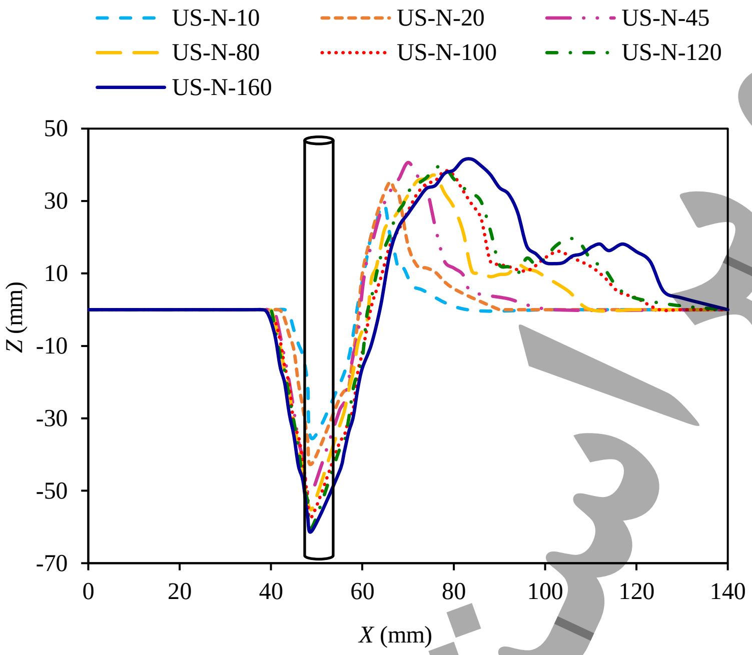


Fig 10 Longitudinal profile of scour hole in the central axis of the flume for different duration of hydrograph

شکل ۱۰ پروفیل طولی حفره آبشستگی در محور مرکزی فلوم به ازای زمان‌های تداوم مختلف هیدروگراف

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آبشستگی پیرامون تک پایه استوانه‌ای تحت شرایط جریان غیرماندگار مورد مطالعه قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثر شاخه‌های خیزان و افتان هیدروگراف و همچنین زمان تداوم هیدروگراف بر روی توسعه زمانی و حداکثر عمق آبشستگی، ۱۳ هیدروگراف مختلف شبیه‌سازی شد.

بررسی اثر شاخه خیزان هیدروگراف نشان داد در هیدروگراف‌هایی با زمان تداوم مشابه، زمان رسیدن به پیک هیدروگراف تاثیری بر حداکثر عمق آبشستگی ندارد اما بر تغییرات زمانی تنش برشی و عمق آبشستگی به شدت تاثیر گذار است به‌طوریکه با کاهش زمان شاخه خیزان هیدروگراف 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 هیدروگراف زمان وقوع حداکثر عمق آبشستگی به پیک هیدروگراف نزدیک‌تر می-شود.

بررسی اثر شاخه افتان هیدروگراف بر روی حداکثر عمق آبشستگی نشان داد در یک زمان تداوم ثابت با کاهش زمان شاخه خیزان هیدروگراف اثر گذاری شاخه افتان بر روی حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد در هیدروگراف‌هایی با زمان پیک یکسان اما زمان تداوم متفاوت نیز زمان شاخه افتان بر مقدار حداکثر عمق آبشستگی موثر است، به عنوان مثال با ۹ برابر شدن زمان شاخه افتان هیدروگراف عمق آبشستگی حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

بررسی زمان تداوم هیدروگراف نشان داد افزایش زمان تداوم موجب افزایش عمق و ابعاد حفره آبشستگی پیرامون پایه می‌شود. با افزایش زمان هیدروگراف از ۱۰ به ۱۶۰ دقیقه حداکثر عمق آبشستگی حدود ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این شیب تغییرات زمانی عمق آبشستگی با افزایش زمان تداوم به علت طولانی شدن بازه تغییرات دبی در طول شاخه خیزان هیدروگراف کاهش می‌یابد.

۵- فهرست علایم

علایم انگلیسی:

T_p زمان رسیدن به پیک هیدروگراف (min)

T_d زمان تداوم هیدروگراف (min)

t زمان از شروع آزمایش (min)

T^* مقیاس زمانی هیدروگراف

d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی (m)

U سرعت متوسط جریان (m/s)

U_c سرعت آستانه حرکت رسوب بستر (m/s)

ویراستاری نشده

سرعت برشی (m/s)	U_*
چگالی نسبی ذرات رسوبی	Gs
شتاب ثقل (m/s^2)	g
دبی هیدروگراف (m^3/s)	Q
عمق جریان (m)	h
شعاع هیدرولیکی (m)	R_h
سطح مقطع جریان (m^2)	A
شیب خط انرژی	S_e
قطر پایه (m)	D
عمق آبشستگی (m)	ds
عدد فرود	Fr
عدد رینولدر	Re
نرخ تنش برشی (Pa/min)	$\Delta\tau / \Delta T_p$
نرخ آبشستگی (cm/min)	$\Delta ds / \Delta T_p$
علایم یونانی:	
انحراف استاندارد هندسی	σ
تنش برشی (Pa)	τ
چگالی سیال (kg/m^3)	ρ
چگالی رسوب (kg/m^3)	ρ_s
لزجت سینماتیک (m^2/s)	ϑ
زیرنویس‌ها:	
جریان پایه هیدروگراف	b
جریان پیک هیدروگراف	p

۶ - تشکر و قدردانی

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

۷- منابع

Abolfathi, S.; Kashefipour, S.M., Bajestan, M.S. and 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, 549. (In Persian)

Borghei, S.M., Kabiri-Samani, A. and Banihashem, 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. and Yen, C.L. (2004). Evolution of scour depth at circular bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 905-913.

Chiew, Y.M., and 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 ahwaz, 166. (In Persian)

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

Hager, W.H. and Unger, J. (2010). Bridge pier scour 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. and 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. and 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. and 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. and Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), 59-65.

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

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

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

Shaker, E., Kashefipour, S.M. and 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. and 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, and Li, J. (2020). Experimental study of scour around pile groups in steady flows. *Ocean Engineering*, *195*, 106651.

ویراستاری نشده