



Research Paper

Experimental Investigation of Bed Scouring Rate in Flood Conditions

Bahman Aghazadeh Qharebagh^{1*}, Jalal Bazargan² and Mirali Mohammadi³

¹PhD Alumni, Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

²Assoc. Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Article information

Received: March 07, 2022

Revised: June 01, 2022

Accepted: June 02, 2022

Keywords:

Flood

Generated Hydrograph

Scour Rate

Sediment Transport

Unsteady Flow

*Corresponding author:

aghazadehb@znu.ac.ir



Abstract

The volume of sediment transport rate during floods is one of the important issues in river engineering. This volume of sediments has caused countless damages to the hydraulic structures which are built along the rivers, every year. The purpose of this study was to investigate the effects of hydrograph unsteadiness parameter on bedload transport rate. For this purpose, a real unsteady flow hydrograph was created inside a 15 m long tilting flume by installing an interface board between the computer and the pump inverter. 20 cases of hydrographs with different unsteadiness parameters were tested and the scour rate was obtained during the hydrograph time. The results indicate that the maximum scouring rate always occurs near the peak of the flood hydrograph and the time lag between them was positive. For hydrographs with the same peak and different base time, the maximum scouring rate occurs in the hydrograph with more unsteadiness. The maximum scouring rate of the bed has a direct relationship with the unsteadiness parameter, and it can be said that an 88% decrease in the flow unsteadiness parameter leads to a 76% decrease in the maximum bedload rate. Also, the scour rate in the ascending limb of the hydrograph is higher than the descending limb, which by reducing the unsteadiness parameter, the distance between the limbs in the sediment hysteresis diagram decreases.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introduction

Natural rivers experience significant sediment transport rates during flood events. Ongoing statistical data collected by the Dartmouth Flood Observatory indicates that the number of extreme flood events is increasing worldwide due to climate change. So, natural rivers globally are likely to experience more dramatic changes to bulk sediment transport and channel bed

morphology in the future. In present research, the mechanism of sediment transport and scouring rate in rivers has been investigated by modeling natural conditions in a laboratory channel by creating real flood hydrographs.

Material and Methods

The experiments were performed in a 15 m long tilting flume with glass walls and rectangular cross section of 0.5 m high and 0.3 m wide. The



flume is located in the Advanced Hydraulic Laboratory of Urmia University. All the experiments were conducted at a bed slope of 0.003. Sediment particles used in this study were provided from Firoozkooh sand company having $d_{50} = 2.69$ mm and $\sigma_u = 1.17$. Prior to the experimental run, the sediment bed with 10 cm thickness was scraped flat using the screed board installed on the channel. To initially saturate the sediment bed, the downstream tailgate was used, and the pump was switched on with a flow rate of 3 lit/s. Once the sediment bed was fully saturated, the flow rate increased gradually to the base flow (i.e., 15 lit/s) and at the same time the downstream tailgate was opened to eliminate the

backwater effects and set-up a steady, uniform flow condition along the channel. Then a hydrograph applied to the flume by using an interface board between the computer and the pump inverter. 20 cases of hydrographs with different unsteadiness parameters were tested and the scouring rate was obtained during the hydrograph time in 10-minute intervals. The full characteristics of the test Hydrographs are given in Table 1. In which Q_b , Q_p are the hydrograph base flow and peak flow rate, ΔT is the duration of the hydrograph, Γ_{HG} is the unsteadiness parameter for unsteady flow, W_k is the total flow work done on the bed and η is the shape parameter of hydrograph.

Table 1 Characteristics of tested flood hydrographs

Series	Test	Q_b (m ³ /s)	Q_p (m ³ /s)	ΔT (s)	Γ_{HG} ($\times 10^{-4}$)	W_k	η
Series 1	UA1-1	0.015	0.045	10800	2.02	144.81	1
	UA1-2	0.015	0.045	10800	2.04	145.23	1
	UA2-1	0.015	0.04	12600	1.44	145.62	1
	UA2-2	0.015	0.04	12600	1.41	149.08	1
	UA3-1	0.015	0.035	15600	0.896	145.00	1
	UA3-2	0.015	0.035	15600	0.903	144.66	1
	UA4-1	0.015	0.03	20000	0.522	146.85	1
	UA4-2	0.015	0.03	20000	0.513	147.29	1
	UA5-1	0.015	0.025	30000	0.24	150.41	1
	UA5-2	0.015	0.025	30000	0.233	149.80	1
Series 2	UB1-1	0.015	0.045	5400	4.05	69.32	1
	UB1-2	0.015	0.045	5400	4.03	69.03	1
	UB2-1	0.015	0.040	6300	2.89	69.44	1
	UB2-2	0.015	0.040	6300	2.93	69.77	1
	UB3-1	0.015	0.035	7800	1.79	69.48	1
	UB3-2	0.015	0.035	7800	1.85	69.41	1
	UB4-1	0.015	0.03	10000	1.04	69.73	1
	UB4-2	0.015	0.03	10000	1.1	69.52	1
	UB5-1	0.015	0.025	15000	0.48	68.96	1
	UB5-2	0.015	0.025	15000	0.477	69.07	1

Results

The cumulative bedload yield curves are basically S-shaped in unsteady flow conditions, while in steady flow, cumulative bedload yield curves are in a straight line. The curves of the lower peak-flow runs are closer to straight lines; therefore, it can be said that the behavior of sediment particles in low-intensity hydrographs is almost like the steady flow. Bed scouring rate basically increased in the ascending limb of the hydrograph and decreased in the descending limb. In the ascending limb of the hydrograph, the positive wave increases the shear velocity and consequently the bed shear stress increases. In all cases, the sediment hysteresis diagram

indicates an obvious clockwise loop. This means that the scouring rate for a given flow, in the ascending limb of the hydrograph is greater than the descending limb. The distance between ascending and descending limbs in the sediment hysteresis diagrams has been reduced from UA1 to UA5, respectively. The movement of bed sediments was in the form of sand dunes and the size of dunes basically increased during the rising limb and decreased during the falling limb of the hydrograph. The maximum scour rate is directly related to the unsteadiness parameter. So, the scour rate is increased as the base time of the hydrograph is decreased. Figure 1 shows the effects of unsteadiness parameter on normalized

bedload yield (W_t^*) for UA (unsteadiness parameters series A) and UB (unsteadiness parameters series B) experiments.

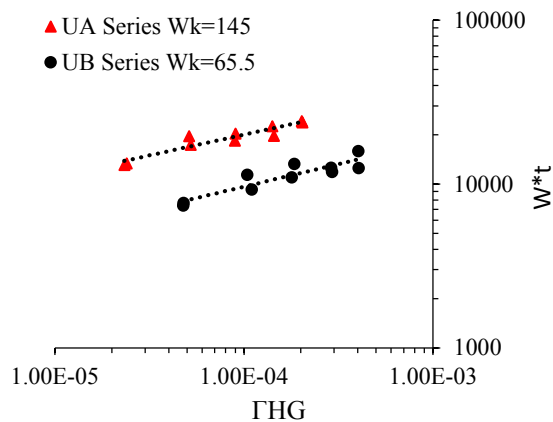


Fig. 1. Effect of unsteadiness parameter on normalized bedload yield changes (UA and UB experiments)

According to Fig. 1, the power relationship between the hydrograph unsteadiness parameter (Γ_{HG}) and the normalized bedload yield (W_t^*) is obtained for UA and UB experiments.

The combined hydrograph parameter $\xi = W_k \Gamma_{HG}^{0.28}$ is defined in this study. The normalized bedload yield changes (W_t^*) in terms of the combined hydrograph parameter (ξ).

Conclusion

According to the experimental investigation and discussion of the obtained results, the main conclusions are given as following:

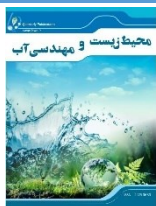
1. Unsteady flow relationships should be used to investigate scouring in sharp hydrographs and the use of steady flow relationships for this type of hydrographs comes with a lot of errors.
2. The maximum scouring rate always occurs near the peak point of the flood hydrograph and the time lag between them is positive.
3. The scouring rate in the ascending limb of the hydrograph is higher than of the descending limb, whereby reducing the unsteadiness parameter, the distance between the limbs in the sediment hysteresis diagram decreases. Changes in bedload transfer rate in terms of flow rate indicates a clockwise hysteresis over the hydrograph duration.
4. The combined parameter of the hydrograph and the normalized bedload yield are directly related to each other.
5. The scouring rate is directly related to the unsteadiness parameter and by 88% reduction of the flow unsteadiness parameter, and the maximum bedload rate value is reduced by 76%.

Data Availability

The data used in this research can be sent by the corresponding author via email.

Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی آهنگ آبشستگی بستر در شرایط وقوع سیلاب

بهمن آقازاده قره‌باغ^{۱*}، جلال بازرگان^۲ و میرعلی محمدی^۳

^۱دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۲دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۳دانشیار، گروه مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۱۲/۱۶]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۱/۰۳/۱۱]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۰۳/۱۲]

واژه‌های کلیدی:

آهنگ آبشستگی

انتقال رسوب

جریان غیرماندگار

سیلاب

هیدروگراف تولیدی

*نویسنده مسئول:

aghazadehb@znu.ac.ir



حجم رسوبات انتقالی در حین وقوع سیلاب، یکی از مسائل مهم در حوزه مهندسی رودخانه است. این حجم از رسوبات هرساله خسارت‌های بی‌شماری بر سازه‌های هیدرولیکی احداث شده در مسیر رودخانه‌ها به وجود آورده است. هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر پارامتر غیرماندگاری هیدروگراف سیلاب بر میزان انتقال رسوبات بستر است. بدین منظور، با طراحی یک برد واسط بین کامپیوتر و میدل پمپ، جریان غیرماندگار تولیدی درون کانال شیب‌پذیر به طول ۱۵ m ایجاد شد. ۲۰ حالت هیدروگراف با پارامتر غیرماندگاری متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت و آهنگ آبشستگی در طی زمان هیدروگراف به دست آمد. نتایج بیانگر آن است که بیشینه آهنگ آبشستگی همواره نزدیک به اوج هیدروگراف سیلاب رخ می‌دهد و تأخیر زمانی بین آن‌ها به صورت مثبت می‌باشد. برای هیدروگراف با نقطه اوج یکسان و زمان پایه متفاوت، بیشینه آهنگ آبشستگی بار بستر در حالت پارامتر غیرماندگاری بیشتر اتفاق افتاده است. بیشینه آهنگ آبشستگی بستر با پارامتر غیرماندگاری رابطه مستقیم دارد و در حالت کلی می‌توان گفت کاهش ۸۸ درصدی پارامتر غیرماندگاری جریان منجر به کاهش ۷۶ درصدی مقدار بیشینه آهنگ باربستر می‌گردد. همچنین، آهنگ آبشستگی در شاخه صعودی هیدروگراف بیشتر از شاخه نزولی بوده که با کاهش پارامتر غیرماندگاری، فاصله بین دو شاخه در نمودار هیستریزیس رسوب کاهش یافته است.

۱- مقدمه

رودخانه‌های طبیعی آهنگ انتقال رسوب قابل‌توجهی را در طول سیلاب تجربه می‌کنند. داده‌های آماری رصدخانه سیلاب دارتموث^۱ بیانگر آن است که، تغییرات آب و هوایی باعث افزایش سیلاب‌های شدید در سراسر جهان شده است

(Brakenridge 2016). بنابراین، در آینده رودخانه‌های طبیعی تغییرات چشمگیری را در انتقال رسوب و مورفولوژی بستر تجربه خواهند کرد. مطالعات میدانی حاکی از آن است که رفتار رودخانه‌ها در زمان وقوع سیلاب بسیار متفاوت‌تر از حالت جریان ماندگار است. همچنین حجم عمده انتقال

^۱Dartmouth flood observatory



شبهه سازی جریان غیرماندگار و انتقال رسوبات را مورد مطالعه قرار دادند.

Wang et al. (2015) نشان دادند عمده تحرکات رسوبات درشت دانه در شاخه صعودی هیدروگراف صورت گرفته و بیشینه مقدار انتقال رسوب نزدیک نقطه اوج هیدروگراف رخ داده است. Maurin et al. (2016) نشان داد که شکل ذرات رسوب و شیب کانال از مشخصه های مهم در فرسایش بستر می باشند. Li et al. (2018) با بررسی بسترهای مختلف تحت جریان ماندگار و غیرماندگار نشان داد که انتقال شن در مخلوط شن و ماسه بیشتر از شن خالص است. Wang et al. (2019) بیان کردند که شدت هیدروگراف و پارامتر غیرماندگاری تأثیر بسیار زیادی بر مورفولوژی و انتقال بار بستر دارد. Ockelford et al. (2019) تأثیر زمان پایه سیلاب بر پایداری بستر رسوبی غیرچسبنده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد رابطه تغییرات زمان هیدروگراف سیلاب با آهنگ انتقال بار بستر به صورت غیرخطی می باشد. Plumb et al. (2020) دریافتند که در هیدروگراف های با زمان طولانی تر آهنگ آبشستگی کمتر بوده و نمودار هیستریزیس رسوب در آن ها در جهت عقربه های ساعت می باشد. منحنی هیستریزیس رسوب جهت بررسی رفتار رسوبات در شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف مورد استفاده قرار می گیرد.

Othman Ahmed et al. (2021) عمق آبشستگی و موقعیت آن در پایین دست کالورت ها را تحت جریان غیرماندگار مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش دبی در شاخه صعودی هیدروگراف، عمق آبشستگی بیشتر شده و در شاخه نزولی هیدروگراف عمق کاهش می یابد.

در اکثر پژوهش های قبلی، انتقال رسوب در جریان غیرماندگار را با ایجاد هیدروگراف های مثلثی و پله ای بررسی کرده اند. از نظر رفتاری هیدروگراف های مذکور تفاوت بسیار زیادی با هیدروگراف های طبیعی دارند. مطالعات انجام شده در حالت هیدروگراف طبیعی نیز تحت شرایط آزمایشگاهی خاص و با اندازه ذرات رسوب محدود صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، مکانیسم انتقال رسوب و آهنگ آبشستگی در رودخانه ها به صورت مدل سازی شرایط واقعی در یک کانال آزمایشگاهی با ایجاد هیدروگراف های تولیدی سیلاب بررسی شد.

رسوب و آبشستگی بستر رودخانه ها در سیلاب های بزرگ رخ می دهد (Berta and Bianco 2010; Lee and Balachandar 2012). اغلب نظریه ها و روابط انتقال رسوب در حالت جریان یکنواخت و ماندگار بیان شده است.

Chang et al. (2004) تأثیر دبی اوج هیدروگراف پله ای و زمان تداوم بر روی عمق نهایی آبشستگی را بررسی کردند. Lee et al. (2004) با ایجاد جریان ماندگار و غیرماندگار (هیدروگراف مثلثی)، به بررسی و مقایسه آهنگ آبشستگی پرداختند. نتایج آن ها نشان داد تنش تسلیم کل بستر در حالت غیرماندگار بیشتر از حالت ماندگار است. Oliveto and Hager (2005) با انجام آزمایش های جریان غیرماندگار با هیدروگراف های پله ای، به بررسی شکل حفره آبشستگی پرداختند. Sadeghi et al. (2008) عوامل مؤثر بر روابط بین رسوب نگارها، آب نگارها و حلقه های سنج در آبخیز می ژاپن را بررسی نمودند. نتایج حاکی از آن است که به ازای دبی معین، رسوب برآورد شده در شاخه صعودی هیدروگراف بیش تر از شاخه نزولی می باشد.

Lu et al. (2008) با بررسی آبشستگی پایه پل در زمان وقوع سیلاب دریافتند، عمق آبشستگی در مدل واقعی کمتر از مقدار عمق به دست آمده توسط معادلات تجربی است. Bombar et al. (2011) تأخیر زمانی بین مقدار اوج هیدروگراف ورودی و مقدار اوج منحنی انتقال رسوب را با ایجاد هیدروگراف های مثلثی و دوزنقه ای بررسی کردند. Mao (2012) با ایجاد هیدروگراف پله ای به این نتیجه دست یافت، مقدار رسوبات حمل شده در شاخه نزولی از شاخه صعودی هیدروگراف کمتر است. Martin and Jerolmack (2013) تأثیر هیدروگراف های پله ای بر روی بار بستر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد رابطه بین شکل بستر و دبی جریان، به زمان پایه هیدروگراف بستگی دارد. Esmaeeli (2014) با ایجاد هیدروگراف های مثلثی و دوزنقه ای، تأثیر پارامتر غیرماندگاری بر روی انتقال رسوب را بررسی کرد. Karimiaei and Zarati (2014) استفاده از هیدروگراف های مثلثی - پله ای به این نتیجه دست یافتند که زمان وقوع دبی اوج سیلاب تأثیر ناچیزی بر عمق آبشستگی نهایی دارد. Bai and Duan (2014) با حل همزمان معادلات ناویه - استوکس و معادلات انتقال رسوب،

¹Mie Prefecture

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آنالیز ابعادی و پارامترهای بی‌بعد

پارامتر بی‌بعد غیرماندگاری هیدروگراف^۱ (Γ_{HG}) برای اولین بار توسط Graf and Suszka (1985) و Suszka (1987) تعریف شده است. طبق رابطه (۱) پارامتر غیرماندگاری تابعی از نسبت تغییر در عمق جریان به کل مدت زمان هیدروگراف می‌باشد (Wang et al. 2019).

$$\Gamma_{HG} = \frac{(H_p - H_b)}{U_b^* (\Delta t_R + \Delta t_F)} = \frac{1}{U_b^*} \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (1)$$

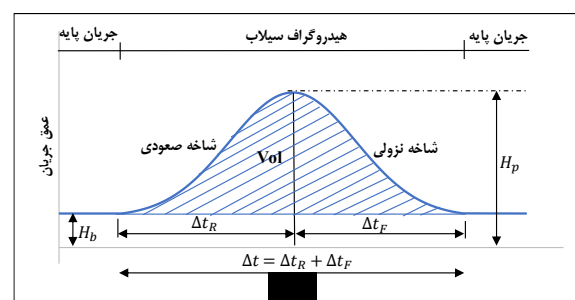
که، H_b عمق جریان پایه، H_p بیشترین عمق جریان، U_b^* سرعت برشی بستر در جریان پایه، Δt_R زمان شاخه صعودی، Δt_F زمان شاخه نزولی و ΔT زمان هیدروگراف می‌باشد. پارامتر بی‌بعد کل جریان^۲ یا شدت جریان (W_k) نیز برای اولین بار توسط Yen and Lee (1995) معرفی شده است.

$$W_k = \frac{U_b^{*2} Vol}{g H_b^3 B} \quad (2)$$

که، Vol حجم آب زیر منحنی هیدروگراف، g شتاب جاذبه زمین و B عرض کانال می‌باشد. شکل هیدروگراف نیز نقش مهمی در انتقال بار بستر دارد. در اکثر سیلاب‌ها مدت زمان شاخه صعودی (Δt_R) کمتر از مدت زمان شاخه نزولی (Δt_F) است. پارامتر شکل هیدروگراف (η) توسط Wang et al. (2019) مطرح گردیده که مقدار چولگی هیدروگراف را نشان می‌دهد (رابطه ۳).

$$\eta = \frac{\Delta t_R}{\Delta t_F} \quad (3)$$

در شکل (۱) برخی پارامترهای مهم هیدروگراف نشان داده شده است.



شکل ۱- تعریف ویژگی‌های هیدروگراف سیل

Fig. 1 Definition of flood hydrograph properties

بار بستر تسلیم نرمال‌سازی شده^۳ یا پارامتر تسلیم رسوب^۴ (W_t^*) نیز از پارامترهای بی‌بعد در انتقال رسوب است (رابطه ۴) (Bombar et al. 2011).

$$W_t^* = \frac{W_t}{\rho_s b d_{50}^2} \quad (4)$$

که، b عرض تله رسوب و W_t بار بستر کل انتقال یافته^۵ (Kg) می‌باشد. روابط (۱) تا (۴) پارامترهای بی‌بعد تأثیرگذار در انتقال رسوب در جریان غیرماندگار می‌باشند. در پژوهش حاضر تأثیر پارامتر بی‌بعد غیرماندگاری هیدروگراف (Γ_{HG}) بر حجم انتقال رسوب بستر مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲- شرایط آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانال به طول ۱۵ m با جداره‌های شیشه‌ای به ارتفاع ۰/۵ m و عرض ۰/۳ m واقع در آزمایشگاه هیدرولیک پیشرفته دانشگاه ارومیه انجام شد (شکل ۲). شیب بستر کانال و ریل‌های سنسورهای عمق‌سنج توسط دوربین نقشه برداری و آب راکد واسنجی شد. جهت کاهش تلاطم جریان، در ابتدای کانال چند لایه فیلتر قرار داده شد. دبی جریان در حین انجام آزمایش به‌وسیله مبدل الکتریکی قابل تغییر بود. صحت‌سنجی دبی جریان با استفاده از روش پیشنهادی (Martinz et al. 2005) به صورت اندازه‌گیری حجمی و استفاده از سرریز مستطیلی تیز انجام شد. خطای مقادیر قرائت شده توسط دبی‌سنج پس از مقایسه با نتایج روش‌های اندازه‌گیری حجمی و سرریز مستطیلی به ترتیب برابر با ۱/۷٪ و ۰/۸۲٪ به دست آمد. برای برداشت عمق جریان از سه عدد عمق سنج دیجیتالی استفاده گردید. جهت ایجاد هیدروگراف طبیعی سیلاب، یک برد واسط بین کامپیوتر و پمپ طراحی شد. این برد قابلیت اجرای هیدروگراف تولیدی سیلاب با مشخصات متفاوت را دارد. شیب کانال در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰/۰۳ در نظر گرفته شد.

³ Normalized total bed load yield

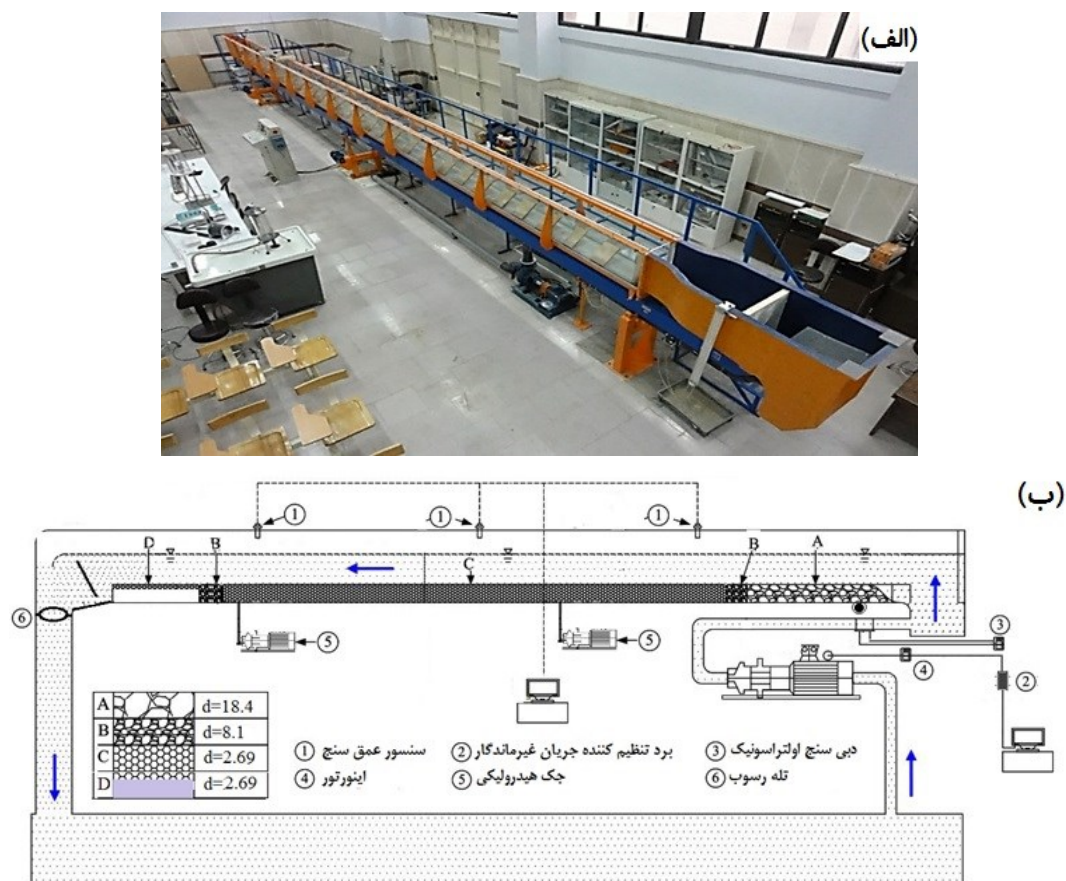
⁴ Sediment yield parameter

⁵ Total bedload mass transport

⁶ Inverter

¹ Unsteadiness parameter

² Total flow work



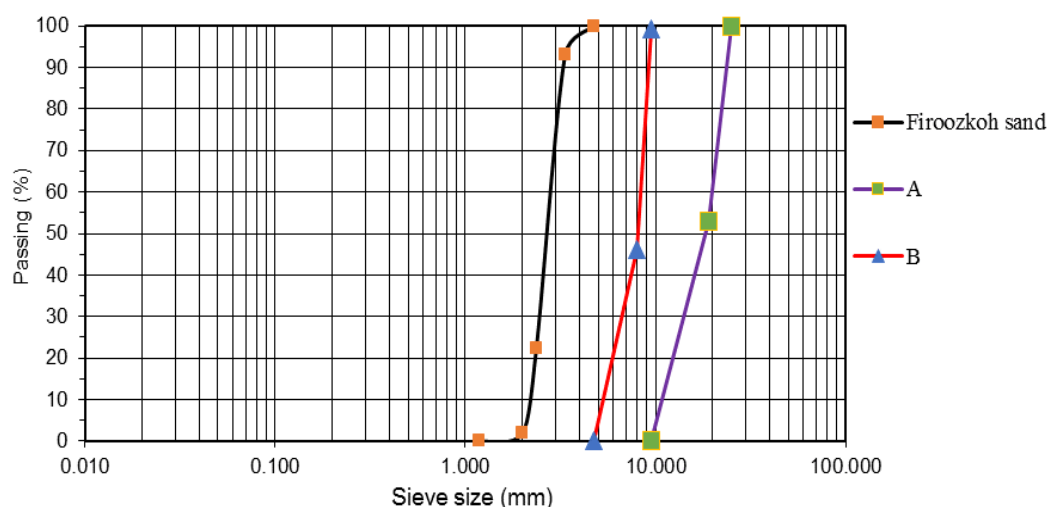
شکل ۲- کانال آزمایشگاهی: الف- تصویر کانال آزمایشگاهی و ب- شکل شماتیک کانال آزمایشگاهی

Fig. 2 Laboratory channel: a) Experimental flume image and b) Schematic diagram

۳-۲- مصالح و رسوبات

افزایش ارتفاع کف در ابتدا و انتهای کانال مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲- ب). این مصالح در ابتدا و انتهای کانال برای کاهش خطای تلاطم و توزیع یکنواخت جریان بر روی بستر فرسایش پذیر تعبیه گردید (Wang et al. 2015). منحنی دانه‌بندی مصالح در شکل (۳) ارائه شده است.

رسوبات یکنواخت نوع D₂ شرکت ماسه فیروزکوه با $d_{50}=2.69$ mm و ضریب انحراف معیار دانه‌ها برابر با $\sigma_u=1.17$ در فرایند آزمایش‌ها استفاده شد. دو نوع مصالح غیرقابل فرسایش A و B به‌منظور ایجاد محفظه رسوب و



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در کار پژوهشی حاضر

Fig. 3 Sediment grain size distribution curve used in present research work

ایجاد جریان پایه، هیدروگراف مورد بررسی از طریق برد تعبیه شده بین مبدل و کامپیوتر بر روی پمپ اعمال شد. برداشت رسوبات انتقال یافته از طریق تله قرار داده شده در انتهای کانال صورت گرفت. رسوبات در فواصل زمانی min ۱۰ به صورت جداگانه برداشت، خشک و وزن شد.

۲-۵- هیدروگراف‌های مورد بررسی

به علت عدم قطعیت رفتار رسوب در جریان غیرماندگار، هر آزمایش دو بار انجام شد (به طور مثال آزمایش UA1-2 تکرار دوم آزمایش UA1-1 است). در مجموع ۲۰ آزمایش با هیدروگراف‌های مختلف بررسی گردید. زمان آزمایش‌ها، دبی اوج و شرح جزئیات کامل آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. هیدروگراف‌های سیلاب بررسی شده در این پژوهش در شکل (۴) نشان داده شده است.

در هیدروگراف‌های سری الف، مقدار شدت هیدروگراف ثابت و برابر $W_k \approx 145$ است و مقدار پارامتر غیرماندگاری (Γ_{HG}) طبق جدول (۱) متغیر قرار داده شد. در هیدروگراف‌های سری ب، زمان پایه هیدروگراف‌ها نصف شده، شدت هیدروگراف ثابت و برابر $W_k \approx 69.5$ است و پارامتر غیرماندگاری طبق جدول (۱) متغیر در نظر گرفته شد.

به منظور ایجاد محفظه رسوب، کف کانال در طول ۴ m از بالادست و ۲ m از پایین دست به اندازه ۱۰ cm با استفاده از مصالح A و B پر شد (شکل ۲-ب). ابتدا یک لایه ۱۰ cm از رسوبات فیروزکوه به صورت یکنواخت داخل محفظه رسوب پر شد. سپس با استفاده از صفحه ریلی تعبیه شده بر روی کانال، لایه رسوبی کاملاً تسطیح گردید. ضخامت لایه رسوب به گونه‌ای انتخاب شد که در کل زمان هیدروگراف، بیشینه عمق آبشستگی کمتر از ضخامت رسوبات (۱۰ cm) باشد.

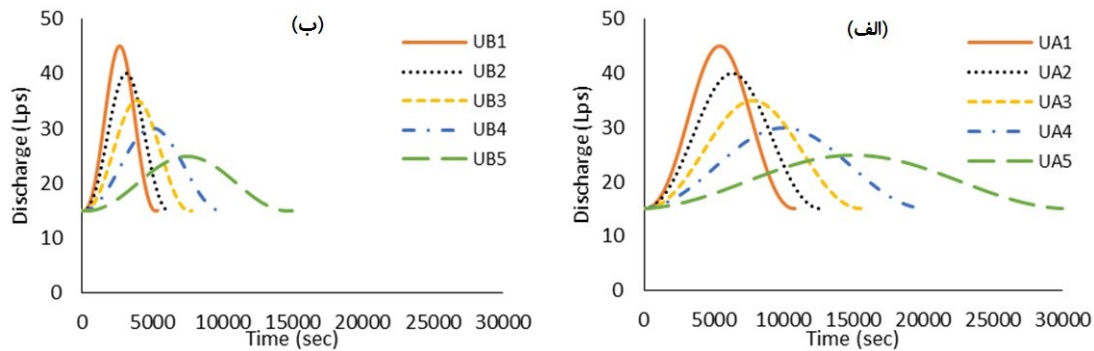
۲-۴- طرح ریزی آزمایش‌ها

به منظور اشباع مصالح، دریچه پایین دست کانال بالا آورده شده و جریان با دبی ۳ l/s ایجاد گردید. پس از اشباع کامل رسوبات، دبی به مقدار دبی پایه افزایش یافته و همزمان دریچه پایین دست نیز پایین آورده شد تا اثرات موج برگشتی حذف و جریان یکنواخت ایجاد شود. انتخاب مقدار دبی پایه، نسبت به قطر رسوبات بوده تا مصالح در آستانه حرکت قرار گیرند و هیچ گونه آبشستگی اتفاق نیفتد. با به کارگیری روابط شیلدز و فرض مقدار دبی پایه ۱۵ l/s، مقدار رینولدز برشی $Re_b^* = 110.58$ بوده و عدد شیلدز به دست آمده $(\tau_b^* = 0.04)$ نزدیک به عدد شیلدز بحرانی $(\tau_{b.cr}^* = 0.046)$ می‌باشد. بنابراین در دبی ۱۵ l/s هیچ گونه آبشستگی اتفاق نمی‌افتد و مصالح نزدیک به آستانه حرکت قرار دارند. پس از

جدول ۱- ویژگی‌های هیدروگراف‌های سیلاب در آزمایش‌ها

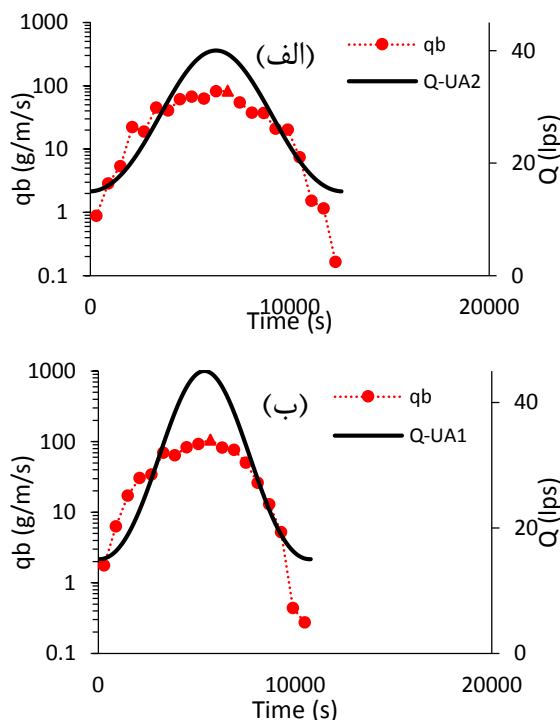
Table 1 Characteristics of tested flood hydrographs

Series	Test	Q_b (m ³ /s)	Q_p (m ³ /s)	ΔT (s)	Γ_{HG} ($\times 10^{-4}$)	W_k	η
Series 1	UA1-1	0.015	0.045	10800	2.02	144.81	1
	UA1-2	0.015	0.045	10800	2.04	145.23	1
	UA2-1	0.015	0.04	12600	1.44	145.62	1
	UA2-2	0.015	0.04	12600	1.41	149.08	1
	UA3-1	0.015	0.035	15600	0.896	145.00	1
	UA3-2	0.015	0.035	15600	0.903	144.66	1
	UA4-1	0.015	0.03	20000	0.522	146.85	1
	UA4-2	0.015	0.03	20000	0.513	147.29	1
	UA5-1	0.015	0.025	30000	0.24	150.41	1
	UA5-2	0.015	0.025	30000	0.233	149.80	1
Series 2	UB1-1	0.015	0.045	5400	4.05	69.32	1
	UB1-2	0.015	0.045	5400	4.03	69.03	1
	UB2-1	0.015	0.040	6300	2.89	69.44	1
	UB2-2	0.015	0.040	6300	2.93	69.77	1
	UB3-1	0.015	0.035	7800	1.79	69.48	1
	UB3-2	0.015	0.035	7800	1.85	69.41	1
	UB4-1	0.015	0.03	10000	1.04	69.73	1
	UB4-2	0.015	0.03	10000	1.1	69.52	1
	UB5-1	0.015	0.025	15000	0.48	68.96	1
	UB5-2	0.015	0.025	15000	0.477	69.07	1



شکل ۴- هیدروگراف‌های سیلاب در آزمایش‌ها: الف- سری اول (UA) و ب- سری دوم (UB)
Fig. 4 Flood hydrographs of experiments: a) Series 1 (UA) and b) Series 2 (UB)

شکل (۵) بیان کاملی از تفاوت رفتار رسوب در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۵)، منحنی بار بستر تجمعی به صورت شکل S است درحالی که در جریان ماندگار منحنی بار بستر تجمعی به صورت یک خط صاف می‌باشد (Lee et al. 2004). با توجه به شکل (۵)، هرچه شیب شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف و نقطه اوج دبی جریان کمتر باشد، منحنی بار بستر تجمعی به حالت خط صاف نزدیک‌تر شده است. بنابراین رفتار رسوبات در جریان‌های غیرماندگار با شدت پایین، تقریباً مشابه با جریان ماندگار است. تغییرات دبی و آهنگ آبشستگی بستر (q_b) برحسب زمان و نمودار هیستریزیس بار بستر برای آزمایش‌های UA در شکل (۶) نشان داده شده است.

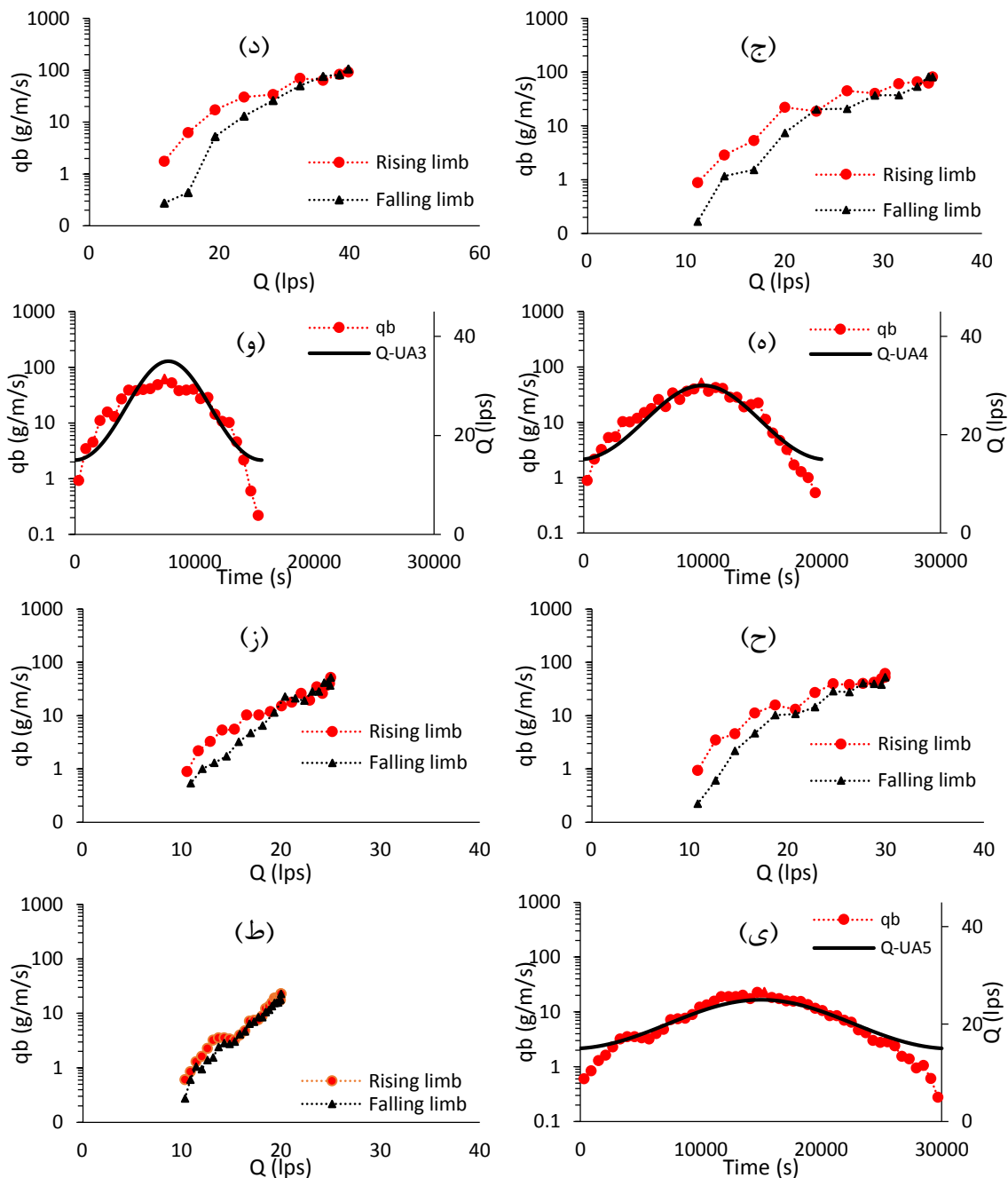


۳- یافته‌ها و بحث
همان‌طور که اشاره شد، ۱۰ حالت آزمایش‌های سری UA و ۱۰ حالت سری UB در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. جهت برآورد آهنگ آبشستگی، میانگین دو آزمایش در نظر گرفته شد. برای حذف نیروی پَسار^۱ از اصلاح جداره ونونی (Cheng 2011) برای محاسبه سرعت برشی بستر استفاده شد. دبی تجمعی رسوب بر حسب زمان برای آزمایش‌های UA و UB در شکل (۵) آورده شده است.

شکل ۵- منحنی‌های بار بستر تجمعی: الف- سری اول (UA) و ب- سری دوم (UB)

Fig. 5 Cumulative bedload curves: a) Series 1 (UA) and b) Series 2 (UB)

^۱Drag



شکل ۶- تغییرات زمانی دبی (Q)، آهنگ آبشستگی بستر (q_b) و هیستریزیس رسوب: الف- آهنگ آبشستگی بستر UA1، ب- آهنگ آبشستگی بستر UA2، ج- هیستریزیس UA1، د- هیستریزیس UA2، ه- آهنگ آبشستگی بستر UA3، و- آهنگ آبشستگی بستر UA4، ز- هیستریزیس UA3، ح- هیستریزیس UA4، ط- آهنگ آبشستگی بستر UA5 و ی- هیستریزیس UA5
 Fig. 6 Temporal changes of flow rate (Q), bed scour rate (q_b) and hysteresis loop: a) Bed scour rate UA1, b) Bed scour rate UA2, c) Hysteresis UA1, d) Hysteresis UA2, e) Bed scour rate UA3, f) Bed scour rate UA4, g) Hysteresis UA3, h) Hysteresis UA4, i) Bed scour rate UA5 and j) Hysteresis UA5

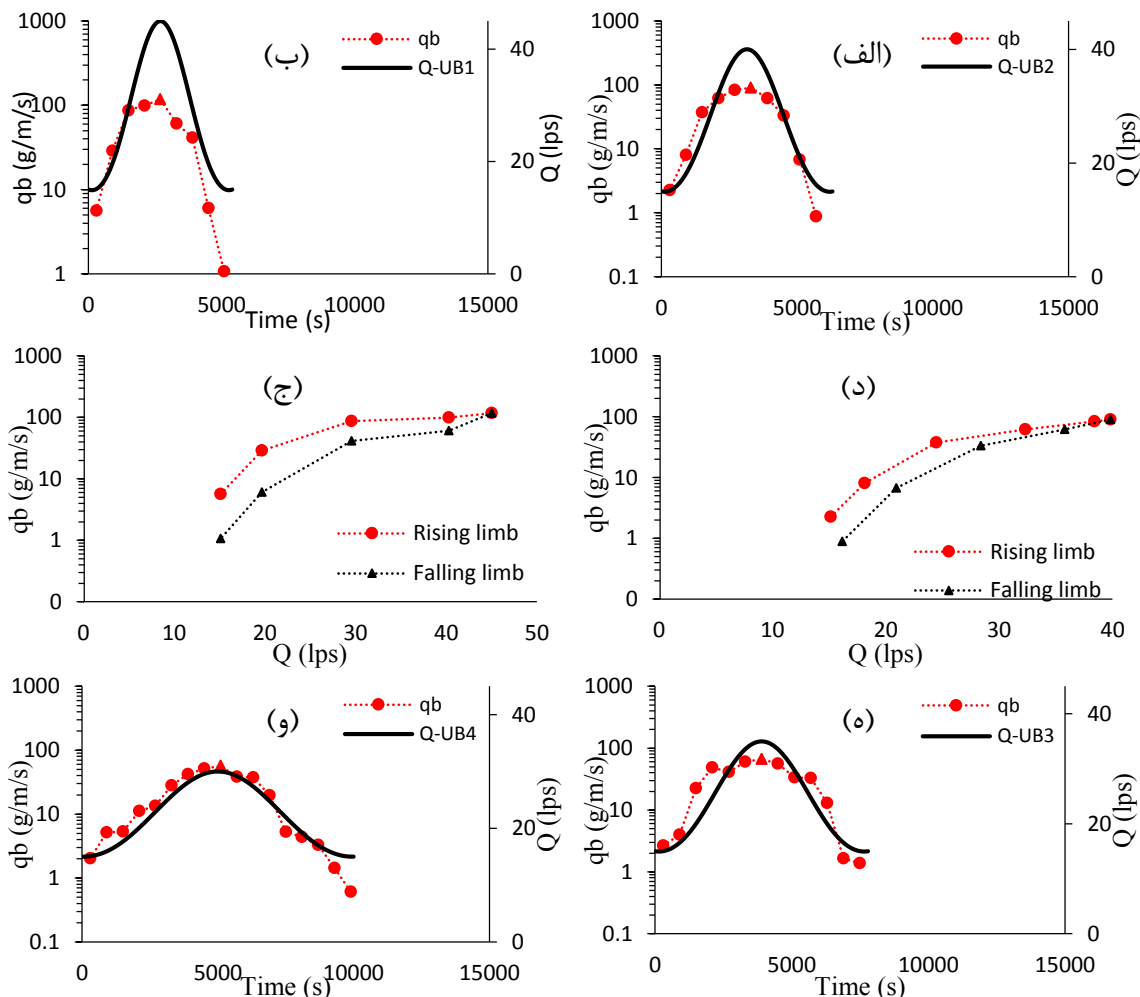
اوج هیدروگراف رسوب (q_{bpeak}) نزدیک دبی اوج (Q_p) با تأخیر زمانی جزئی رخ داده است. تأخیر زمانی در چهار حالت UA1، UA2، UA3، UA4 و UA5 مثبت و در حالت UA3 منفی می‌باشد. به عبارتی، به دلیل تداوم جزئی حرکت تپه‌های شنی و رسوبات بلند شده از کف، بین اوج هیدروگراف رسوب و دبی اوج تأخیر زمانی مثبت وجود دارد. علت تفاوت آزمایش

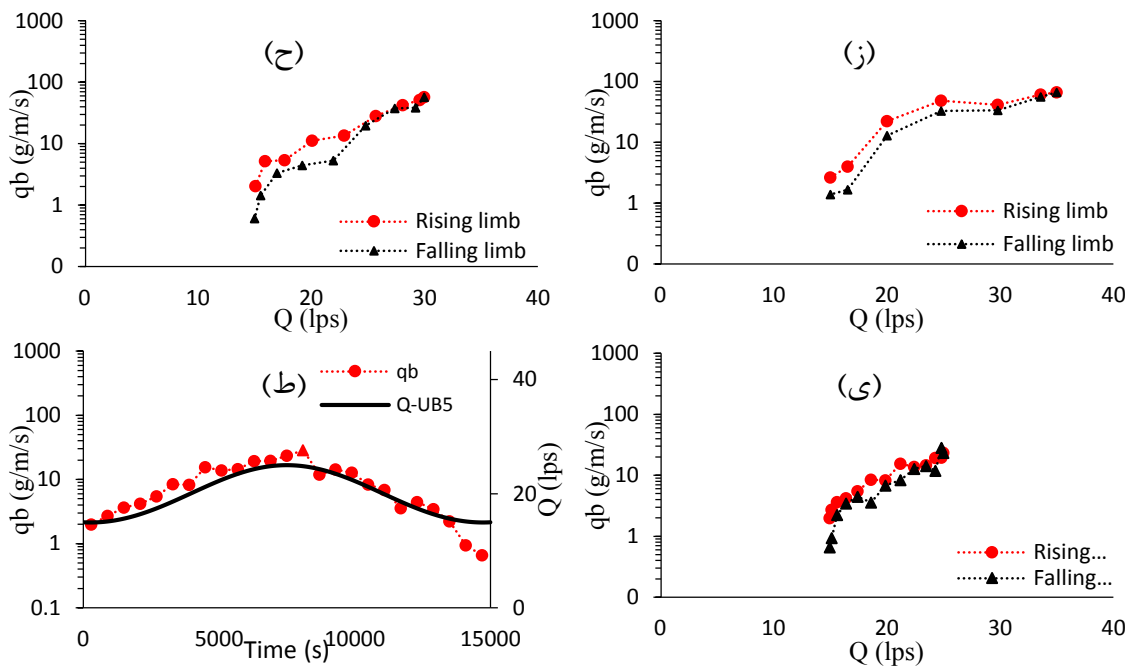
با توجه به شکل (۶)، آهنگ آبشستگی بستر (q_b) در شاخه صعودی هیدروگراف افزایش و در شاخه نزولی کاهش یافته است. آهنگ انتقال بار بستر با پارامتر غیرماندگاری رابطه مستقیم دارد. علت نوسان آهنگ آبشستگی بستر، دو عامل نرمال‌سازی رسوبات جمع‌آوری شده در ده دقیقه به یک ثانیه و حرکت تصادفی تپه‌ای شکل ماسه‌های رونده است. نقاط

رسوب به ترتیب از حالت UA1 تا UA5 کمتر شده و در نتیجه با کاهش پارامتر غیرماندگاری جریان، میزان اختلاف آبشستگی بستر (q_b) در دو شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف کمتر شده است.

مطابق مشاهدات آزمایشگاهی هرچه شیب ناحیه صعودی هیدروگراف و دبی اوج بیشتر، طول موج ایجاد شده و ارتفاع تپه‌های رسوبات انتقالی بیشتر شده است. در شاخه صعودی هیدروگراف ابعاد تپه‌های رسوبات انتقالی با گذشت زمان افزایش و در شاخه نزولی یافته است. تغییرات دبی و آهنگ آبشستگی بستر (q_b) بر حسب زمان و نمودار هیستریزس بار بستر برای آزمایش‌های UB در شکل (۷) نشان داده شده است.

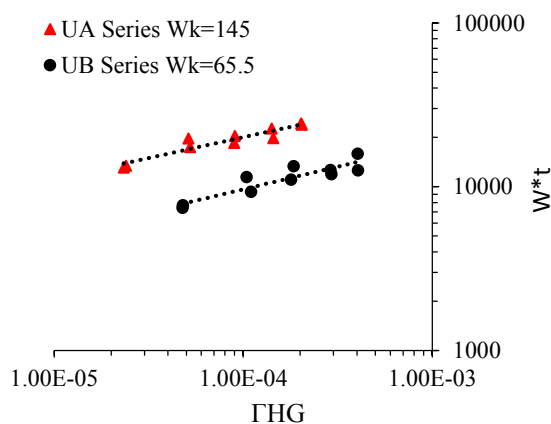
UA3 عدم قطعیت رفتار رسوبات است. با بررسی نمودارهای آهنگ آبشستگی بستر (q_b) در مقابل دبی جریان (Q) مشاهده می‌شود نمودار هیستریزس رسوب در جهت عقربه‌های ساعت بوده و آبشستگی برای دبی معین در شاخه صعودی هیدروگراف بیشتر از شاخه نزولی است. نتیجه مذکور همسو با یافته‌های محققانی همچون Wang et al. (2019) و Plumb et al. (2020) می‌باشد. علت این امر وجود موج مثبت جریان غیرماندگار در شاخه صعودی هیدروگراف است که باعث افزایش سرعت جریان و تنش برشی بستر می‌شود. همچنین در شاخه نزولی هیدروگراف با کاهش دبی جریان، سرعت حرکت تپه‌های رسوبی کمتر شده و قسمتی از حجم رسوبات در حال حرکت ته‌نشین می‌شود. فاصله شاخه صعودی و نزولی در نمودارهای هیستریزس





شکل ۷- تغییرات زمانی دبی (Q)، آهنگ آبشستگی بستر (q_b) و هیستریزیس رسوب: الف- آهنگ آبشستگی بستر UB1، ب- آهنگ آبشستگی بستر UB2، ج- هیستریزیس UB1، د- هیستریزیس UB2، ه- آهنگ آبشستگی بستر UB3، و- آهنگ آبشستگی بستر UB4، ز- هیستریزیس UB3، ح- هیستریزیس UB4، ط- آهنگ آبشستگی بستر UB5 و ی- هیستریزیس UB5

Fig. 7 Temporal changes of flow rate (Q), bed scour rate (q_b) and hysteresis loop: a) Bed scour rate UB1, b) Bed scour rate UB2, c) Hysteresis UB1, d) Hysteresis UB2, e) Bed scour rate UB3, f) Bed scour rate UB4, g) Hysteresis UB3, h) Hysteresis UB4, i) Bed scour rate UB5 and j) Hysteresis UB5



شکل ۸- تأثیر پارامتر غیرماندگاری بر تغییرات بار بستر تسلیم
 نرمال سازی شده (آزمایش‌های UA و UB)

Fig. 8 Effect of unsteadiness parameter on normalized bedload yield changes (UA and UB experiments)

با مقایسه مقادیر بیشینه آهنگ آبشستگی بار بستر برای آزمایش‌های UA و UB می‌توان نتیجه گرفت بیشینه آهنگ آبشستگی بستر (q_{bpeak}) با پارامتر غیرماندگاری رابطه مستقیم دارد. در آزمایش‌ها سری UA1-5 با کاهش ۸۸٪ پارامتر غیرماندگاری هیدروگراف، بیشینه آهنگ آبشستگی بستر (q_{bpeak}) ۷۵/۹٪ کاهش یافته است. در آزمایش‌ها سری

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های UB، مشابه نتایج به دست آمده در آزمایش‌های UA می‌باشد و در این آزمایش‌ها نیز مشاهده می‌گردد با کاهش پارامتر غیرماندگاری، آهنگ انتقال بار بستر کاهش می‌یابد. مقدار اوج هیدروگراف رسوب بعد از اوج هیدروگراف سیلاب اتفاق افتاده است. با مقایسه نتایج آزمایش‌های UB با سری UA مشاهده می‌شود مقدار بیشینه آهنگ آبشستگی بار بستر (q_{bpeak}) برای حالت UA1 و UB1 از مقدار ۱۰۶/۵ به ۱۱۷/۵۸، برای حالت UA2 و UB2 از ۸۲/۷۵ به ۹۰/۲۵، برای حالت UA3 و UB3 از ۶۱/۶ به ۶۶/۶۷، برای حالت UA4 و UB4 از ۵۱/۴ به ۵۶/۸۶ و برای حالت UA5 و UB5 از ۲۵/۶۷ به ۲۵/۶۷ g/s.m افزایش یافته است. به عبارتی، با کاهش زمان پایه هیدروگراف، آهنگ آبشستگی افزایش یافته است. علت این امر نیز کوتاه بودن زمان پایه هیدروگراف و شدیدتر بودن شیب شاخه صعودی و به تبع آن شدت بالاتر موج ایجادشده دیگر شاخه صعودی هیدروگراف می‌باشد. در آزمایش‌ها UB نیز در حالت کلی می‌توان گفت نمودار آهنگ انتقال بار بستر (q_b) در مقابل دبی جریان (Q) بیانگر یک نمودار هیستریزیس ساعت گرد می‌باشد.

مطابق شکل (۸)، رابطه توانی بین پارامتر غیرماندگاری هیدروگراف (Γ_{HG}) و بار بستر تسلیم نرمال‌سازی شده (W_t^*) برای آزمایش‌های UA (رابطه ۵) و آزمایش‌های UB (رابطه ۶) به دست آمده است.

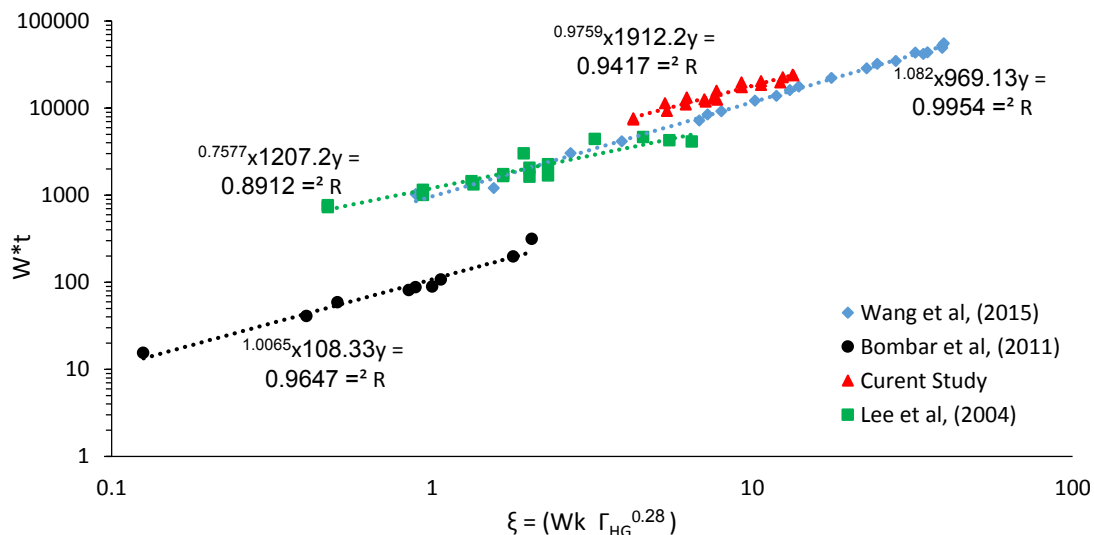
$$W_t^* = 20745 \Gamma_{HG}^{0.2537} (R^2 = 0.8916) \text{ FOR } W_k = 145 \quad (5)$$

$$W_t^* = 12272 \Gamma_{HG}^{0.2762} (R^2 = 0.8226) \text{ FOR } W_k = 65.5 \quad (6)$$

(W_k) تعریف شده است. با استفاده از برازش غیرخطی، مقدار x برابر با ۰/۲۸ به دست آمده است. تغییرات بار بستر تسلیم نرمال‌سازی شده (W_t^*) برحسب پارامتر ترکیبی هیدروگراف (ξ) در شکل (۹) نشان داده شده است.

UB1-5 با کاهش ۸۸ درصدی پارامتر غیرماندگاری هیدروگراف، بیشینه آهنگ آبستگي بستر (q_{bpeak}) ۷۶٪ کاهش یافته است. تغییرات بار بستر تسلیم نرمال‌سازی شده (W_t^*) برحسب پارامتر غیرماندگاری هیدروگراف (Γ_{HG}) برای آزمایش‌های UA و UB در شکل (۸) نشان داده شده است.

مطابق روابط (۵) و (۶)، برای مقدار ثابت W_k ، آهنگ آبستگي با افزایش شیب هیدروگراف و کاهش زمان پایه رابطه مستقیم دارد. برای برازش همزمان آزمایش‌های UA و UB، پارامتر ترکیبی $\xi = W_k \Gamma_{HG}^x$ براساس (Γ_{HG}) و



شکل ۹- تأثیر پارامتر ترکیبی هیدروگراف (ξ) بر تغییرات بار بستر تسلیم نرمال‌سازی شده (W_t^*) (آزمایش‌های UA و UB)

Fig. 9 Effect of hydrograph combination parameter (ξ) on normalized bedload yield changes (W_t^*) UA and UB (experiments)

۱- برای بررسی آبستگي در حالت هیدروگراف با شیب و دبی اوج زیاد، روابط جریان ماندگار خطای زیادی داشته و باید از روابط جریان غیرماندگار استفاده گردد.

۲- بیشینه آهنگ آبستگي همواره نزدیک به اوج هیدروگراف سیلاب رخ داده و تأخیر زمانی بین آن‌ها به صورت مثبت می‌باشد.

۳- آهنگ آبستگي در شاخه صعودی هیدروگراف بیشتر از شاخه نزولی بوده که با کاهش پارامتر غیرماندگاری، فاصله بین آن‌ها در نمودار هیستریزس رسوب کاهش می‌یابد. تغییرات آهنگ انتقال بار بستر (q_b) برحسب دبی جریان (Q) به صورت هیستریزس ساعت‌گرد می‌باشد.

مطابق شکل (۹)، رابطه توانی (۷) بین ξ و W_t^* ارائه شده است.

$$W_t^* = 1912.2 \xi^{0.9759}, (R^2 = 0.9417) \quad (7)$$

پارامتر ξ و W_t^* رابطه مستقیم دارند که در پژوهش‌های Wang et al. (2015) و Bombar et al. (2011) نیز به این موضوع اشاره شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر پارامتر غیرماندگاری بر آهنگ انتقال رسوبات بستر مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی نتایج زیر به دست آمده است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل (aghazadehb@znu.ac.ir) قابل ارسال می‌باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارد که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارد.

References

- Bai, Y., & Duan, J. G. (2014). Simulating unsteady flow and sediment transport in vegetated channel network. *J. Hydrol.*, 515, 90-10. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2014.04.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.030)
- Berta, A. M., & Bianco, G. (2010). An expression for the water-sediment moving layer in unsteady flows valid for open channels and embankments. *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.*, 10(5), 1051-1059. DOI: [10.5194/nhess-10-1051-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-1051-2010)
- Bombar, G., Elçi, Ş., Tayfur, G., Güney, M. Ş., & Bor, A. (2011). Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows. *J. Hydraul. Eng.*, 137(10), 1276-1282. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000412](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000412)
- Brakenridge, G. R. (2016). Global active archive of large flood events. Dartmouth Flood Observatory. University of Colorado. Available online at: <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>.
- Chang, W. Y., Lai, J. S., & Yen, C. L. (2004). Evaluation of scour depth at circular bridge piers. *J. Hydraul. Eng.*, 130(9), 905-913. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:9\(905\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(905))
- Cheng, N. S. (2011). Revisited vanoni-brooks sidewall correction. *Int. J. Sediment Res.*, 26(4), 524-528. DOI: [10.1016/S1001-6279\(12\)60010-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(12)60010-9)
- Esmaili, K. (2014). Unsteadiness Parameter Effect on Sediment Transport under Flash Flood. *Iran. J. Irrig. Drain.*, 8(1), 26-34. [In Persian]
- Graf, W.H., and Suszka, L. (1985). Unsteady flow and its effect on sediment transport. Proc. 21st IAHR Congress. Mel-bourne, Australia.
- Karimiaei Tabarestani, M., & Zarati, A. (2014). Effect of flood hydrograph peak time on local scour around the bridge pier. *J. Hydraul.*, 9(3), 15-32 [In Persian] DOI: [10.30482/jhyd.2014.10173](https://doi.org/10.30482/jhyd.2014.10173)
- Lee, H., & Balachandar, S. (2012). Critical shear stress for incipient motion of a particle on a rough bed. *J. Geophys. Res. (Earth Surf.)* 117, 1026. DOI: [10.1029/2011JF002208](https://doi.org/10.1029/2011JF002208)
- Lee, K. T., Liu, Y. L., & Cheng, K. H. (2004). Experimental investigation of bedload transport processes under unsteady flow conditions. *Hydrol. Proces*, 18(13), 2439-2454 DOI: [10.1002/hyp.1473](https://doi.org/10.1002/hyp.1473)
- Li, Z. J., Qian, H. L., Cao, Z. X., Liu, H. H., Pender, G., & Hu, P. H. (2018). Enhanced bedload sediment transport by unsteady flows in a degrading channel. *Int. J. Sediment Res.* 33, 327-339. DOI: [10.1016/j.ijsrc.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.03.002)
- 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. *J. Hydraul. Eng.*, 134(6), 810-821. DOI: [0.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:6\(810](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:6(810)
- Mao, L. (2012). The effect of hydrographs on bedload transport and bed sediment spatial arrangement. *J. Geophys. Res.*, 117(F3). DOI: [10.1029/2012JF002428](https://doi.org/10.1029/2012JF002428)
- Martin, R. L., & Jerolmack, D. J. (2013). Origin of hysteresis in bed form response to unsteady flows. *Water Resour. Res.*, 49(3), 1314-1333. DOI: [10.1002/wrcr.20093](https://doi.org/10.1002/wrcr.20093)

- Martinez, J., Reca, J., Morillas, T., & Lopez, J. (2005). Design and Calibration of a Compound Sharp-Crested Weir. *J. Hydraul. Eng.*, 131(2), 112-116. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(112\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(112))
- Maurin, R., Chauchat, J., & Frey, P. (2016). Dense granular flow rheology in turbulent bedload transport. *J. Fluid Mechanics*, 804, 490-512. DOI: [10.1017/jfm.2016.520](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.520)
- Ockelford, A., Woodcock, S., & Haynes, H. (2019). The impact of inter-flood duration on non-cohesive sediment bed stability. *Earth Surf. Proc. Land*. 44(14), 2861–2871. DOI: [10.1002/esp.4713](https://doi.org/10.1002/esp.4713)
- Oliveto, G., & Hager, W. H. (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *J. Hydraul. Eng.*, 131(2), 97-105. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(97))
- Othman Ahmed, K., Amini, A., Bahrami, J., Kavianpour, M. R., & Hawez, D. M. (2021). Numerical Modeling of Depth and Location of Scour at Culvert Outlets under Unsteady Flow Conditions. *J. Pipeline Syst. Eng. Practice*, 12(4), 04021040. DOI: [10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000578)
- Plumb, B. D., Juez, C., Annable, W. K., McKie, C. W., & Franca, M. J. (2020). The impact of hydrograph variability and frequency on sediment transport dynamics in a gravel-bed flume. *Earth Surf. Proc. Land*. 45(4), 816–830. DOI: [10.1002/esp.4770](https://doi.org/10.1002/esp.4770)
- Sadeghi S. H. R., Mizuyama T., Miyata S., Gomi T., Kosugi K., Mizugaki T. F., & Onda Y. (2008). Determinant Factors of Sediment Graphs and rating Loops in a Reforested Watershed. *J. Hydrol.*, 356, 271– 282. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.005)
- Suszka, U. L. (1987). Sediment transport at steady and unsteady flow. *EPFL*. DOI: [10.5075/epfl-thesis-704](https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-704)
- Wang, L., Cuthbertson, A. J., Pender, G., & Cao, Z. (2015). Experimental investigations of graded sediment transport under unsteady flow hydrographs. *Int. J. Sediment Res.*, 30(4), 306-320. DOI: [10.1016/j.ijsrc.2015.03.010](https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.03.010)
- Wang, L., Cuthbertson, A., Pender, G., & Zhong, D. (2019). Bedload sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs. *Water Resour. Res.*, 55. DOI: [10.1029/2018WR024413](https://doi.org/10.1029/2018WR024413)
- Yen, C.-L. & Lee, K. T. (1995). Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow. *J. Hydraul. Eng.*, 121(8):591-599. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:8\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:8(591))

How to cite this paper:

Aghazadeh Qharebagh, B., Bazargan, J. and Mohammadi, M. (2023). Experimental investigation of bed scouring rate in flood conditions. *Water Environ. Eng.*, 9(3), 384-398, DOI: [10.22034/JEWE.2022.332978.1741](https://doi.org/10.22034/JEWE.2022.332978.1741)