

B. Aghazadeh Qharebagh

PhD Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

e-mail: aghazadehb@znu.ac.ir

J. Bazargan *

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

e-mail: jbazargan@znu.ac.ir

M. Mohammadi

Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

e-mail: m.mohammadi@urmia.ac.ir

Experimental Investigation of the Effects of Flood Hydrograph Intensity on Bed Erosion

Natural rivers experience significant sediment transport rates during floods. The purpose of this study was to investigate the effects of flood hydrograph intensity parameter on the amount of bed sediment transport rate. For this purpose, a real unsteady flow hydrograph was created inside a 15 meters long tilting flume by installing an interface board between the computer and the pump inverter. Sediments with a d_{50} of 2.69 mm have been put uniformly on the bottom of the channel and the flood hydrograph has been applied on it after saturation. 20 cases of hydrographs with different intensity parameters were tested and the erosion rate was obtained during the hydrograph time. The results show that the maximum erosion rate always occurs near the peak of the flood hydrograph and the time delay between the peak of the flood hydrograph and the peak of the sediment hydrograph is mostly positive. The erosion rate in the rising limb of the hydrograph is higher than the falling limb, and the distance between them decreases in the hysteresis diagram as the flow intensity parameter decreases. The changes of bedload transport rate (qb) in terms of flow rate (Q) are clockwise hysteresis. By decreasing the hydrograph intensity parameter by 32, 57, 75 and 87%, the total volume of transferred sediments decreases by 27, 51, 78 and 90%, respectively. A 50% decrease in the base time of the hydrograph under the same conditions has caused a 46% decrease in the total volume of transported sediments.

Keywords: River, Unsteady Flow, Flood Hydrograph, Erosion Rate, Sediment Transport.

* Corresponding author

Received 01 September 2022, Revised 16 October 2022, Accepted 19 October 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.8557.1424

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شدت هیدروگراف سیلاب بر فرسایش بستر تحت جریان غیرماندگار واقعی

رودخانه‌های طبیعی، نرخ انتقال رسوب قابل‌توجهی را در خلال وقوع سیلاب تجربه می‌کنند. هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر پارامتر شدت هیدروگراف سیلاب بر میزان انتقال رسوبات بستر است. بدین منظور، با تعبیه یک بُرد واسط بین رایانه و مبدل پمپ، جریان غیرماندگار واقعی با دقت بالا درون کانال شیب‌پذیر به طول ۱۵ متر ایجاد گردید. رسوبات به قطر ۲/۶۹ میلی‌متر در کف کانال به‌صورت یکنواخت تسطیح گردیده و پس از اشباع شدن، هیدروگراف سیلاب بر روی آن اعمال گردیده است. ۲۰ حالت هیدروگراف با پارامتر شدت متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته و نرخ فرسایش در طی زمان هیدروگراف به دست آمده است. نتایج حاصل بیانگر آن است که بیشینه نرخ فرسایش همواره نزدیک به اوج هیدروگراف سیلاب رخ می‌دهد و تأخیر زمانی بین اوج هیدروگراف سیلاب و اوج هیدروگراف رسوب، عمدتاً به‌صورت تأخیر مثبت بوده است. نرخ فرسایش در شاخه صعودی هیدروگراف بیشتر از شاخه نزولی بوده که با کاهش پارامتر شدت جریان، فاصله بین آن‌ها در نمودار هیستریزس رسوب کاهش می‌یابد. تغییرات نرخ انتقال بار بستر (q_b) برحسب دبی جریان (Q) به‌صورت هیستریزس ساعت‌گرد می‌باشد. با کاهش ۳۲، ۵۷، ۷۵ و ۸۷ درصدی پارامتر شدت هیدروگراف، حجم کل رسوبات انتقال یافته به ترتیب ۲۷، ۵۱، ۷۸ و ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. کاهش ۵۰ درصدی زمان پایه هیدروگراف در شرایط یکسان، به‌طور میانگین موجب کاهش ۴۶ درصدی حجم کل رسوبات انتقال یافته شده است.

واژگان کلیدی: رودخانه، جریان غیرماندگار، هیدروگراف سیلاب، نرخ فرسایش، انتقال رسوب، مطالعه آزمایشگاهی.

بهمن آقازاده قره‌باغ

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
پست الکترونیک:

aghazadehb@znu.ac.ir

جلال بازرگان*

دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
پست الکترونیک:

jbazargan@znu.ac.ir

میرعلی محمدی

دانشیار، گروه مهندسی عمران (هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه)، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
پست الکترونیک:

m.mohammadi@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

شاخه صعودی بیشتر نسبت به شاخه نزولی بوده و از چند ساعت تا چند روز طول می‌کشند [۱-۴]. درحالی‌که هیدروگراف‌های مسطح که توسط ذوب برف یا بارندگی با شدت کم ایجاد می‌شوند، دارای شیب شاخه صعودی و نزولی بسیار کمی بوده و تا چند صد ساعت به طول می‌انجامند [۵ و ۶].

شدت هیدروگراف سیلاب در رودخانه‌های طبیعی تأثیر زیادی بر سرعت برشی بستر و به‌تبع آن انتقال رسوبات بستر خواهد داشت. از طرفی، سیلاب پدیده‌ای کوتاه‌مدت می‌باشد که به علت طغیان شدید و ماهیت خشونت‌آمیز، برداشت اطلاعات رسوب در طی آن امری دشوار می‌باشد [۲].

جریان‌های غیرماندگار در رودخانه‌ها عمدتاً به‌صورت سیلاب ظاهر می‌شوند که در محیط‌های اقلیمی مختلف رخ می‌دهند [۱]. این جریان‌ها از نظر شدت، شکل و مدت هیدروگراف بسته به منطقه و منشأ سیلاب متفاوت هستند. هیدروگراف‌های ناشی از جریان ناگهانی (مانند سیلاب‌های ناگهانی یا رهایی آب سدها) دارای شیب

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۰۶/۱۰، بازنگری ۱۴۰۱/۰۷/۲۴، پذیرش ۱۴۰۱/۰۷/۲۷.
(DOI): 10.22091/cer.2022.8557.1424 شناسه دیجیتال

شاخه صعودی هیدروگراف صورت گرفته و بیشینه مقدار انتقال رسوب نزدیک نقطه اوج هیدروگراف رخ داده است [۲۵]. نتایج پژوهش لی^۳ و همکاران نشان داد که انتقال شن در مخلوط شن و ماسه بیشتر از شن خالص است [۲۶]. همچنین وانگ و همکاران بیان کردند که شدت هیدروگراف و پارامتر غیرماندگاری تأثیر بسیار زیادی بر مورفولوژی و انتقال بار بستر دارد [۲۷]. نتایج آزمایشات خاجوی و همکاران نشان داد چولگی هیدروگراف تأثیر معنی داری بر عمق آبستتگی نهایی ندارد؛ اما با چهار برابر کردن زمان پایه هیدروگراف، حدود ۲۰ درصد به عمق آبستتگی نهایی اضافه شده است [۲۸].

در زمینه روش‌های عددی نیز انتقال رسوبات تحت جریان غیردائمی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. این روش‌ها اغلب به صورت یک‌بعدی بوده است [۲۹ و ۳۱]، اما تحقیقات بسیاری نیز بر روی روش‌های عددی پیچیده دوبعدی و سه‌بعدی انجام گردیده است [۳۲ و ۳۵]. علیرغم وجود چنین روش‌های عددی پیشرفته، این مدل‌ها برای واسنجی و توسعه، نیازمند اندازه‌گیری‌های قابل اعتماد میدانی و آزمایشگاهی هستند.

نرخ انتقال رسوب در طی هیدروگراف رفتار هیسترتیک^۴ دارد. هیستریزیس یک اثر تأخیری است که در جریان‌های غیرماندگار منجر به تأخیر زمانی بین دبی اوج هیدروگراف و اوج منحنی نرخ انتقال رسوب می‌شود [۳۶]. در چنین مواردی، نرخ انتقال رسوب برای یک دبی یکسان در طول شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف، مقدار متفاوتی خواهد داشت [۳۷].

دو حالت متداول جهت طبقه‌بندی رفتار هیسترتیک، در جهت عقربه‌های ساعت و خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد. هیستریزیس در جهت عقربه‌های ساعت با انتقال رسوب بیشتر در طول شاخه

بحث آبستتگی، قدمتی طولانی در علم هیدرولیک داشته و به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و همچنین به جهت نبودن رابطه مناسب، همچنان مورد توجه خاص محققان علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه بوده است [۷]. روش‌های زیادی جهت تخمین بار بستر در شرایط جریان غیرماندگار با استفاده از روابط جریان ماندگار پیشنهاد داده شده است. در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته، با پله‌ای فرض کردن هیدروگراف سیلاب و تقریب جریان غیرماندگار به صورت چند گام جریان ماندگار، روابطی جهت تخمین فرسایش بستر ارائه شده است [۸-۱۴]. طبق مطالعات اخیر، نتایج این روش در جریان‌های غیرماندگار با شدت بالا، خطای زیادی به همراه دارد [۱۵]، زیرا نرخ انتقال رسوب تحت جریان غیرماندگار بیشتر از جریان ماندگار است و ذرات رسوب در جریان غیرماندگار آسان‌تر انتقال یافته و فاصله بیشتری طی می‌کنند [۱۶]. همچنین این امر اثبات شده است که نتایج مربوط به جریان ماندگار را نمی‌توان به طور کامل به جریان‌های غیرماندگار تعمیم داد [۱۷-۲۱].

در برخی دیگر از مطالعات انجام شده، هیدروگراف سیلاب به صورت مثلثی یا دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده و روابطی جهت برآورد حجم رسوب به دست آمده است [۱۱، ۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۳]. در حالی که هیدروگراف مثلثی و دوزنقه‌ای از لحاظ شیب شاخه صعودی و نزولی تفاوت زیادی با هیدروگراف واقعی دارد.

محققان دیگر، هیدروگراف‌هایی با شکل طبیعی را بر روی بسترهای مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۴-۲۸]. هامفریس^۱ و همکاران با بررسی حجم انتقال رسوب در شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف بیان کردند نرخ انتقال رسوب طی هیدروگراف رفتار هیستریزیس در جهت عقربه‌های ساعت دارد [۲۴]. نتایج پژوهش وانگ^۲ و همکاران نشان داد عمده تحرکات رسوبات درشت‌دانه در

³ - Li

⁴ - Hysteretic

¹ - Humphries

² - Wang

پارامتر شدت هیدروگراف، تغییرات نرخ انتقال بار بستر مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- آنالیز ابعادی و پارامترهای بی‌بعد

با ثابت فرض کردن شرایط هندسه کانال، خواص سیال و خواص رسوب در آزمایش‌ها، گروه‌های بدون بعد در زمینه انتقال بار بستر تحت جریان غیرماندگار عبارتند از:

$$W_k = \frac{U_b^{*2} Vol}{g H_b^3 B} \quad (1)$$

$$\Gamma_{HG} = \frac{H_p - H_b}{U_b^* \Delta t} \quad (2)$$

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

در روابط فوق، 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، Δt زمان پایه هیدروگراف، Vol حجم آب زیر منحنی هیدروگراف، g شتاب جاذبه زمین و B عرض کانال می‌باشد.

عامل بی‌بعد اول در رابطه (۱)، برای اولین بار توسط ین و لی^۷ با نام پارامتر کار کل جریان^۸ یا شدت جریان نام‌گذاری شده (W_k) و در مطالعات بعد از آن نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸، ۲۲، ۲۷ و ۴۵]. نکته مهم در رابطه با این پارامتر این است که قسمت جریان پایه در محاسبات حجم زیر منحنی هیدروگراف محاسبه نمی‌گردد.

عامل بی‌بعد دوم در رابطه (۲)، پارامتر غیرماندگاری^۹ هیدروگراف (Γ_{HG}) نامیده می‌شود که

صعودی هیدروگراف جریان در مقایسه با شاخه نزولی مشخص می‌شود که توسط محققان بسیاری گزارش شده است [۲، ۱۰، ۱۷، ۲۴، ۳۸ و ۳۹]. همچنین هیسترتیک در خلاف جهت عقربه‌های ساعت زمانی رخ می‌دهد که نرخ انتقال رسوب در شاخه صعودی در مقایسه با شاخه نزولی هیدروگراف کمتر باشد [۱۲، ۱۸ و ۲۲]. ساختار بستر و ترکیب رسوب بستر رودخانه نیز بر نوع هیسترتیز انتقال رسوب تأثیر می‌گذارد [۴۰-۴۲]. نحوه انتقال رسوب نیز (بار بستر یا بار معلق) بر نوع هیسترتیز حاصل اثرگذار است [۲۴]. طبق مطالعات وانگ^۵ و همکاران بر روی مصالح دانه‌بندی نشده، بخش درشت‌دانه مصالح تمایل به تحرک در شاخه صعودی هیدروگراف را داشته و نمودار هیسترتیز رسوب در جهت عقربه‌های ساعت تشکیل می‌گردد، اما رسوبات ریزدانه تمایل به حرکت در شاخه نزولی را داشته و نمودار هیسترتیز آن‌ها خلاف عقربه‌های ساعت می‌باشد [۴۳].

با جمع‌بندی مطالعات پیشین، عوامل تأثیرگذار بر هیسترتیز انتقال رسوب عبارتند از: (الف) ترکیب رسوب، (ب) تأمین رسوب از بالادست، (ج) ویژگی‌های هیدروگراف، (د) مورفولوژی بستر و (ه) نحوه انتقال رسوب (به‌عنوان مثال، بار بستر یا بار معلق) [۴۴].

در اکثر پژوهش‌های قبلی هیدروگراف‌های مثلثی و پله‌ای به‌منظور بررسی انتقال رسوبات در جریان غیرماندگار مورد استفاده قرار گرفته است که از نظر رفتاری تفاوت بسیار زیادی با هیدروگراف‌های واقعی دارند. مطالعات انجام شده در حالت هیدروگراف واقعی نیز تحت شرایط آزمایشگاهی خاص و با اندازه ذرات رسوب محدود صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، با طراحی یک بُرد واسط بین مبدل^۶ پمپ و رایانه، هیدروگراف سیلاب به‌صورت یک بار دینامیکی و با شیب واقعی بر روی بستر فرسایش‌پذیر ایجاد گردید و با متغیر قرار دادن

⁷- Yen and Lee

⁸- Total flow work

⁹- Unsteadiness parameter

⁵- Wang

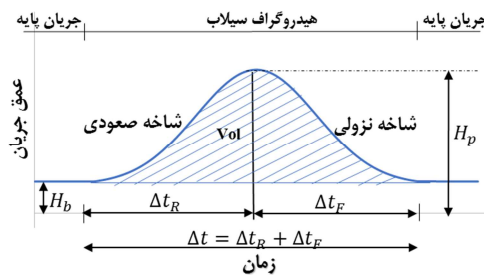
⁶- Inverter

ارتفاع ۰/۵ و عرض ۰/۳ متر می‌باشد. عکس کانال آزمایشگاهی و نقشه شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

شیب در تمامی آزمایش‌ها برابر با ۰/۰۰۳ بوده است. واسنجی شیب بستر کانال و هم‌چنین ریل‌هایی که حسگرهای عمق‌سنج بر روی آن قرار داشت با دقت انجام و خطاهای وارده به حداقل رسیده است. آب موردنیاز توسط پمپ‌ها از مخازن به درون کانال منتقل و در ابتدای کانال توسط مخزن آرامش و فیلترهای تعبیه شده از تلاطم آن کاسته شده است. دبی آب در حین انجام آزمایش توسط مبدل الکتریکی و هم‌چنین شیرهای موجود قابل تغییر بوده است. حداکثر دبی قابل‌دستیابی برابر با ۵۰ لیتر بر ثانیه بوده و با استفاده از روش اندازه‌گیری حجمی و سرریز مستطیلی تیز مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. برای برداشت عمق جریان حین آزمایشات از سه عدد عمق‌سنج دیجیتال استفاده گردید که توسط عمق‌سنج نقطه‌ای دستی کالیبره شده‌اند. هم‌چنین به جهت ایجاد هیدروگراف واقعی سیلاب، یک برد واسط بین کامپیوتر و پمپ طراحی شده که قابلیت اجرای یک هیدروگراف کامل سیلاب را با مشخصات متفاوت فراهم می‌کند. برد ساخته شده در هر ثانیه قابلیت ارسال ۵ داده را دارا بوده و توسط دبی‌سنج اولتراسونیک صحت‌سنجی گردیده است. مصالح مورد استفاده در فرآیند آزمایشات، رسوبات یکنواخت نوع D_{50} شرکت ماسه فیروزکوه با d_{50} برابر ۲/۶۹ میلی‌متر و ضریب یکنواختی C_u برابر ۱/۲۸ بوده است. دو نوع مصالح غیرقابل فرسایش A و B به‌منظور ایجاد محفظه رسوب و افزایش ارتفاع کف در ابتدا و انتهای کانال مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲-ب). این مصالح در ابتدا و انتهای کانال برای کاهش خطای تلاطم و توزیع یکنواخت جریان بر روی بستر فرسایش‌پذیر تعبیه گردیده است. منحنی دانه‌بندی مصالح در شکل ۳ ارائه شده است.

اولین بار توسط گراف و سوزکا^{۱۰} تعریف شده است [۴۶] و [۴۷].

پارامتر بی‌بعد سوم در رابطه (۳)، اولین بار توسط وانگ و همکاران به‌نام ضریب شکل هیدروگراف (۱۱) تعریف گردیده که مقدار چولگی هیدروگراف را نشان می‌دهد [۲۵]. برخی از پارامترهای مهم هیدروگراف در شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱- تعریف ویژگی‌های هیدروگراف سیل

یکی دیگر از پارامترهای بی‌بعد که در مبحث انتقال رسوبات بستر مطرح می‌باشد، بار بستر نهایی نرمال‌سازی شده^{۱۱} یا پارامتر نهایی رسوب^{۱۲} (W_t^*) است [۲۲]:

$$W_t^* = \frac{W_t}{\rho_s b d_{50}^2} \quad (۴)$$

که در آن، b عرض تله رسوب و W_t بار بستر کل انتقال یافته^{۱۳} برحسب کیلوگرم می‌باشد. روابط (۱) تا (۴)، پارامترهای بی‌بعد تأثیرگذار در موضوع انتقال رسوب در شرایط جریان غیرماندگار می‌باشند که در پژوهش حاضر تأثیر پارامتر بی‌بعد کل جریان یا شدت جریان هیدروگراف (W_k) بر حجم انتقال رسوبات بستر، مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است.

۲-۲- شرایط آزمایشگاهی

کانال موجود در آزمایشگاه هیدرولیک پیشرفته دانشگاه ارومیه برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. ابعاد مفید کانال به طول ۱۵ متر با جداره‌های شیشه‌ای به

¹⁰ - Graf and Suszka

¹¹ - Normalized total bedload yield

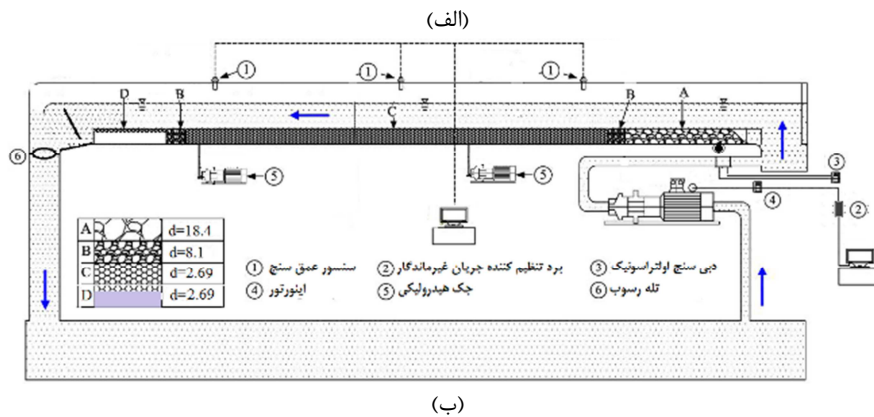
¹² - Sediment yield parameter

¹³ - Total bedload mass transport

۳-۲- برنامه آزمایش‌ها

۲- ب). ابتدا یک لایه ۱۰ سانتیمتری از رسوبات فیروزکوه به صورت یکنواخت داخل محفظه رسوب پر شده است. سپس با استفاده از صفحه ریلی تعبیه شده بر روی کانال، لایه رسوبی، کاملاً تسطیح گردیده است.

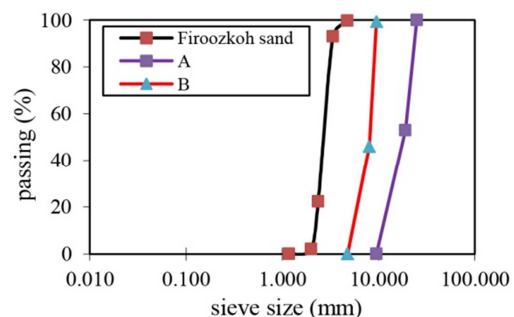
به منظور ایجاد محفظه رسوب، کف کانال در طول ۴ متر از بالادست و ۲ متر از پایین دست به اندازه ۱۰ سانتیمتر با استفاده از مصالح A و B پر شده است (شکل



شکل ۲- کانال آزمایشگاهی، (الف) تصویر کانال آزمایشگاهی و (ب) شکل شماتیک کانال آزمایشگاهی

است. پس از اشباع کامل رسوبات، دبی به مقدار دبی پایه افزایش یافته و هم‌زمان درجه 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 هیچ‌گونه فرسایش اتفاق نیفتد. با به کارگیری روابط شیلدز و فرض مقدار دبی پایه ۱۵ لیتر بر ثانیه، مقدار رینولدز برشی (Re_b^*) ۱۱۰/۵۸ بوده و عدد شیلدز به دست آمده $(\tau_b^* = 0.4)$ نزدیک به عدد شیلدز بحرانی $(\tau_{b,cr}^* = 0.46)$ می‌باشد. بنابراین در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه هیچ‌گونه فرسایش اتفاق نمی‌افتد و مصالح نزدیک به آستانه حرکت قرار دارند. پس از ایجاد جریان پایه، هیدروگراف مورد بررسی از طریق برد تعبیه شده بین مبدل و کامپیوتر بر روی پمپ اعمال شده است. برداشت

ضخامت لایه رسوب به گونه‌ای انتخاب شده است که در کل زمان هیدروگراف، بیشینه عمق فرسایش کمتر از ضخامت رسوبات (۱۰ سانتیمتر) باشد.



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در این تحقیق

۴-۲- طرح ریزی آزمایش‌ها

به منظور اشباع مصالح، درجه پایین دست کانال بالا آورده شده و جریان با دبی ۳ لیتر بر ثانیه ایجاد شده

مثال آزمایش WA1-2 تکرار دوم آزمایش WA1-1 (است). در مجموع ۲۰ آزمایش با هیدروگراف‌های مختلف بررسی شده است. زمان آزمایش‌ها، دبی اوج و شرح جزئیات کامل آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. هیدروگراف‌های سیلاب بررسی شده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است.

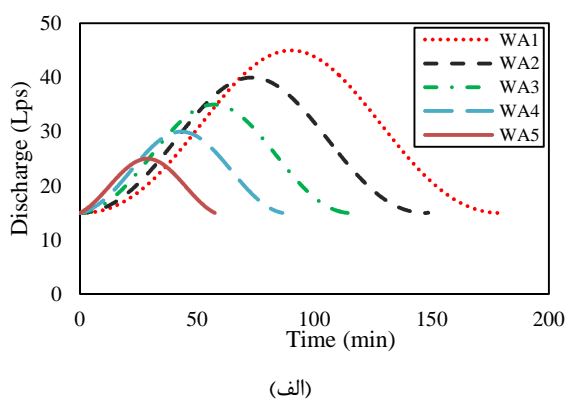
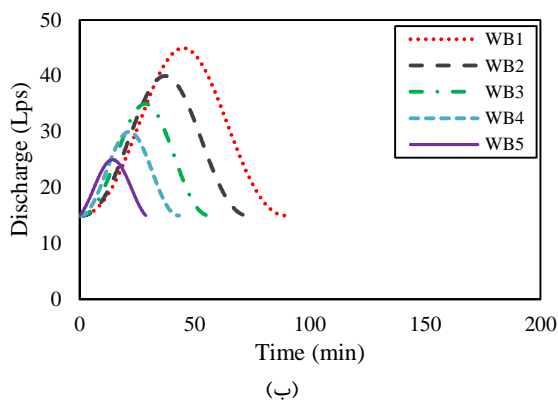
رسوبات انتقال یافته از طریق تله قرار داده شده در انتهای کانال صورت گرفته است. رسوبات در فواصل زمانی ۵ و ۱۰ دقیقه به صورت جداگانه برداشت، خشک و وزن شده است.

۲-۵- هیدروگراف‌های مورد بررسی

به علت عدم قطعیت رفتار رسوب در جریان غیرماندگار، هر آزمایش دو بار انجام شده است (به‌طور

جدول ۱- ویژگی هیدروگراف‌های مورد آزمایش

سری	شماره آزمایش	دبی پایه (Q _b) (m ³ /s)	دبی اوج (Q _p) (m ³ /s)	زمان (ΔT) (s)	پارامتر غیرماندگاری (Γ _{HG}) (× 10 ^{-۴})	پارامتر شدت هیدروگراف (W _k)	ضریب شکل (η)
سری اول	WA1-1	۰/۰۱۵	۰/۰۴۵	۱۰۸۰۰	۲/۰۷	۱۴۴/۸۳	۱
	WA1-2	۰/۰۱۵	۰/۰۴۵	۱۰۸۰۰	۲/۱۱	۱۴۸/۰۵	۱
	WA2-1	۰/۰۱۵	۰/۰۴	۸۹۱۰	۱/۹۴	۱۰۱/۰۱	۱
	WA2-2	۰/۰۱۵	۰/۰۴	۸۹۱۰	۱/۸۸	۹۸/۶۶	۱
	WA3-1	۰/۰۱۵	۰/۰۳۵	۶۸۵۰	۲/۳۴	۶۵/۱۸	۱
	WA3-2	۰/۰۱۵	۰/۰۳۵	۶۸۵۰	۱/۹۹	۶۶/۳۸	۱
	WA4-1	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۵۱۸۰	۱/۹۲	۳۸/۵۶	۱
	WA4-2	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۵۱۸۰	۲/۰۳	۴۰/۱۹	۱
	WA5-1	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵	۳۴۵۰	۱/۹۱	۱۸/۵۳	۱
	WA5-2	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵	۳۴۵۰	۱/۹۹	۱۸/۹	۱
سری دوم	WB1-1	۰/۰۱۵	۰/۰۴۵	۵۴۰۰	۴/۰۶	۷۲/۴۱	۱
	WB1-2	۰/۰۱۵	۰/۰۴۵	۵۴۰۰	۴/۲۸	۷۳/۶۲	۱
	WB2-1	۰/۰۱۵	۰/۰۴	۴۵۰۰	۳/۹۹	۴۹/۲	۱
	WB2-2	۰/۰۱۵	۰/۰۴	۴۵۰۰	۴/۰۲	۴۷/۰۸	۱
	WB3-1	۰/۰۱۵	۰/۰۳۵	۳۴۲۵	۴/۱۹	۳۰/۸۵	۱
	WB3-2	۰/۰۱۵	۰/۰۳۵	۳۴۲۵	۳/۸۹	۳۲/۱۴	۱
	WB4-1	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۲۵۹۰	۳/۸۴	۱۸/۰۸	۱
	WB4-2	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۲۵۹۰	۳/۹	۱۸/۶۹	۱
	WB5-1	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵	۱۷۲۵	۴	۹/۱۹	۱
	WB5-2	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵	۱۷۲۵	۴/۱۲	۱۰/۳۷	۱



شکل ۴- هیدروگراف‌های سیلاب‌های آزمایش‌ها، (الف) سری اول (WA) و (ب) سری دوم (WB)

زمان پیک هیدروگراف سیلاب رخ دهد (تأخیر زمانی مثبت). برای حالت استثنای WA5 نیز می‌توان علت را در عدم قطعیت رفتار رسوبات دانست که وقتی با زمان نمونه‌برداری بار بستر ترکیب می‌شود، مشمول برخی عدم قطعیت‌های تجربی می‌گردد. سرعت و اندازه برجستگی‌های شن و رسوبات در حال حرکت در طول شاخه صعودی هیدروگراف همواره رو به افزایش می‌باشد.

مقدار بیشینه نرخ فرسایش بار بستر (q_{b-peak}) برای حالت WA1 تا WA5 به ترتیب برابر است با ۱۰۶/۵، ۸۹/۸۱، ۸۰/۶۶، ۴۱/۵۴ و ۳۰/۶۳ ($g/s.m$) که ملاحظه می‌گردد، با کاهش پارامتر شدت هیدروگراف W_k (یعنی با کاهش جریان پیک و مدت‌زمان هیدروگراف)، q_{b-peak} کاهش یافته است. با مقایسه حجم کل رسوبات انتقال یافته در هر هیدروگراف مشاهده گردید به ترتیب با کاهش ۳۰، ۵۵، ۷۳ و ۸۷ درصدی پارامتر شدت هیدروگراف، حجم کل رسوبات انتقال یافته به ترتیب ۳۳، ۵۷، ۷۸ و ۸۹ درصد کاهش یافته است.

در شاخه صعودی هیدروگراف، موج مثبت باعث افزایش سرعت جریان و به تبع آن تنش برشی بستر می‌شود. به همین دلیل نمودارهای هیستریزس رسوب در جهت عقربه‌های ساعت بوده و فرسایش برای دبی معین در شاخه صعودی هیدروگراف بیشتر از شاخه نزولی است. نتیجه مذکور همسو با یافته‌های محققان پیشین می‌باشد [۱۰، ۱۴ و ۲۷]. فاصله شاخه صعودی و نزولی در نمودارهای هیستریزس رسوب به ترتیب از حالت WA1 تا WA5 کمتر شده و در نتیجه با کاهش پارامتر شدت هیدروگراف، میزان اختلاف فرسایش بستر (q_b) در دو شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف کمتر شده است.

در هیدروگراف‌های با شدت کمتر (دبی اوج کمتر)، طول موج ایجادشده کوتاه‌تر و ارتفاع برجستگی رسوبات انتقالی کوچک‌تر مشاهده شده است. برعکس، با شدیدتر شدن هیدروگراف، طول موج طولانی‌تر و یک برجستگی شنی با اندازه بزرگ‌تر مشاهده شده است.

در هیدروگراف‌های سری الف، مقدار پارامتر غیرماندگاری هیدروگراف ثابت و برابر $\Gamma_{HG} \approx 2$ است و مقدار پارامتر شدت هیدروگراف (W_k) طبق جدول ۱ متغیر قرار داده شده است. در هیدروگراف‌های سری ب، زمان پایه هیدروگراف‌ها نصف شده، پارامتر غیرماندگاری هیدروگراف ثابت و برابر $\Gamma_{HG} \approx 4$ است و شدت هیدروگراف طبق جدول ۱ متغیر در نظر گرفته شده است.

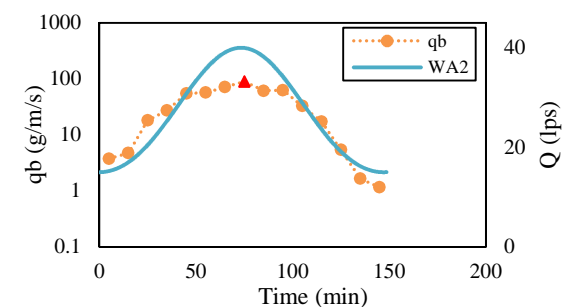
۳- تحلیل نتایج

همان‌طور که اشاره شد، ۱۰ حالت آزمایش‌های سری WA و ۱۰ حالت سری WB در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. جهت برآورد نرخ فرسایش، میانگین دو آزمایش در نظر گرفته شده است. برای حذف نیروی پسار^{۱۴} از اصلاح جداره ونونی برای محاسبه سرعت برشی بستر استفاده شده است [۴۸].

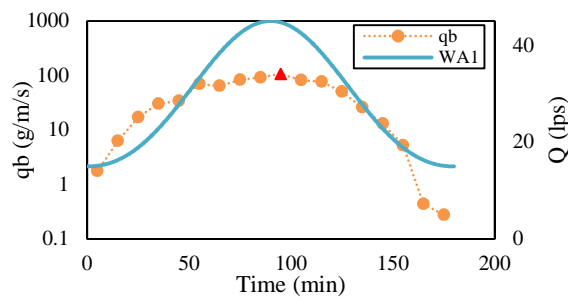
تغییرات دبی و نرخ فرسایش بستر (q_b) برحسب زمان و نمودار هیستریزس بار بستر برای آزمایش‌های WA در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، نرخ فرسایش بستر (q_b) در شاخه صعودی هیدروگراف افزایش و در شاخه نزولی کاهش یافته است. نرخ انتقال بار بستر با پارامتر شدت هیدروگراف رابطه مستقیم دارد. علت نوسان نرخ فرسایش بستر، دو عامل نرمال‌سازی رسوبات جمع‌آوری شده در ۱۰ دقیقه به ۱ ثانیه و حرکت تصادفی موجی شکل ماسه‌های رونده است.

نقاط اوج هیدروگراف رسوب (q_{b-peak}) نزدیک دبی اوج (Q_p) با تأخیر زمانی جزئی رخ داده است. تأخیر زمانی در ۴ حالت WA1، WA2، WA3 و WA4 مثبت و در حالت WA5 منفی می‌باشد. دوام جزئی حرکت برجستگی‌های شنی و رسوبات بلند شده از کف (بلافاصله بعد از اتمام شاخه صعودی) باعث می‌شود که زمان پیک هیدروگراف رسوب اندازه‌گیری شده، مقداری دیرتر از

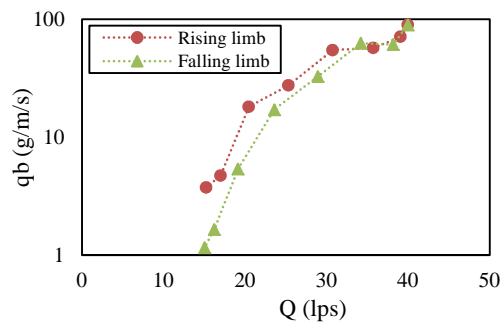
¹⁴- Drag



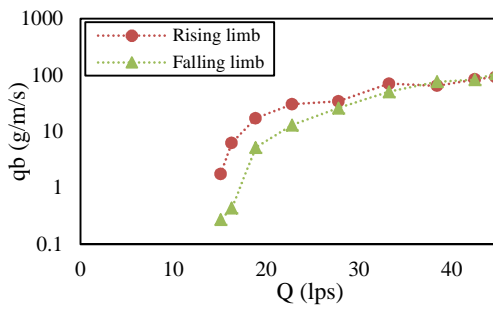
ب) نرخ فرسایش بستر WA2



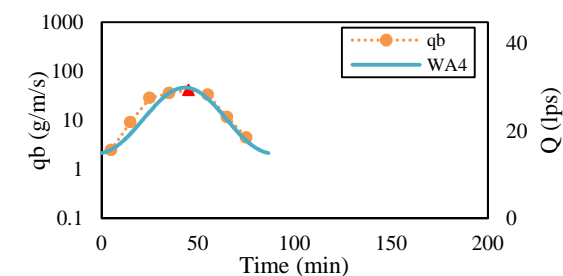
الف) نرخ فرسایش بستر WA1



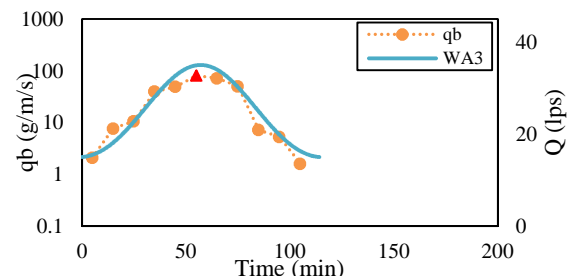
ت) هیستریزیس WA2



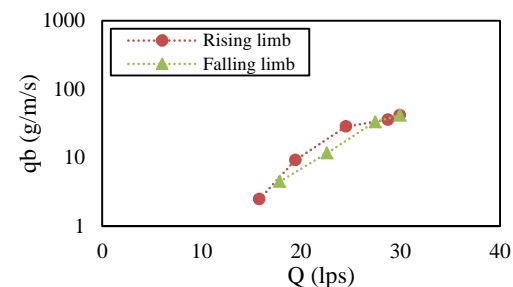
پ) هیستریزیس WA1



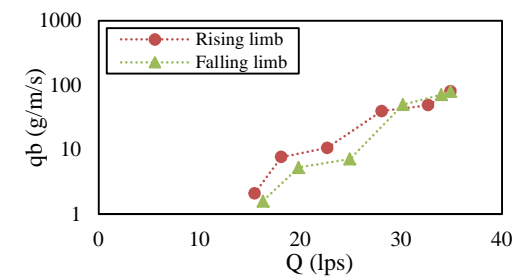
ج) نرخ فرسایش بستر WA4



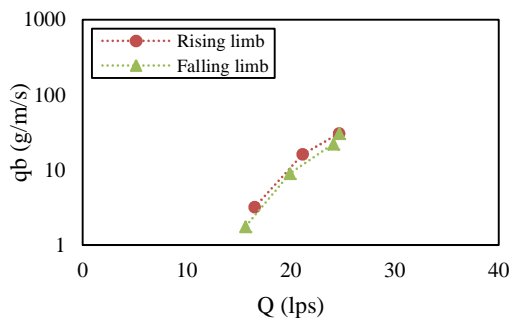
ث) نرخ فرسایش بستر WA3



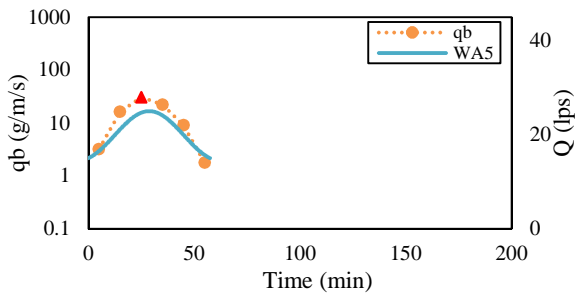
خ) هیستریزیس WA4



ح) هیستریزیس WA3



د) هیستریزیس WA5



د) نرخ فرسایش بستر WA5

شکل ۵- تغییرات زمانی دبی (Q)، نرخ فرسایش بستر (qb) و هیستریزیس رسوب

با مقایسه ابعاد برجستگی‌های رسوبی ایجادشده در حین آزمایش مشاهده گردید با شروع شاخه صعودی هیدروگراف، ابعاد برجستگی رسوبی رفته‌رفته بزرگ‌تر شده و در طول شاخه نزولی هیدروگراف، با گذر زمان ابعاد برجستگی کوچک‌تر شده است.

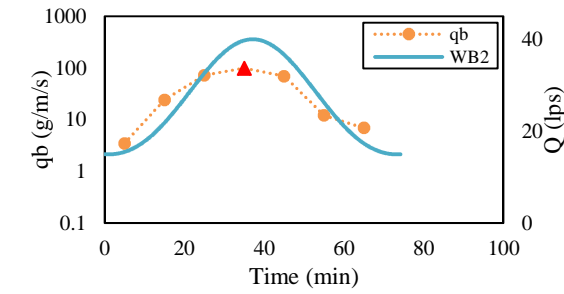
تغییرات دبی و نرخ فرسایش بستر (q_b) برحسب زمان و نمودار هیستریزس بار بستر برای آزمایش‌های WB در شکل ۶ نشان داده شده است. در نمودارهای سری WB نیز مشاهده می‌گردد با کاهش پارامتر شدت هیدروگراف، نرخ انتقال بار بستر کاهش یافته و اوج هیدروگراف رسوب مقداری با تأخیر زمانی نسبت به هیدروگراف سیلاب اتفاق افتاده است. با مقایسه دقیق مقادیر در این حالت می‌توان گفت این تأخیر زمانی در چهار حالت WB1، WB2، WB4 و WB5 مثبت (q_{bpeak} بعد از Q_p) و در حالت WB3 تأخیر منفی می‌باشد. علت حالت استثنا نیز همانند حالت قبل وجود عدم قطعیت در رفتار رسوب و همچنین تعداد بازه زمانی کم نمودار نرخ انتقال رسوب می‌باشد. مشاهدات عینی در این سری از آزمایش‌ها نیز گواه بر این امر بوده است که حرکت یک تپه شنی با اندازه بزرگ می‌تواند برای مدت کوتاهی (حتی زمانی که هیدروگراف جریان شروع به سقوط می‌کند) دوام بیاورد.

مقدار بیشینه نرخ فرسایش بار بستر (q_{b-peak}) برای حالت WB1 تا WB5 به ترتیب برابر است با ۱۲۳/۲، ۹۸/۶۸، ۸۴/۶۳، ۴۳/۹۷ و ۳۱/۹۶ (g/s.m) که ملاحظه می‌گردد، نسبت به سری WA به ترتیب ۱۶، ۱۰، ۵، ۶ و ۴ درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت برای هیدروگراف‌های با دبی اوج یکسان و زمان پایه متفاوت، بیشینه نرخ آبستگي بار بستر (q_{bpeak}) در هیدروگراف با زمان پایه کمتر اتفاق افتاده است. علت این امر نیز کوتاه بودن زمان پایه هیدروگراف و شدیدتر بودن شیب شاخه صعودی و به تبع آن شدت بالاتر موج ایجادشده در شاخه

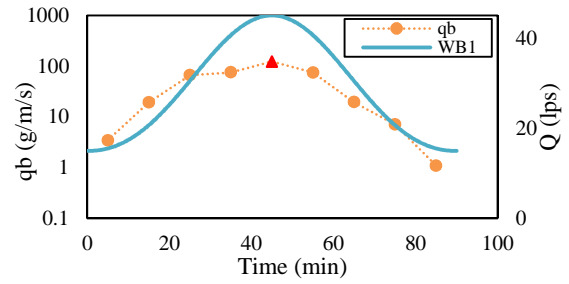
$$W_t^* = 110.79 W_k^{1.0884} \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.978)$$

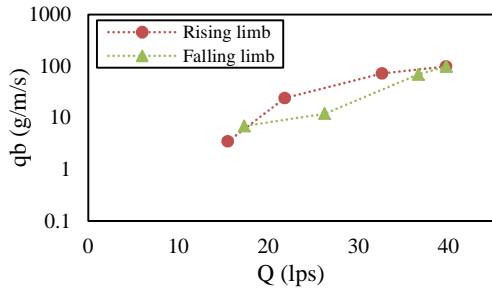
طبق رابطه (۸)، نرخ فرسایش با پارامتر شدت هیدروگراف رابطه مستقیم دارد.



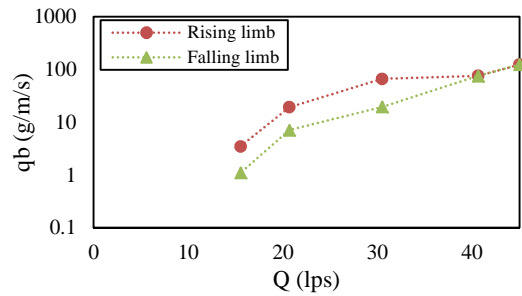
WB2 نرخ فرسایش بستر (ب)



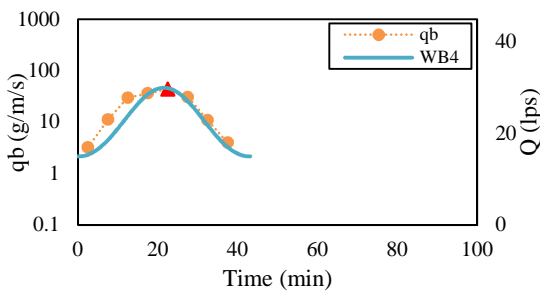
WB1 نرخ فرسایش بستر (الف)



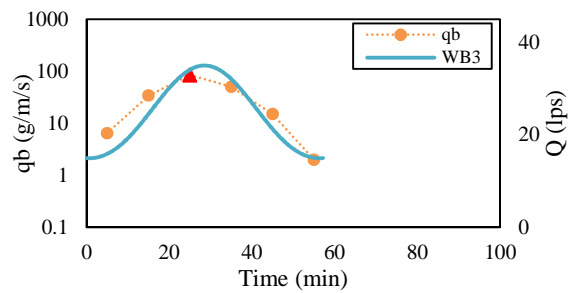
WB2 هیستریزیس (ت)



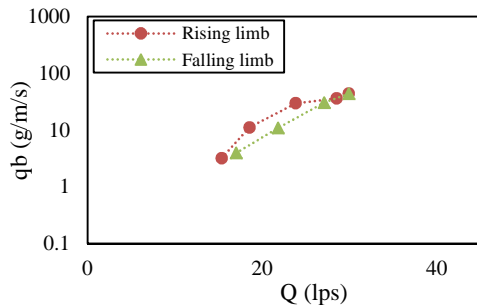
WB1 هیستریزیس (پ)



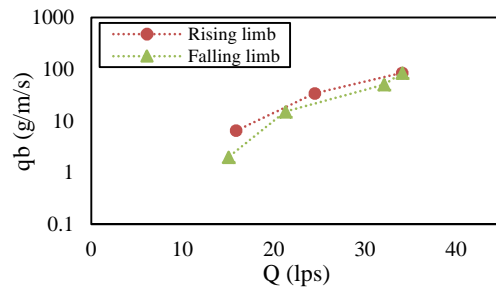
WB4 نرخ فرسایش بستر (ج)



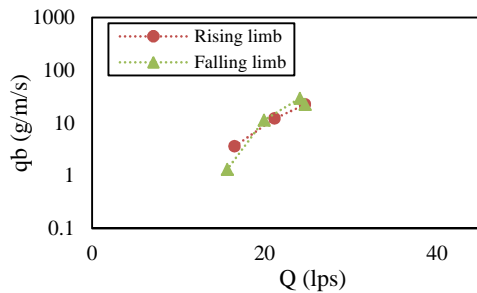
WB3 نرخ فرسایش بستر (ث)



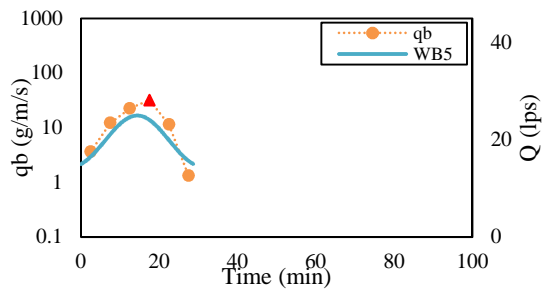
WB4 هیستریزیس (خ)



WB3 هیستریزیس (ح)

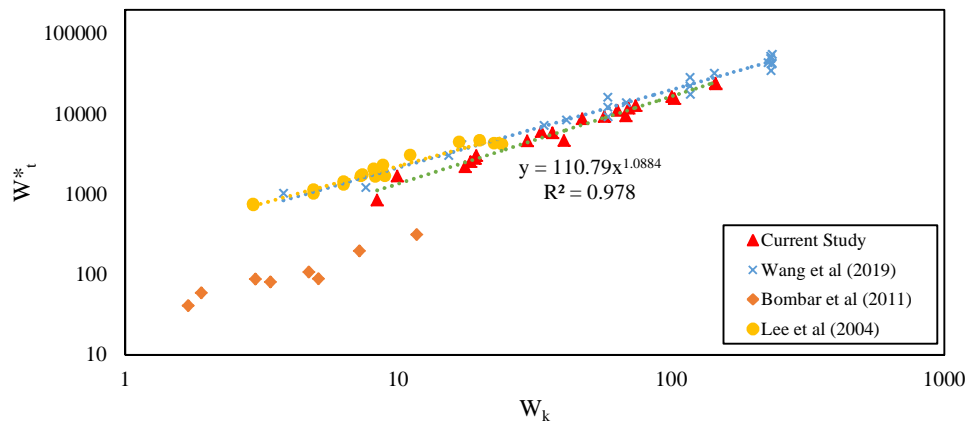


WB5 هیستریزیس (ذ)



WB5 نرخ فرسایش بستر (د)

شکل ۶- تغییرات زمانی دبی (Q)، نرخ فرسایش بستر (qb) و هیستریزیس رسوب



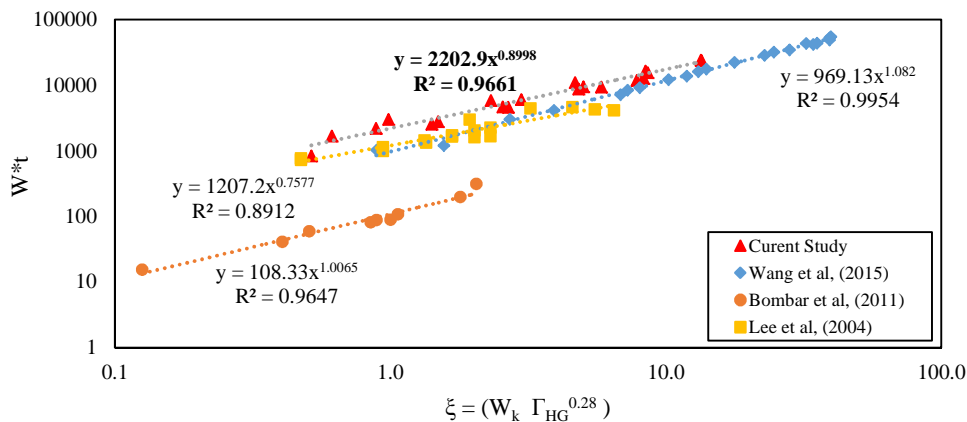
شکل ۷- تأثیر پارامتر شدت هیدروگراف بر تغییرات بار بستر نهایی نرمال‌سازی شده (آزمایش‌های WA و WB)

شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸، رابطه توانی (۹) بین ξ و W_t^* ارائه شده است.

$$W_t^* = 2202.9 \xi^{0.8998} \quad (9) \\ (R^2 = 0.9661)$$

پارامتر ξ و W_t^* رابطه مستقیم دارند که در پژوهش‌های محققان نیز به این موضوع اشاره شده است [۲۲ و ۲۷].

به منظور بررسی همزمان پارامترهای (Γ_{HG}) و (W_k) ، پارامتر ترکیبی $\xi = W_k \Gamma_{HG}^x$ تعریف شده است. با استفاده از برازش غیرخطی، مقدار x برابر با 0.28 به دست آمده است. تغییرات بار بستر نهایی نرمال‌سازی شده (W_t^*) برحسب پارامتر ترکیبی هیدروگراف (ξ) در



شکل ۸- تأثیر پارامتر ترکیبی هیدروگراف (ξ) بر تغییرات بار بستر نهایی نرمال‌سازی شده (W_t^*)

۱- مقدار بیشینه نرخ فرسایش بار بستر (q_{b-peak}) در سری آزمایشات WB نسبت به سری WA به ترتیب ۱۶، ۱۰، ۵، ۶ و ۴ درصد افزایش یافته است. بنابراین بیشینه نرخ فرسایش بار بستر با پارامتر شدت هیدروگراف رابطه عکس دارد.

۲- بیشینه نرخ فرسایش همواره نزدیک به اوج هیدروگراف سیلاب رخ داده و یک تأخیر زمانی مثبت بین آن‌ها وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر پارامتر کل جریان^{۱۵} یا شدت هیدروگراف (W_k) بر نرخ انتقال رسوبات بستر مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل به شرح زیر ارائه می‌شوند:

¹⁵- Total flow work

۶- پارامتر ترکیبی هیدروگراف سیل و بار بستر نهایی رسوب نرمال‌سازی شده با یکدیگر رابطه مستقیم دارند.

۳- با کاهش ۳۲، ۵۷، ۷۵ و ۸۷ درصدی پارامتر شدت هیدروگراف، حجم کل رسوبات انتقال یافته به ترتیب ۲۷، ۵۱، ۷۸ و ۹۰ درصد کاهش می‌یابد.

۵- پیشنهاد برای تحقیقات آتی

- ۱- بررسی تأثیر شدت هیدروگراف سیلاب بر انتقال رسوبات معلق
- ۲- بررسی فرسایش بستر غیریکنواخت تحت هیدروگراف واقعی سیلاب
- ۳- استفاده از اطلاعات موجود در مقاله و نتایج آزمایشگاهی سایر محققان موجود و ارائه مدل عددی دقیق

- ۴- نرخ فرسایش در شاخه صعودی هیدروگراف بیشتر از شاخه نزولی بوده که با کاهش پارامتر شدت جریان، فاصله بین آن‌ها در نمودار هیستریزس رسوب کاهش می‌یابد. تغییرات نرخ انتقال بار بستر (q_b) برحسب دبی جریان (Q) به صورت هیستریزس ساعت‌گرد می‌باشد.
- ۵- با کاهش ۵۰ درصدی زمان پایه هیدروگراف در شرایط یکسان، حجم کل رسوبات انتقال یافته به طور میانگین ۴۶ درصد کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Fielding, C. R., Alexander, J., & Allen, J. P. (2018). The role of discharge variability in the formation and preservation of alluvial sediment bodies, *Sedimentary Geology*, 365, 1-20. doi: 10.1016/j.sedgeo.2017.12.022
- [2] Hassan, M. A., Egozi, R., & Parker, G. (2006). Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel bed rivers, *Water Resour. Res.*, 42, W09408. doi: 10.1029/2005WR004707
- [3] Billi, P. (2011). Flash flood sediment transport in a steep sand-bed ephemeral stream, *International Journal of Sediment Research*, 26(2), 193-209. doi: 10.1016/S1001-6279(11)60086-3
- [4] Reid, I., Laronne, J. B., & Powell, D. M. (1998). Flash-flood and bedload dynamics of desert gravel-bed streams, *Hydrological Processes*, 12(4), 543-557. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980330)12:4<543::AID-HYP593>3.0.CO;2-C
- [5] Sui, J., Koehler, G., & Krol, F. (2010). Characteristics of rainfall, snowmelt and runoff in the headwater region of the main river watershed in Germany", *Water resources management*, 24, 2167-2186. doi: 10.1007/s11269-009-9545-8
- [6] Kampf, S.K., & Lefsky, M.A. (2016). Transition of dominant peak flow source from snowmelt to rainfall along the Colorado Front Range: Historical patterns, trends, and lessons from the 2013 Colorado Front Range floods, *Water Resources Research*, 52(1), 407-422. doi: 10.1002/2015WR017784
- [7] Sobhkhiz, R., & Mardookhpour, A. (2019). Numerical Simulation of the Effect of Pile Geometry and Foundation on Local Scour in Inclined Bridge Group Pier, *Civil Infrastructure Researches*, 5(1), 147-164. doi: 10.22091/cer.2019.4278.1149 [In Persian]
- [8] Chang, W. Y., Lai, J. S., & Yen, C. L. (2004). Evaluation of scour depth at circular bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 905-913. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(905)
- [9] Oliveto, G., & Hager, W. H. (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 97-105. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(97)
- [10] Mao, L. (2012). The effect of hydrographs on bed load transport and bed sediment spatial arrangement, *Journal of Geophysical Research*, 117, F03024. doi: 10.1029/2012JF002428
- [11] Karimiaei Tabarestani, M., & Zarati, A. (2014). Effect of flood hydrograph peak time on local scour around the bridge pier, *Journal of Hydraulics*, 9(3), 15-32. doi: 10.30482/jhyd.2014.10173 [In Persian]
- [12] Martin, R. L., & Jerolmack, D. J. (2013). Origin of hysteresis in bed form response to unsteady flows, *Water Resources Research*, 49(3):1314-1333. doi: 10.1002/wrcr.20093
- [13] Waters, K. A., & Curran, J. C. (2015). Linking bed morphology changes of two sediment mixtures to sediment transport predictions in unsteady flows, *Water Resources Research*, 51(4), 2742-2741. doi: 10.1002/2014WR016083
- [14] Plumb, B. D., JWez, 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 Surface Processes and Landforms*, 45(4), 816-830. doi: 10.1002/esp.4770

- [15] Tabarestani, M. K., Zarrati, A. R. (2015). Sediment transport during flood event: A review, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 775-788. doi: **10.1007/s13762-014-0689-6**
- [16] Duan, Z., Chen, J., Jiang, C., Liu, X., & Zhao, B. (2020). Experimental Study on Uniform and Mixed Bed-Load Sediment Transport under Unsteady Flow, *Applied Sciences*, 10(6), 2002. doi: **10.3390/app10062002**
- [17] De Sutter, R., Verhoeven, R., & Krein, A. (2001). Simulation of sediment transport during flood events: Laboratory work and field experiments, *Hydrological Sciences Journal*, 46(4), 599-610. doi: **10.1080/02626660109492853**
- [18] Lee, K. T., Liu, Y. L., and Cheng, K. H. (2004). Experimental investigation of bedload transport processes under unsteady flow conditions, *Hydrological Processes*, 18(13), 2439-2454. doi: **10.1002/hyp.1473**
- [19] Warmink, J. J., Schielen, R. M. J., & Dohmen-Janssen, C. M. (2012). *Bed form evolution under varying discharges*, flume versus fields, In Proceedings River Flow 2012, Costa Rica.
- [20] Guney, M. S., Bombar, G., & Aksoy, A. O. (2013). Experimental study of the coarse surface development effect on the bimodal bed-load transport under unsteady flow conditions, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 12-21. doi: **10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000640**
- [21] Phillips, C. B., Hill, K. M., Paola, C., Singer, M. B., & Jerolmack, D. J. (2018). Effect of flood hydrograph duration, magnitude, and shape on bed load transport dynamics, *Geophysical Research Letters*, 45(16), 8264-8271. doi: **10.1029/2018GL078976**
- [22] Bombar, G., Elçi, Ş., Tayfur, G., Güney, M. Ş., & Bor, A. (2011). Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(10), 1276-1282. doi: **10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000412**
- [23] Mrokowska, M. M., Rowinski, P. M., Ksiazek, L., Struzynski, A., Wyrebek, M., & Radecki-Pawlik, A. (2018). Laboratory studies on bedload transport under unsteady flow conditions, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(1), 23-31. doi: **10.1515/johh-2017-0032**
- [24] Humphries, R., Venditti, J. G., Sklar, L. S., & Wooster, J. K. (2012). Experimental evidence for the effect of hydrographs on sediment pulse dynamics in gravel-bedded rivers, *Water Resources Research*, 48, W01533. doi: **10.1029/2011WR010419**
- [25] Wang, L., Cuthbertson, A. J. S., Pender, G., & Cao, Z. (2015). Experimental investigations of graded sediment transport under unsteady flow hydrographs, *International Journal of Sediment Research*, 30(4), 306-320. doi: **10.1016/j.ijsrc.2015.03.010**
- [26] Li, Z., Qian, H., Cao, Z., Liu, H., Pender, G., & Hu, P. (2018). Enhanced bed load sediment transport by unsteady flows in a degrading channel, *International Journal of Sediment Research*, 33(3), 327-339. doi: **10.1016/j.ijsrc.2018.03.002**
- [27] Wang, L., Cuthbertson, A., Pender, G., & Zhong, D. (2019). Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs, *Water Resources Research*, 55(7), 5431-5452. doi: 10.1029/2018WR024413.
- [28] Khajavi, M., Kashefipour, S. M., & Bejestan, M. S. (2022). Bridge Abutment Protection against Scouring for Unsteady Flow Conditions, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(1), 310-322. doi: **10.3311/PPci.18892**
- [29] Fang, H. W., Chen, M. H., & Chen, Q. H. (2008). One-dimensional numerical simulation of non-uniform sediment transport under unsteady flows, *International Journal of Sediment Research*, 23(4), 316-328. doi: **10.1016/S1001-6279(09)60003-2**
- [30] Bai, Y., & Duan, J. G. (2014). Simulating unsteady flow and sediment transport in vegetated channel network, *Journal of hydrology*, 515, 90-102. doi: **10.1016/j.jhydrol.2014.04.030**
- [31] Ghosh, A., Roy, M. B., Roy, P. K., & Mukherjee, S. (2021). Assessing the nature of sediment transport with bridge scour by 1D sediment transport model in the sub-catchment basin of Bhagirathi-Hooghly river, *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2823-2845. doi: **10.1007/s40808-020-01058-4**
- [32] Cavedes-Voullieme, D., Morales-Hernandez, M., Juez, C., Lacasta, A., & Garcia-Navarro, P. (2017). Two-Dimensional Numerical Simulation of Bed-Load Transport of a Finite-Depth Sediment Layer: Applications to Channel Flushing, *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 04017034. doi: **10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001337**
- [33] Soares-Fraza, S., & Zech, Y. (2011). HLLC scheme with novel wave-speed estimators appropriate for two-dimensional shallow-water flow on erodible bed, *International journal for numerical methods in fluids*, 66(8), 1019-1036. doi: **10.1002/flid.2300**
- [34] Lai, Y. G., Liu, X., Bombardelli, F. A., & Song, Y. (2022). Three-Dimensional Numerical Modeling of Local Scour: A State-of-the-Art Review and Perspective, *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(11), 03122002. doi: **10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002019**
- [35] Sisingsih, D., Wahyuni, S., & Rasyid, A. (2021). Flow and sediment transport in a sharp river bend using a 3D-RANS model, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 930(1), 012033. doi: **10.1088/1755-1315/930/1/012033**

- [36] ASCE. (2008). *Sedimentation engineering manuals and reports on engineering practice 110*, American Society of Civil Engineers.
- [37] Brownlie, W. R. (1981). *Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels*, Keck Laboratory of Hydraulics & Water Resources, Caltech. doi: **10.7907/Z9KP803R**
- [38] Ahanger, M. A., Asawa, G. L., & Lone, M. A. (2008). Experimental study of sediment transport hysteresis, *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 628-635. doi: **10.3826/jhr.2008.3185**
- [39] Williams, G. P. (1989). Sediment concentrations versus water discharge during single hydrologic events in rivers, *Journal of Hydrology*, 111(1), 89-106. doi: **10.1016/0022-1694(89)90254-0**
- [40] Reesink, A. J. H., & Bridge, J. S. (2007). Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars, *Sedimentary Geology*, 202(1), 281-296. doi: **10.1016/j.sedgeo.2007.02.005**
- [41] Reesink, A. J. H., & Bridge, J. S. (2009). Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars- part 2, further experiments, *Sedimentary Geology*, 222(3), 274-300. doi: **10.1016/j.sedgeo.2009.09.014**
- [42] Reesink, A. J. H., Parsons, D., Ashworth, P., Hardy, R., Best, J., Unsworth, C., McLelland, S., & Murphy, B. (2013). The response and hysteresis of alluvial dunes under transient flow conditions, In *Mar. River Dunes 2013, Conf. Proc.*, 220, 215.
- [43] Wang, L., Cuthbertson, A. J., Zhang, S. H., Pender, G., Shu, A. P., & Wang, Y. Q. (2021). Graded bed load transport in sediment supply limited channels under unsteady flow hydrographs. *Journal of Hydrology*, 595, 126015. doi: **10.1016/j.jhydrol.2021.126015**
- [44] Gunsolus, E. H., & Binns, A. D. (2018). Effect of morphologic and hydraulic factors on hysteresis of sediment transport rates in alluvial streams, *River Research and Applications*, 34(2), 183-192. doi: **10.1002/rra.3184**
- [45] Yen, C. L. & Lee, K. T. (1995). Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(8), 591-599. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:8(591)**
- [46] Graf, W. H., & Suszka, L. (1985). Unsteady flow and its effect on sediment transport, In *21st IAHR congress*, 539-544.
- [47] Suszka, L. (1988). *Sediment transport at steady and unsteady flow: a laboratory study*, EPFL, 704. doi: **10.5075/epfl-thesis-704**
- [48] Vanoni, V. A., & Brooks, N. H. (1957). *Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, 11*, US Army Engineer Division, Missouri River.