



دانشگاه فردوسی مشهد

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و ششم، شماره سوم، ۱۳۹۸  
۹۱-۱۰۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>  
DOI: 10.22069/jwsc.2019.14891.2996

## بررسی تأثیر موج ناکهانی سیلاب بر انتقال بار بستر در مجاری خشک و تأثیر صفحات مستغرق در کاهش بار بستر

حامد شهسواری<sup>۱</sup>، قاسم پناهی<sup>۱</sup> و \*سعیدرضا خداشناس<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد،

<sup>۲</sup> استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۸

### چکیده

**سابقه و هدف:** غالب بارش‌ها در مناطق گرم و خشک رگباری بوده و سیلاب‌های بزرگی را به وجود می‌آورد. تخریب و رسوب‌گذاری سیلاب‌ها خسارات زیادی را در پی دارد. در پژوهش حاضر اثر موج سیلاب‌ها بر انتقال بار بستر در یک کانال آزمایشگاهی با قابلیت شیب‌پذیری و تحت شرایط جریان غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفته است.

**مواد و روش‌ها:** عرض، ارتفاع و طول کانال مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب عبارت بودند از: ۰/۳۰ و ۰/۵۰ و ۱۰ متر. دو شیب برای کانال موردنظر استفاده شد که عبارت بودند از: حالت بدون شیب و ۱/۵٪. سه نوع ماسه رودخانه‌ای قطر متوسط ۰/۸۵، ۱ و ۱/۲ میلی‌متر به کار برده شد. آبنمودهای تولیدی از نوع مثلثی با بده‌های اوج ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه بر متر استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش شیب از حالت بدون شیب و ۱/۵٪ طول حفره به وجود آمده ناشی از فرسایش ۱/۹۲ برابر می‌شود. آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش قطر ذرات غیرچسبنده، طول حفره فرسایش‌یافته به میزان ۱/۸۴ برابر افزایش می‌یابد. همچنین با دو برابر شدن مقدار دبی اوج آبنمود از ۲۰ به ۴۰ لیتر بر ثانیه طول حفره فرسایش‌یافته ۲/۲ برابر شد و ماکزیمم عمق آبستگي نیز ۵۶ درصد افزایش یافت. برای کاهش انتقال بار بستر به پایین‌دست پره‌هایی به صورت زیگزاگ، مورب و عمود بر جریان قرار داده شدند. نتایج نشان داد که با استفاده از پره، انتقال رسوب به پایین‌دست کاهش می‌یابد که در این میان پره عمود هم‌تراز بستر بهترین عملکرد را دارا بود و باعث کاهش در طول و عمق حفره فرسایش‌یافته توسط آبنمودهای ورودی شد که در نهایت موجب کاهش ۸۹ درصدی حجم رسوب انتقالی نسبت به حالت بدون پره گردید.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان دادند که افزایش دبی اوج آبنمود در انتقال بار بستر مؤثر بوده و همچنین شیب‌دار شدن بستر و کاهش اندازه قطر متوسط ذرات موجب افزایش بیش‌تر انتقال بار بستر می‌شود. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده

\* مسئول مکاتبه: [khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

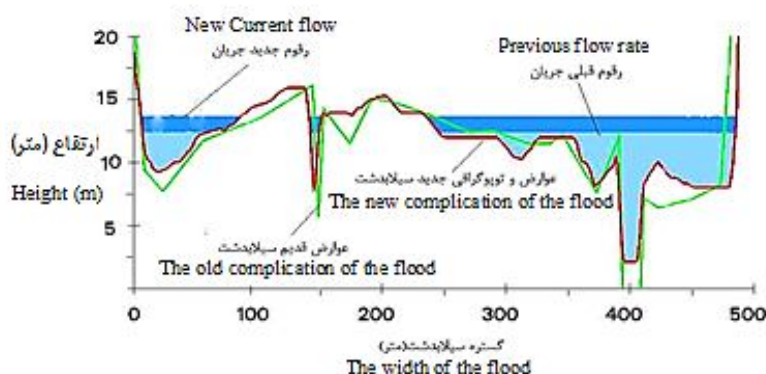
بحرانی‌ترین حالت انتخاب‌شده و اثر پره بر کاهش فرسایش بستر آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بیش‌ترین کاهش فرسایش به‌زای قرارگیری پره‌ها به شکل عمود که تاج پره‌ها هم‌تراز بستر می‌باشد، بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** آبنمود، پره، فرسایش بستر، مجاری خشک، موج سیلاب

### مقدمه

دیگر است، موجب بروز مشکلاتی مانند مسائل زیست‌محیطی، به وجود آمدن اشکال در سازه‌های آبرگیری و ذخیره آب و غیره می‌شود. از این‌رو بررسی اثرات سیلاب‌ها بر بستر رودخانه‌ها امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

سیل‌ها، جریان عظیمی از آب هستند که در مدت‌زمان کوتاهی در رودخانه‌ها جاری می‌شوند. سیل‌ها بستر رودخانه‌ها که معمولاً از مواد آبرفتی تشکیل شده‌اند را تحت تأثیر قرار داده و شکل آن را تغییر می‌دهند (شکل ۱). تغییر شکل بستر که شامل فرسایش بستر و انباشته شدن آن در نقطه‌ای



شکل ۱- تأثیر سیلاب جریان بر تغییر تراز کف رودخانه و رقوم آب.

Figure 1. Effect of flood on changing river bed level and water level.

روند بازگشتی دارد و موجب ته‌نشینی مواد بستر می‌گردد (۷). دستورانی (۲۰۰۸)، با انجام پژوهشی نشان داد که افزایش مدت‌زمان پایه هیدروگراف موجب افزایش انتقال بار بستر می‌شود. وی همچنین نشان داد که پوشش گیاهی و شکل رودخانه نیز از جمله عوامل مؤثر بر انتقال بار بستر می‌باشند (۵). کبورانی و شان‌ساززاده (۲۰۱۴)، با برقراری جریان ماندگار عوامل مؤثر بر انتقال بار بستر را مورد بررسی

اسماعیلی و همکاران (۲۰۰۷)، با انجام پژوهشی عوامل اصلی و مؤثر در انتقال بار بستر رودخانه‌ها را در شرایط سیلابی شیب طولی بستر رودخانه و همچنین مدت‌زمان سیلاب گزارش کردند. آن‌ها نشان دادند که سیلاب‌ها در ابتدای رخ داد بیش‌ترین تغییرات را در فرم بستر رودخانه به وجود می‌آورند. همچنین نشان دادند که با کاهش دبی (شاخه نزولی هیدروگراف)، تغییرات به وجود آمده در شکل بستر

(۱۴). بمبار و همکاران (۲۰۱۱) مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را بر روی بارکف تحت شرایط جریان غیرماندگار انجام دادند. آن‌ها یک سری هیدروگراف‌های مثلثی و دوزنقه‌ای را روی بستر متحرک اعمال کردند. نتایج آزمایش نشان داد که نرخ انتقال بار بستر به دنبال تغییرات زمانی هیدروگراف‌های مثلثی و دوزنقه‌ای، به ترتیب دارای تاخیر زمانی ۱۱ و ۳۰ ثانیه می‌باشد (۳). از آنجا که وجود شکل‌های بستر تأثیر زیادی روی مشخصات جریان، به خصوص مقاومت جریان می‌گذارند و همچنین تأثیر متقابلی که شکل‌های بستر و نرخ انتقال رسوب روی یکدیگر دارند، مطالعه و بررسی این اثرات و رابطه آن‌ها با ابعاد شکل‌های بستر از اهمیت خاصی برخوردار است. در این پژوهش به تأثیر سیلاب‌های ناگهانی (هیدروگراف‌های مثلثی شکل) روی بستر قابل فرسایش در حالت غیراشباع (بدون جریان پایه) و تأثیر آن بر ابعاد گودال به وجود آمده در بستر پرداخته شد. همچنین تأثیر عواملی همچون شیب آبراهه و قطر ذرات رسوبی نیز در میزان انتقال رسوب و شکل به وجود آمده در بستر رسوبی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به بررسی نحوه قرارگیری پره در عرض کانال و تأثیر آن بر کاهش فرسایش پرداخته شد.

### مواد و روش‌ها

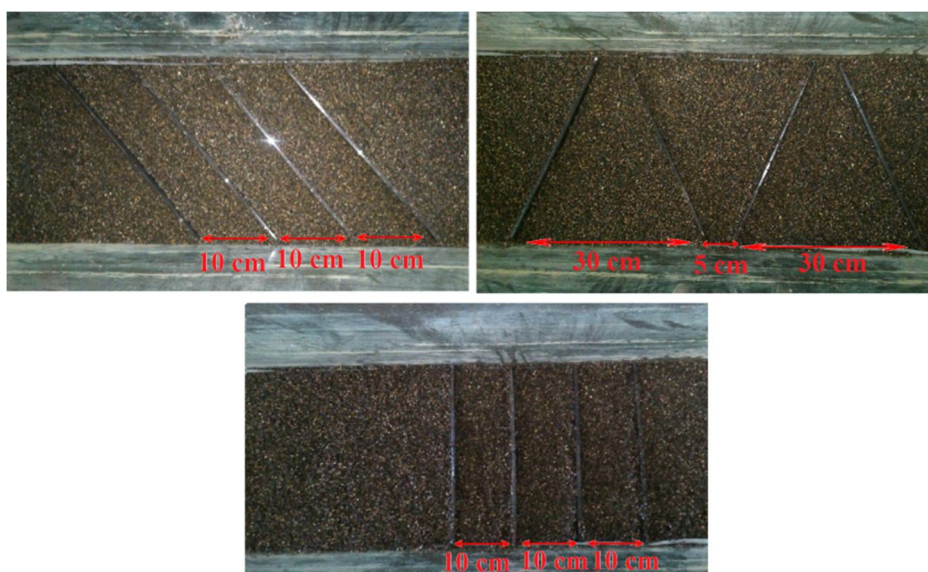
آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. برای انجام این پژوهش از یک کانال با عرض و ارتفاع ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر به طول ۱۰ متر استفاده شد. کانال مورد نظر قابلیت شیب‌پذیری داشته که برای انجام پژوهش حاضر ۲ شیب افقی و ۱/۵ درصد در جهت طولی به کانال داده شد. از دیدگاه عملی و طراحی، برقراری جریان در کانال‌های با شیب معکوس و افقی در طول زیاد امکان‌پذیر نیست و در این گونه کانال‌ها جریان یکنواخت نمی‌تواند وجود داشته باشد. با توجه

قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین اثر مربوط به اندازه و شکل ذرات بستر می‌باشد. همچنین نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که سرعت جریان بر انتقال بار بستر تأثیر چندانی ندارد (۹). طبرستانی و زراتی (۲۰۱۴)، اثر دبی اوج سیلاب را بر آبستگي اطراف پایه پل مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که دبی اوج سیلاب بر آبستگي اطراف پایه پل تأثیری ندارد ولی مدت زمان رسیدن به دبی اوج سیلاب بر میزان آبستگي بی‌تأثیر نیست (۱۰). آل‌بویه و همکاران (۲۰۱۴)، با انجام پژوهشی چنین نتیجه گرفتند که افزایش شیب باعث افزایش فرسایش بستر می‌گردد (۱). مارین و همکاران (۲۰۱۶)، میزان بار بستر در زمان سیلابی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که شکل ذرات رسوب و همچنین شیب کانال از مشخصه‌های مهم و تأثیرگذار در فرسایش بستر می‌باشند (۱۳). یانگ و همکاران (۲۰۱۶)، مهم‌ترین مشخصه فرسایش بسترهای ریپلی را سرعت جریان آب معرفی کردند (۱۶). کاپارت و یانگ (۱۹۹۸) مطالعات آزمایشگاهی خود را در مورد موج انتقال‌یافته ناشی از شکست سد، بر روی بسترهای زنده مطالعه نمودند و مشاهده کردند که شدت آبستگي کف در ابتدای مجرا بیش‌تر است (با توجه به ویژگی‌های موج سیلاب سریع و موج جریان سیلاب ناشی از شکست سد) (۴). لی و همکاران (۲۰۰۴) آزمایش‌هایی را در مورد روند انتقال رسوب کف در شرایط جریان غیرماندگار انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که بین دبی حداکثر آبنمود و حداکثر سدیگراف رسوب تاخیر زمانی وجود دارد که ناشی از تأثیر قطر ذرات است (۱۲). اسپین‌وین و زیچ (۲۰۰۲) تأثیر جریان ناشی از شکست یک سد را روی بستر زنده و تخت مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که یک موج پیشرو در ابتدای شکست سد وجود دارد که می‌تواند فرسایش قابل‌ملاحظه‌ای را در بستر ایجاد کند

ابتدایی آن از رسوبات ثابت پوشیده شده و ادامه آن از جنس شیشه است. ذرات رسوبی مورد استفاده به‌عنوان رسوبات بستر، از جنس ماسه رودخانه‌ای و در سه نوع دانه‌بندی یکنواخت با قطر متوسط ۰/۸۵، ۱ و ۱/۲ میلی‌متر تهیه گردید.

همچنین برای کاهش انتقال رسوب کف از پره در مسیر جریان استفاده شد. جنس پره‌های استفاده شده از ورق پلکسی‌گلاس بوده و در ۳ ارتفاع مختلف (هم‌سطح بستر، ۱ سانتی‌متر بالای بستر و ۱ سانتی‌متر پایین بستر) مورد استفاده قرار گرفت. چهار پره متوالی استفاده شده به‌صورت عمود، اریب و زیگزاگ در برابر جریان به‌نحوی که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، قرار گرفت.

به این‌که مطالعه حاضر، شرایط سیلابی را مورد بررسی قرار می‌دهد، برای اطمینان از عدم برقراری جریان یکنواخت در کانال، شیب صفر یا همان حالت افقی در کانال به‌عنوان یکی از شیب‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. دلیل دیگر در نظر گرفتن شیب افقی، ساده‌سازی مسأله در هنگام بررسی پارامترهای متغیر دیگر می‌باشد. دیواره‌های کانال شیشه‌ای بوده و امکان مشاهده جریان در حال عبور را فراهم می‌نمود. قسمت ابتدایی، شامل کف با زبری ثابت و از جنس رسوبات متحرک و به دنبال آن بستر رسوبی قرار گرفته که دارای ۲ متر طول و ۱۰ سانتی‌متر ارتفاع و هم‌عرض با کانال بود. قسمت سوم نیز بستری است که ۱/۵ متر

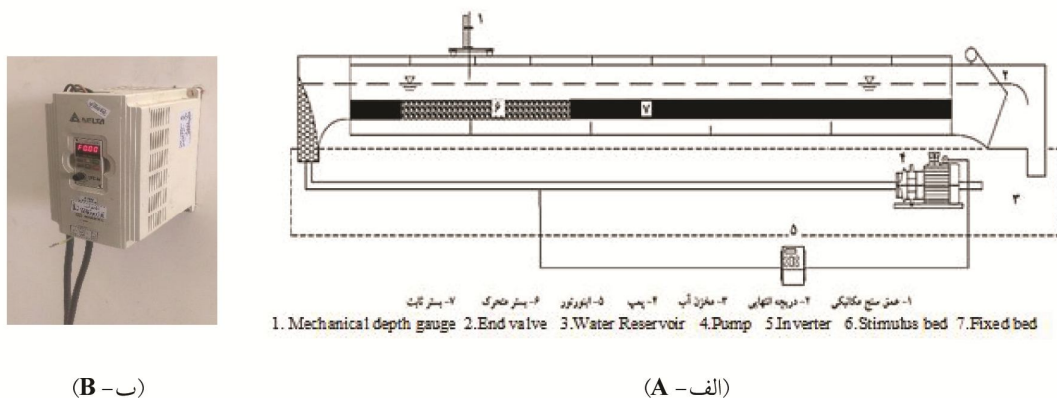


شکل ۲- نحوه قرارگیری پره‌ها در کف کانال در برابر جریان.

Figure 2. How to put the blades on the channel floor against the flow.

موجود در آن، هیدروگراف‌های جریان ورودی متفاوت با زمان پایه و دبی اوج مختلف را ایجاد کرد، در شکل ۳ نمایی شماتیک از کانال و وسایل مورد استفاده نشان داده شده است.

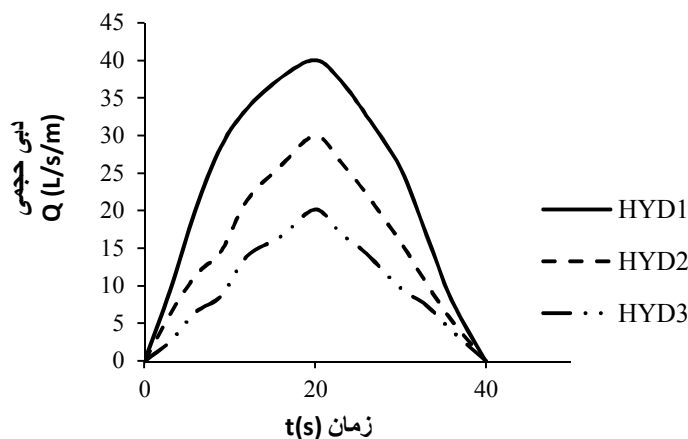
تولید هیدروگراف‌های مختلف، به‌وسیله دستگاه کنترل دور (دستگاه اینورتور) مدل VFD-M که به‌طور مستقیم به پمپ متصل شده بود، صورت پذیرفت. این دستگاه با تغییر در فرکانس پمپ و همچنین برنامه‌های



شکل ۳- الف) شمای ساده از مدل فیزیکی مورد استفاده در این پژوهش. ب) اینورتر.  
**Figure 3. A) simple picture of the physical model used in this research. B) Inverter.**

اعمال شدند. آبنمودهای تولید شده در این پژوهش به صورت آبنمودهای متقارن بوده و دلیل این انتخاب، بررسی اثر بده اوج آبنمود بر بستر رسوبی کانال بوده است. شکل شماتیک این هیدروگرافها در شکل ۴ و مشخصات کلی آزمایشها در جدول ۱ ارائه شده است.

برای انجام آزمایش، سه هیدروگراف تولید شد که این هیدروگرافها دارای زمان پایه ثابت ۴۰ ثانیه که مدت زمان شاخه جریان صعودی و شاخه جریان نزولی برابر ۲۰ ثانیه و دبیهای اوج ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه بر متر است، همچنین هیدروگرافها بدون جریان پایه می باشند و بر روی بستر خشک کانال



شکل ۴- هیدروگرافهای جریان ورودی به کانال.  
**Figure 4. Channel input hydrographs.**

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایش‌ها.

**Table 1. General characteristics of the tests.**

نوع قرارگیری پره و تراز قرارگیری Type and level of the blade	آب‌نمود جریان ورودی Incoming hydrograph	دبی اوج هیدروگراف Hydrograph peak Discharge (lit/s/m)	رسوب Soil	قطر متوسط رسوب Medium diameter (mm)	شیب Slope	آزمایش Test
-	HYD 1	20	D 1	0.85	0	1
-	HYD 2	30	D 1	0.85	0	2
-	HYD 3	40	D 1	0.85	0	3
-	HYD 1	20	D 2	1	0	4
-	HYD 2	30	D 2	1	0	5
-	HYD 3	40	D 2	1	0	6
-	HYD 1	20	D 3	1.2	0	7
-	HYD 2	30	D 3	1.2	0	8
-	HYD 3	40	D 3	1.2	0	9
-	HYD 1	20	D 1	0.85	0.015	10
-	HYD 2	30	D 1	0.85	0.015	11
-	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	12
-	HYD 1	20	D 2	1	0.015	13
-	HYD 2	30	D 2	1	0.015	14
-	HYD 3	40	D 2	1	0.015	15
-	HYD 1	20	D 3	1.2	0.015	16
-	HYD 2	30	D 3	1.2	0.015	17
-	HYD 3	40	D 3	1.2	0.015	18
عمود بالای بستر vertical to the top of the bed	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	19
عمود هم تراز بستر Vertical level alignment	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	20
عمود زیر بستر Vertical under the bed	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	21
زیگزاگ بالای بستر Zigzag to the top of the bed	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	22
زیگزاگ هم تراز بستر Zigzag level alignment	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	23
زیگزاگ زیر بستر Zigzag under the bed	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	24
اریب بالای بستر Diagonal to the top of the bed	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	25
اریب هم تراز بستر Diagonal level alignment	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	26
اریب زیر بستر Diagonal under the bed	HYD 3	40	D 1	0.85	0.015	27

که در آن،  $Q_p$  دبی اوج هیدروگراف جریان ورودی،  $T_p$  مدت زمان رسیدن هیدروگراف به نقطه اوج،  $T_b$  زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی،  $S$  شیب بستر رسوبی،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\mu$  لزجت دینامیک آب،  $\omega_s$  سرعت سقوط ذرات رسوب،  $D_s$  قطر ذرات رسوب،  $u^*$  سرعت برشی،  $\tau$  تنش برشی بستر،  $g$  شتاب ثقل،  $f$  فرکانس نوسانات جریان،  $Y_{it}$  تغییرات عمق جریان و  $V_{it}$  تغییرات سرعت جریان را نشان می‌دهند. سه پارامتر  $V_{it}$ ،  $\rho$  و  $D_s$  به‌عنوان متغیرهای اصلی یا تکرارشونده و به‌ترتیب به‌عنوان مشخصه سیال، مشخصه جریان و مشخصه هندسی در نظر گرفته شدند. گروه‌های بدون بعد به‌دست آمده از روش پای باکینگهام و با انجام اعمال جبری، شامل پنج گروه‌های زیر هستند:

$$F\left(\frac{T_p}{T_b}, S, \frac{W_s}{u^*}, \frac{\mu}{\rho D_s V_{it}}, \frac{g D_s}{V_{it}^2}, \frac{\tau}{V_{it}^2 \rho}, \frac{Y_{it}}{D_s}, \frac{f D_s}{V_{it}}\right) = 0 \quad (4)$$

همان‌گونه که مشخص است در بین گروه‌های بدون بعد، عدد رینولدز جریان و مجذور عدد فرود جریان مشاهده می‌شود. با توجه به این نکته که ایجاد جریان‌های یکنواخت، تقریباً غیرممکن می‌باشد، بنابراین جریان‌های مورد بررسی در این پژوهش به‌صورت غیریکنواخت- غیردائمی می‌باشد. با توجه به وجود نوسانات در جریان مورد بررسی، برای دقیق‌تر شدن اندازه‌گیری‌ها در این نوع جریان، نوسانات موجود در آن باید در اندازه‌گیری‌ها لحاظ شود. با در نظرگیری نوسانات موجود در جریان، پارامتر بدون بعدی به‌نام عدد استروهل به‌دست آمده که اثر نوسانات موجود در جریان را نشان می‌دهد. مشخصه‌های عمده مؤثر بر اعداد بدون بعد ذکر شده شامل سرعت جریان و قطر ذرات رسوب می‌باشد. به‌دلیل ثابت بودن سطح مقطع جریان در کانال، سرعت

از آن‌جایی که هدف از این پژوهش بررسی اثر شرایط غیردائمی جریان بر انتقال حجم رسوبات و شکل به وجود آمده ناشی از آن است، لازم است تا رسوبات مورد استفاده تحت تأثیر جریان‌های مختلف، همواره به‌صورت بارکف حرکت کرده و در شرایط معلق قرار نگیرند. بدین منظور از معیار بگنولد (۱۹۶۶) که براساس سرعت برشی جریان و سرعت سقوط ذرات در حالت مستغرق است، استفاده شد (۲). براساس این معیار، هرگاه نسبت سرعت برشی جریان به سرعت سقوط ذرات کم‌تر از ۰/۲۵ شود، ذرات به‌صورت بارکف جابجا می‌شوند. سرعت برشی جریان و سرعت سقوط ذرات بر اساس رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شد:

(۱)

$$u^* = \sqrt{g \cdot R_h \cdot S}$$

$$W_s = \frac{\sqrt{2.3(G_s - 1)(d_{50}^3) + 36v^2 - 6v}}{d_{50}} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $g$  شتاب ثقل،  $R_h$  شعاع هیدرولیکی جریان،  $S$  شیب کف کانال،  $G_s$  چگالی نسبی ذرات رسوب و  $v$  لزجت سینماتیک است. مقدار سرعت برشی جریان و سرعت سقوط ذرات برای حالتی که حداکثر دبی در کانال برقرار است محاسبه و نسبت این دو مقدار برابر با ۰/۱۲۵ حاصل شد که همواره کم‌تر از ۰/۲۵ است و بنابراین بر اساس معیار بگنولد (۱۹۶۶)، ذرات به‌صورت معلق در نمی‌آیند (۲). مشاهدات چشمی در هنگام انجام آزمایش‌ها نیز صحت این موارد را تصدیق می‌کند. همچنین در آنالیز ابعادی متغیرهای مؤثر بر انتقال بار بستر و تغییر شکل بستر تحت تأثیر جریان غیرماندگار به شرح زیر است:

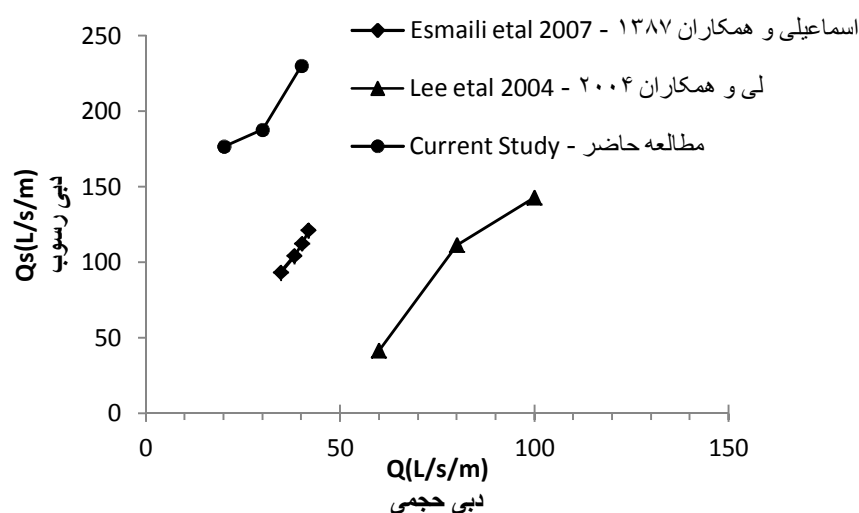
$$F(D_s, \tau, u^*, Q_p, T_p, T_b, S, \rho, \mu, W_s, g, f, Y_{it}, V_{it}) = 0 \quad (3)$$

میلی‌متر و آزمایش‌های لی و همکاران (۲۰۰۴) با مشخصات شیب کف ۰/۰۰۲ و قطر متوسط ۲ میلی‌متر مقایسه شده است (۸ و ۱۲). با وجود اختلاف در اندازه دانه‌بندی رسوبات، مقدار دبی اوج، شیب کانال و همچنین زمان پایه هیدروگراف‌های انتخابی در آزمایش‌های مورد مقایسه و آزمایش‌های این پژوهش، هماهنگی خوبی از نظر روند تغییرات مشاهده می‌شود. بر این اساس با افزایش دبی اوج هیدروگراف جریان، تغییرات دبی متوسط رسوب منتقل شده، افزایش می‌یابد.

جریان به‌عنوان عامل مؤثر بر بده جریان در نظر گرفته شده و قطر ذرات رسوب به‌عنوان عامل مؤثر دیگر به‌صورت مجزا بررسی شده است. شیب بستر کانال نیز به‌عنوان عامل مجزای دیگر در نمودارهای ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

### نتایج و بحث

در شکل ۵ نتایج به‌دست آمده برای دبی رسوبات در آزمایش‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ در این پژوهش با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ با نتایج حاصل از آزمایش‌های اسماعیلی و همکاران (۲۰۰۹) با مشخصات شیب کف ۰/۰۱۸ و متوسط دانه‌بندی ۲/۱



شکل ۵- مقایسه روند تغییرات متوسط دبی رسوبات تحت تأثیر دبی اوج هیدروگراف با تحقیقات دیگر.

Figure 5. Comparison of the moderate variation of sediment fluxes under the influence of peak hydrograph discharge with other investigations.

مثلی متقارن و تأثیر آن‌ها بر فرسایش بستر رسوبی پرداخته است، نشان می‌دهد که مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین‌دست تحت تأثیر جریان غیرماندگار در شاخه صعودی هیدروگراف رسوب بیش‌تر از مقدار آن در شاخه نزولی می‌باشد (۱۱).

در بحث تغییر شکل هیدروگراف جریان ورودی

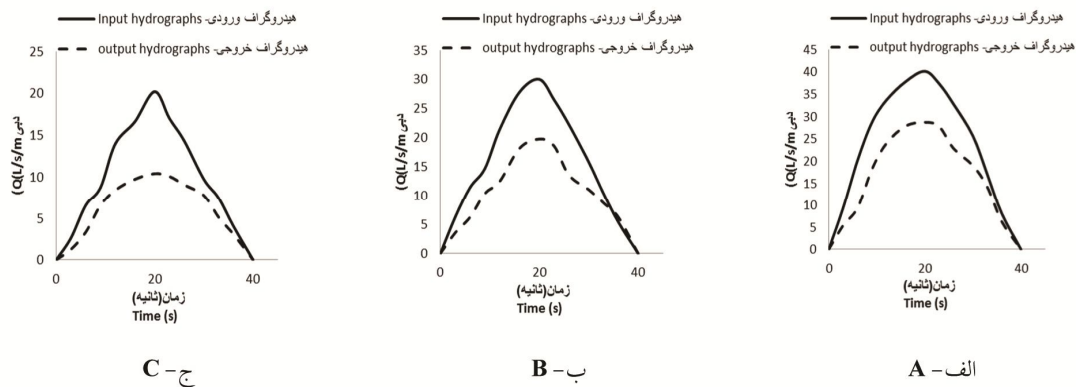
در این پژوهش مشاهده گردید که در شاخه صعودی هیدروگراف نسبت به شاخه نزولی آن، مقدار بیش‌تری از بار بستر به پایین‌دست منتقل می‌شود که این عامل نشان‌دهنده تأثیر موج اولیه جریان ورودی بر روی انتقال بار بستر به پایین‌دست می‌باشد. در پژوهش‌های کوهنل (۱۹۹۲) که به بررسی آبنمودهای



$$n = \frac{d_{50}^{\frac{1}{6}}}{21.1} \quad (5)$$

که در آن،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات و بر حسب متر می‌باشد. هیدروگراف‌های جریان ورودی و خروجی برای آزمایش‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در تمامی موارد هیدروگراف‌های خروجی جریان دارای مقادیر حداکثر کم‌تری نسبت به هیدروگراف‌های جریان ورودی هستند.

و خروجی و مقایسه آن‌ها، هیدروگراف‌های جریان ورودی با استفاده از دستگاه کنترل دور (دستگاه اینورتور) به دست آمدند. برای به دست آوردن هیدروگراف‌های خروجی در انتهای بستر متحرک، از عمق جریان در انتهای مقطع رسوبی و از رابطه مانینگ استفاده شد. ضریب زبری بستر نیز با استفاده از رابطه استریکلر که بر اساس قطر متوسط ذره است بر اساس معادله استریکلر محاسبه شد.



شکل ۶- هیدروگراف‌های ورودی و خروجی تحت تأثیر بستر رسوبی الف) HYD3 (آزمایش ۱۸) ب) HYD2 (آزمایش ۱۷) ج) HYD1 (آزمایش ۱۶).

Figure 6. Input and output hydrographs under the influence of sedimentary bed A) HYD3 (18 Test) B) HYD2 (17 Test) C) HYD1 (16 Test).

سیلاب به‌ازای سه بده و سه دانه‌بندی مختلف در ۲ شیب متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این بررسی که طول، عمق، مساحت و حجم فرسایش است، در ادامه آورده و مورد بحث قرار گرفته است. آب‌نمودهای مثلثی متقارن با دبی اوج متفاوت بر روی بستر رسوبی جریان پیدا کردند و تأثیر هر یک از آن‌ها و همچنین تأثیر شیب کانال بر انتقال بار بستر به پایین دست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که دبی اوج آب‌نمود و شیب کانال نقش به‌سزایی در میزان فرسایش بالادست دارد. همچنین مشخص گردید که هرچه مواد رسوبی ریزتر باشد،

دلیل کاهش مقدار اوج دبی جریان در هیدروگراف‌های خروجی، ذخیره شدن قسمتی از جریان در رسوب موجود در کانال به دلیل اشباع نبودن رسوبات و همچنین ذخیره آب در طول کانال و نیز افت انرژی جریان است. این موضوع موجب تغییرات در شکل هیدروگراف‌های خروجی شده است و در مقایسه با آب‌نمودهای ورودی دارای بده اوج کوچک‌تری هستند.

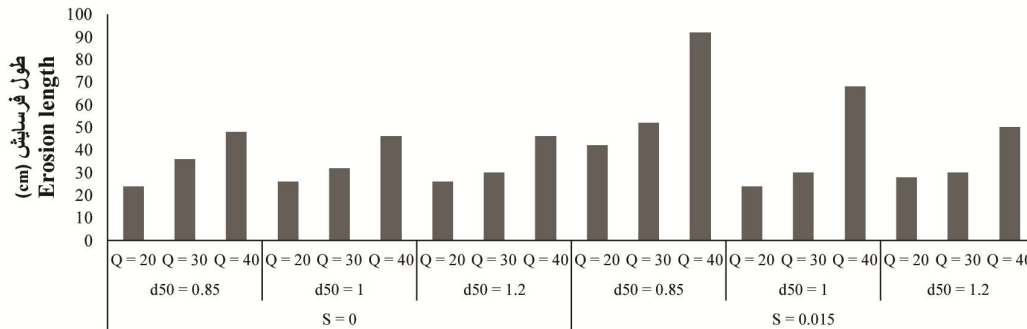
همان‌طور که اشاره شد، هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر سیلاب‌ها بر فرسایش بسترهای آبرفتی رودخانه‌ها می‌باشد. در این پژوهش اثر موج ناگهانی

تأثیر زیادی بر میزان انتقال رسوب دارد، به طوری که با افزایش شیب از صفر به ۰/۰۱۵، طول گودال به وجود آمده ناشی از فرسایش با ثابت در نظر گرفتن دو پارامتر دیگر به طور مثال برای آزمایش‌های ۱۲ و ۳، ۱/۹۲ برابر شده است، که به دلیل تغییر شیب و نیرو ثقل به وجود آمده به سمت پایین دست می‌باشد. این در صورتی است که در شکل ۸ ماکزیمم عمق گودال فرسایش یافته برای آزمایش‌های ۳، ۱۲ و ۱۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر قطر ذرات رسوبی بر میزان انتقال رسوب، در شکل ۷ می‌توان با ثابت نگه داشتن دو پارامتر دیگر و با مقایسه آزمایش‌های ۱۲ و ۱۸ چنین نتیجه گرفت که با کاهش قطر ذرات غیرچسبنده سبب افزایش سطح تماس ذره با آب ناشی از هیدروگراف شده و همچنین به دلیل داشتن وزن کمتر، نیرو بالابرنده کم‌تری نیاز است، که در نهایت موجب انتقال راحت‌تر ذرات با قطر کوچک‌تر به پایین دست می‌گردد. بنابراین طول گودال فرسایش شده به میزان ۱/۸۴ برابر افزایش می‌یابد. این در حالتی است که با توجه به شکل ۸ عمق آبشستگی نیز افزایش یافته است. دبی اوج در آنمودهای ورودی نیز بر میزان مواد منتقل شده به پایین دست تأثیرگذار می‌باشد. بر این اساس با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ با ثابت در نظر گرفتن دو پارامتر شیب و اندازه ذرات مواد بستر، با دو برابر شدن مقدار دبی اوج آنمود از ۲۰ به ۴۰ لیتر بر ثانیه بر متر برای آزمایش‌های ۱۲ و ۱۰، طول گودال فرسایش یافته ۲/۲ برابر شده است. همچنین ماکزیمم عمق آبشستگی نیز ۵۶ درصد افزایش را نشان می‌دهد. دلیل این جابجایی بیش‌تر شدن حجم و قدرت آب در همان زمان ثابت است که سبب افزایش سرعت آب، در نتیجه موجب بالا رفتن نیرو وارده بر کف بستر و تنش برشی وارده بر ذرات رسوبی کف می‌باشد.

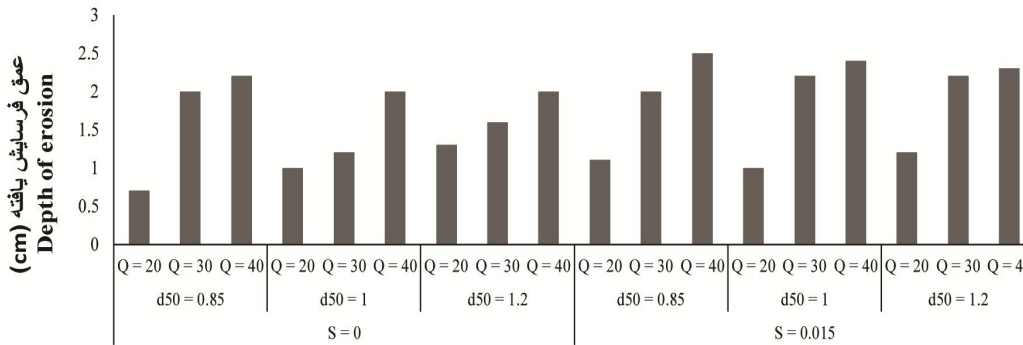
تأثیر جریان غیرماندگار بر فرسایش بستر بیش‌تر خواهد شد. به دلیل وزن سبک‌تر و سطح تماس بیش‌تر با جریان، در حالت بیش‌ترین بده جریان و بستر شیب‌دار، رسوب‌های با اندازه کوچک‌تر ( $d_{50}=0.85$ ) بیش‌ترین جابه‌جایی و انتقال به سمت پایین دست را نشان داده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود آنمودهای دارای دبی اوج بیش‌تر، به دلیل سرعت بیش‌تر و در نتیجه نیروی برشی بیش‌تری که به کف وارد می‌کنند رسوب بیش‌تری را به پایین دست منتقل می‌کنند. که این مقدار انتقال رسوب با وجود شیب و اندازه رسوب و با مقدار نیروی برشی به وجود آمده در کف رابطه مستقیم و با نیروهای مقاومتی ذرات رابطه عکس دارد که موجب تأثیرگذاری بیش‌تر در انتقال مواد بستر می‌شود. همچنین براساس نیروی حرکتی (اینرسی) ذرات بستر یک تاخیر زمانی میان دبی اوج هیدروگراف و بیشینه رسوب انتقال یافته به پایین دست وجود داشت که طبق مطالعه بمبار و همکاران (۲۰۱۱) تاخیر زمانی معادل با ۴ تا ۱۴ درصد زمان پایه آنمود جریان می‌باشد (۳). همچنین نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی لی و همکاران (۲۰۰۴) در مورد روند انتقال بار کف در شرایط جریان غیرماندگار نشان می‌دهد تاخیری بین دبی حداکثر هیدروگراف جریان و حداکثر هیدروگراف رسوب وجود دارد که ناشی از تأثیر اندازه قطر ذرات است. این میزان تاخیر حدود ۱۵-۶ از زمان پایه آنمود را تشکیل می‌دهد (۱۲).

با توجه به شکل ۷، می‌توان بیان کرد که بیش‌ترین فرسایش بستر به لحاظ طول و عمق به ازای بده ۴۰ لیتر بر ثانیه بر متر برای شیب ۰/۰۱۵ در بستر با قطر متوسط ۰/۸۵ میلی‌متر رخ داده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، آزمایش شماره ۱۲ بحرانی‌ترین حالت این بررسی می‌باشد. در شکل ۷ پارامتر شیب



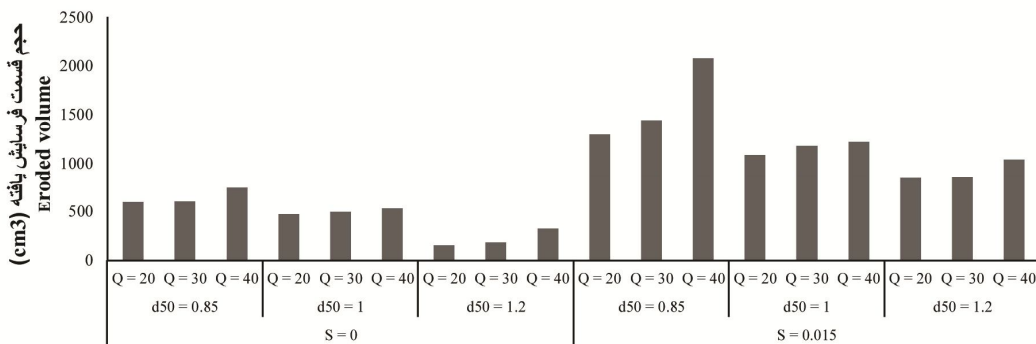
شکل ۷- نمودارهای طول فرسایش یافته ناشی از وجود سیلاب ناگهانی.  
Figure 7. Erosion Length Charting Caused by Sudden Flood.



شکل ۸- نمودارهای عمق گودال به وجود آمده در بستر کانال در اثر سیلاب ناگهانی.  
Figure 8. Deep depth diagrams have been created in the bed of the canal due to a sudden flood.

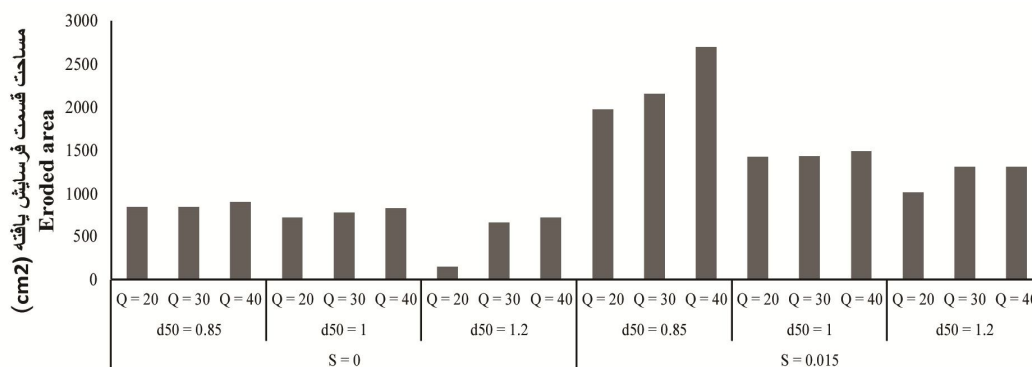
شده و مساحت سطحی به وجود آمده برای گودال آبستگي ناشی از آبنمودها با افزایش شیب و دبی و کاهش قطر ذرات مواد بستر، افزایش یافته است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز مقادیر حجم کلی انتقال یافته رسوب بستر و مساحت به وجود آمده در بستر را بعد از عبور جریان هیدروگراف را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارها پیداست، میزان حجم رسوب منتقل



شکل ۹- نمودارهای حجم فرسایش یافته در بستر کانال در اثر موج ناگهانی.

Figure 9. Erosion volume charts in the bed of the canal due to a sudden flood.



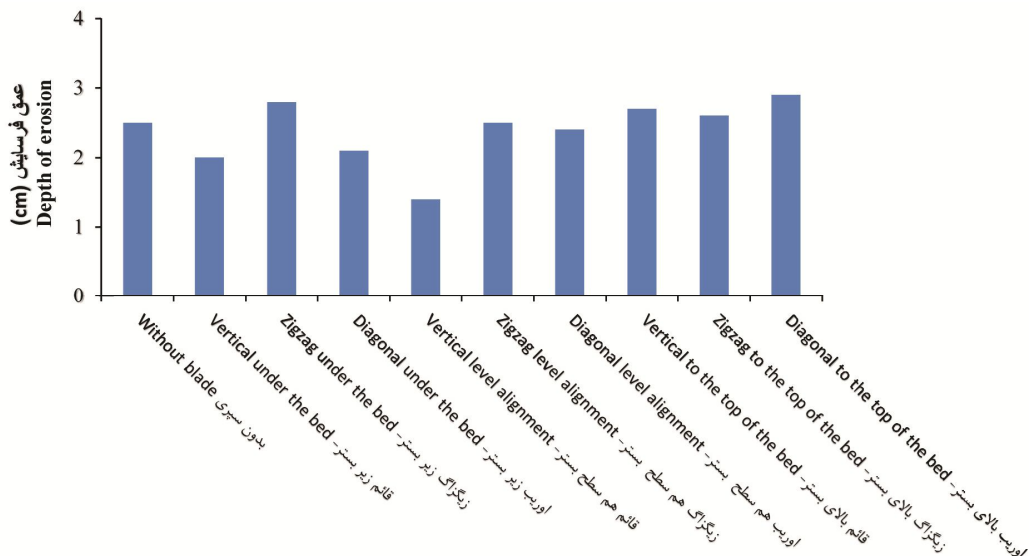
شکل ۱۰- نمودارهای مساحت سطحی به وجود آمده در بستر کانال در اثر موج ناگهانی.

Figure 10. Surface area graphs in the bed of the canal due to a sudden flood.

اسبی شکل در جلو پره بر روی بستر می‌شود. به دلیل برخورد جریان با لبه بالا آمده پره و برگشت آن به سمت بستر باعث بلند شدن ذرات بستر شده و با قرار گرفتن در مسیر جریان هیدروگراف به پایین دست منتقل می‌گردند. همچنین نحوه قرارگیری پره نیز به این آشفتگی‌ها می‌افزاید، که در این بین پره‌هایی که به شکل قائم در بستر قرار گرفته‌اند نسبت به پره‌های زیگزاگ و مورب آشفتگی کم‌تری را ایجاد می‌کنند. به نظر می‌رسد در پره‌های زیگزاگ و مورب به دلیل زاویه‌ای که با کناره کانال ایجاد می‌کنند، جریان در امتداد پره با زاویه قرارگیری آن همراه شده و به کناره کانال برخورد کرده است. در اثر این برخورد جریان آشفتگی بیش‌تری را در کناره‌ها ایجاد کرده، که موجب افزایش عمق به وجود آمده به‌خصوص در کناره‌های کانال می‌شود.

استفاده از پره برای کاهش انتقال رسوب: برای کنترل فرسایش، راه‌حل‌های گوناگونی ارائه شده است. در این پژوهش از پره به‌عنوان روش کاهش در شرایط مختلف استفاده شد تا اثر وجود این پره‌ها، نوع قرارگیری و ارتفاع آن‌ها بر میزان فرسایش بستر مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس برای آزمایش شماره ۱۲ که بیش‌ترین حالت انتقال رسوب را دارا بود، پره‌ها به‌صورت عمود بر جریان، مورب و زیگزاگ در ۳ ارتفاع مختلف زیر بستر، هم سطح بستر و بالاتر از بستر، قرار گرفتند.

همان‌طور که از شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود بیش‌ترین تأثیر کاهش عمق و طول حفره فرسایش‌یافته مربوط به پره‌های عمود که هم تراز با بستر قرار داشتند بود. طبق مشاهدات در هنگام آزمایش‌ها، پره که در بالای بستر قرار می‌گیرد موجب آشفتگی شدید جریان و به وجود آمدن جریان‌های نعل

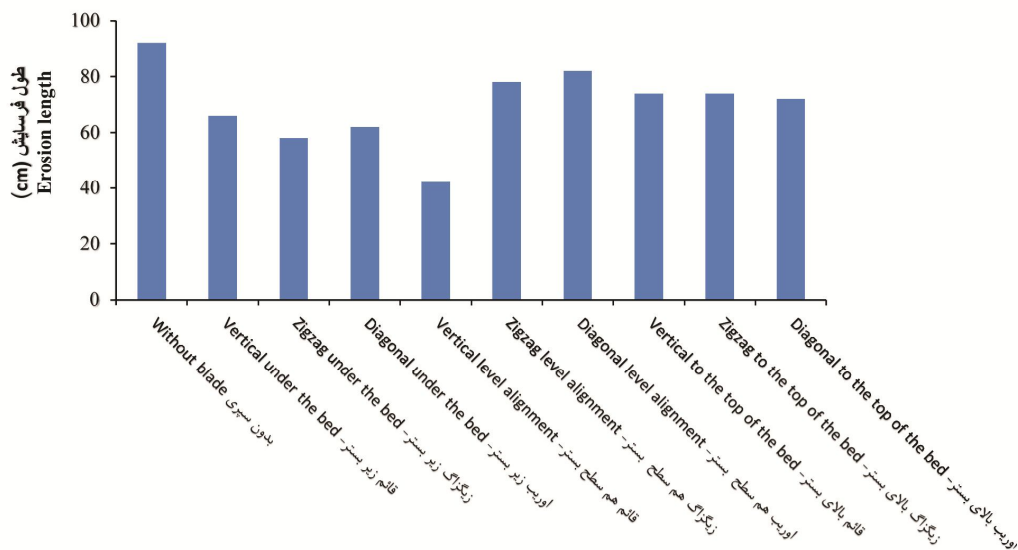


شکل ۱۱- مقایسه مقادیر ماکزیمم عمق فرسایش یافته برای حالات مختلف پره و بدون پره.

Figure 11. Comparison of maximum erosion depth for various blades and without blades.

به صورت زیگزاگ، مورب و عمود به ترتیب طول فرسایش به میزان ۱/۶، ۱/۵ و ۲/۲ کاهش یافته است. با توجه به شکل های ۱۱ و ۱۲ میزان کاهش عمق و طول آبشستگی برای پره عمود همتراز بستر در مقایسه با بدون پره به ترتیب ۴۴٪ و ۵۴٪ می باشد.

مطابق شکل ۱۲ نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می دهد که پرها کارگذاری شده در مسیر جریان برای جلوگیری از انتقال رسوب به پایین دست کارایی لازم را دارا می باشند. وجود پره با حالات مختلف قرارگیری باعث کاهش طول گودال فرسایش یافته شده است. به نوعی که در بهترین حالت قرارگیری پره



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر طول گودال فرسایش یافته برای حالات مختلف پره و بدون پره.

Figure 12. Comparison of eroded pit values for various blades and without blades.

در جدول ۲ میزان حجم رسوب منتقل شده در حالت بدون پره و حالت‌های مختلف قرارگیری پره آورده شده است. همان‌طور که مشخص است پره قائم هم‌تراز بستر عملکرد بهتری را دارا بوده است و میزان حجم رسوب منتقل شده به پایین‌دست را ۸۹٪ کاهش داده است.

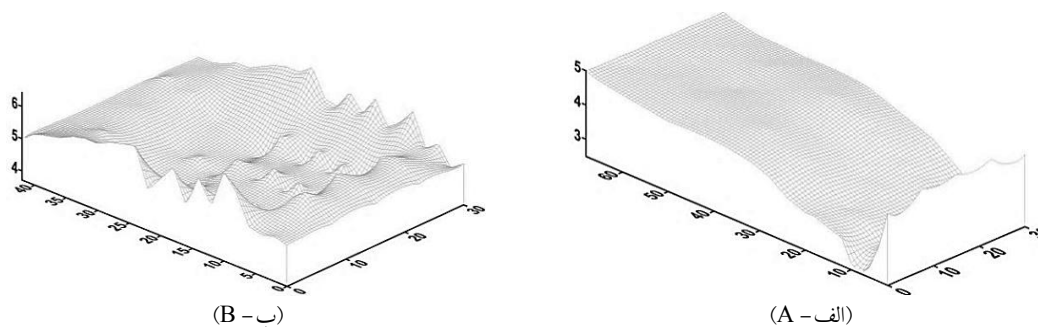
در ادامه برای درک بهتر اثر صفحات مستغرق، صفحه‌ای که بهترین تأثیر را در کاهش آبشستگی داشته با حالت بدون پره مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد در نمای ۳ بعدی، گودال

به‌وجود آمده در کانال ناشی از هیدروگراف برای حالت پره عمود هم‌تراز بستر بسیار کم‌تر از حالت بدون پره می‌باشد. وجود پره‌ها در مسیر موجب موج‌دار شدن بستر کف شده است به‌صورتی‌که جلوی پره‌ها بستر شسته شده ولی در پشت پره‌ها ته‌نشین می‌گردند. همان‌طور که در شکل ۱۳- ب مشخص است چهار موج به‌وجود آمده در کف نشان از کار گذاشتن چهار پره در مسیر جریان است که حتی در بعضی نواحی با ته‌نشین شدن رسوب در پشت پره‌ها تراز بستر از تراز اولیه نیز بالاتر رفته است.

جدول ۲- مقادیر حجم رسوب انتقال یافته به پایین‌دست.

Table 2. Transfer volume values downstream.

شماره آزمایش Test number	مقدار حجم منتقل شده Volume transferred (cm <sup>3</sup> )	میزان کاهش در انتقال بار بستر (%) Reduction in the transfer of bed loading (%)
بدون پره (آزمایش ۱۲) Without blades	2080	-
قائم بالای بستر Vertical to the top of the bed	560	73
قائم هم‌تراز بستر Vertical level alignment	221	89
قائم زیر بستر Vertical under the bed	986	52
زیگزاگ بالای بستر Zigzag to the top of the bed	2097	-
زیگزاگ هم‌تراز بستر Zigzag level alignment	615	70
زیگزاگ زیر بستر Zigzag under the bed	721	65
مورب بالای بستر Diagonal to the top of the bed	2186	-
مورب هم‌تراز بستر Diagonal level alignment	947	54
مورب زیر بستر Diagonal under the bed	719	65



شکل ۱۳- مقایسه شکل بستر به وجود آمده پس از عبور هیدروگراف الف) حالت بدون پره و ب) با پره.

Figure 13. Compare the shape of the bed formed after passing the hydrograph A) No blade mode B) With blade.

### نتیجه گیری

در این پژوهش آزمایش‌هایی برای بررسی عوامل مؤثر بر انتقال رسوب در رودخانه‌های فصلی انجام شد. دبی اوج آبنمودهای متقارن، شیب بستر و اندازه ذرات بستر نقش تعیین‌کننده‌ای بر انتقال رسوب دارند. نتایج نشان داد که با افزایش شیب از صفر به  $0/15$  طول حفره به وجود آمده ناشی از فرسایش  $1/92$  برابر می‌شود. با بررسی تأثیر قطر ذرات رسوبی بر میزان انتقال رسوب، آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش قطر ذرات غیرچسبنده، طول حفره فرسایش‌یافته به میزان  $1/84$  برابر افزایش می‌یابد. همچنین با دو برابر شدن مقدار دبی اوج آبنمود از  $20$  به  $40$  لیتر بر ثانیه طول حفره فرسایش‌یافته  $2/2$  برابر شد و ماکزیمم عمق آبشستگی نیز  $56$  درصد افزایش یافت. برای کاهش انتقال بار بستر به پایین دست در مسیر جریان و در کف کانال از پره استفاده شد. پره‌ها به صورت زیگزاگ، مورب و عمود بر جریان قرار داده شدند. نتایج نشان داد که با استفاده از پره، انتقال رسوب به پایین دست کاهش می‌یابد که در این میان پره عمود هم‌تراز بستر بهترین عملکرد را دارا بود و باعث کاهش در طول و عمق حفره فرسایش‌یافته توسط آبنمودهای ورودی شد. بنابراین از این روش می‌توان در مکان‌هایی که انتقال رسوب دارای اهمیت بیش‌تری می‌باشد، استفاده کرد.

وانونی (۲۰۰۶) با استفاده از پره‌های سطحی و کفی نشان داد که این پره‌ها دارای کارایی مناسبی اند و توانایی کاهش بارهای بستر را در ورود به کانال جانبی دارا می‌باشند. به هر صورت به کارگیری پره‌های سطحی در بالادست پره‌های کفی می‌تواند در بالا بردن توانایی سامانه در تله‌اندازی و انحراف رسوبات مؤثر باشد چرا که این رسوبات می‌توانند مشکلات متعددی را باعث شوند. این سازه با تشکیل جریان‌های متمرکز حلزونی‌شکل، باعث زدودن رسوب از مناطق حساس شده و با هدایت آن، از ورود به آبگیرها جلوگیری می‌کند. همچنین پره‌های مستغرق موجب کاهش آبشستگی اطراف سازه‌های آبی هم‌چون پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل می‌شود و موجب حرکت حفره آبشستگی و دور کردن آن از دماغه آن‌ها به سمت مرکز کانال شده است (۱۵). امامقلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند آرایش دو ردیفه موازی که در آن ردیف اول پره با فاصله  $5$  سانتی‌متر (نصف قطر تکیه‌گاه) و ردیف دوم با فاصله  $10$  سانتی‌متر (برابر با قطر تکیه‌گاه) از تکیه‌گاه قرار داده شدند، موجب کاهش  $87/81$  درصدی حداکثر عمق آبشستگی شده‌اند (۶).

منابع

1. Alebouyeh, A., Esmaili, K., and Khodashenas, S.R. 2014. Comparison of the Effects of Flow Pattern and Bed Slope on Sediment Transport in Laboratory Conditions. *J. Water Soil*. 28: 2. 286-295. (In Persian)
2. Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. US government printing office.
3. Bombar, G., Elci, S., Tayfur, G., Guney, S., and Bor, A. 2011. Experimental and Numerical Investigation of Bed-Load Transport under Unsteady Flows. *J. Hydr. Engin.* 137: 10. 1276-1282.
4. Carpat, H., and Yong, D.L. 1998. Formation of a jump by the dam-break wave over a granular bed. *J. Fluid Mech.* 372: 165-187.
5. Dastorani, M.T. 2008. Specific Characteristics of Flood and Sediment in Dryland Catchments and their Importance in Management and Planning Strategies. 4<sup>th</sup> National Conference on Watershed Management and Engineering, Iran. Watershed Management. Karaj. Faculty of Natural Resources, University of Tehran. (In Persian)
6. Emamgholizadeh, S., Nohani, E., Farhadi, F., and Azhdary, K. 2017. The experimental investigation of the effect of submerged vanes on the reduction of the local scour around the bridge abutment, *Irrigation and Water Engineering*, 7: 3. 1-15. (In Persian)
7. Esmaili, K., Shafai Bajestan, M., and Kashefipour, M. 2007. Experimental Investigation of the Effective parameters on Sediment Transport under Flash Flood. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*. 1: 2. 3-10. (In Persian)
8. Esmaili, K., Shafai Bajestan, M., and Kashefipour, M. 2009. A model for predicting the bed load in ephemeral rivers. *J. Soil Water*. 22: 2. 240-250. (In Persian)
9. Kaboorani, S., and Shanehsazzadeh, A. 2014. Modeling the Saltation and Evaluating the Parameters Affecting the Random Movement of Sediment Particles in Bed Load Transport Under Steady Flow. *Modares Civil Engin. J.* 14: 1. 95-104. (In Persian)
10. Karimae Tabarestani, M., and Zarrati, A. 2014. Effect of Hydrograph Peak Time on Local Scour around Bridge Pier. *J. Hydr.* 9: 3. 15-32. (In Persian)
11. Kuhnle, R.A. 1992. Bed-load transport during rising and falling stages on two small streams. *Earth Surf. Processes Landforms*. 17: 2. 191-197.
12. 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.
13. Maurin, R., Chauchat, J., and Frey, P. 2016. Dense granular flow rheology in turbulent bedload transport. *J. Fluid Mech.* 804: 490-512.
14. Spinewine, B., and Zech, Y. 2002. Dam-break waves over movable beds: a "flat bed" test case. In EC Contract EVG1-CT-2001-00037 IMPACT Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty, Proceedings 2<sup>nd</sup> Project Workshop, Mo-i-Rana, Norway (pp. 12-13).
15. Vanoni, V.A. 2006. Sedimentation Engineering, Manual and Reports on Engineering Practice No. 54. Published by American Society of Civil Engineering.
16. Yang, Z., Li, H., Liang, B., Lee, D., Pan, X., and Xu, Y. 2016. Laboratory Experiment on the Bed Load Sediment Transport over a Rippled Bed. *J. Coastal Res.* 75: 1. 497-501.





Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(3), 2019*

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14891.2996

## **Investigation of the effect of a sudden flood wave on the transition of bed loading in dry ducts and the effect of submerged plates on reducing bed load**

**H. Shahsavari<sup>1</sup>, Gh. Panahi<sup>1</sup> and \*S.R. Khodashenas<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Dept. of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 04.28.2018; Accepted: 02.17.2019

### **Abstract**

**Background and Objectives:** The prevailing rainfall in warm and dry areas is thunderstorm and causes the great floods. Destruction and sedimentation of floods cause a lot of damage. In this study, the effect of flood waves on the bed load transfer in a laboratory channel with unsteady flow was investigated.

**Materials and Methods:** The width, height and length of channel were: =0.3, 0.4 and 10 meters respectively. Two channel longitudinal slopes were: 0% and 1.5%. Three rivers sand with  $d_{50}$ =0.85, 1 and 1.2 mm were applied. Three triangular hydrographs with discharge peak were applied: 20, 30 and 40 lit/s/m.

**Results:** Peak of discharge, bed slope and bed particle size play an important role in sediment transport. The results showed that with increasing slope from 0 to 0.015, the length of hole due to erosion was 1.92 m. The experiments showed that by decreasing the diameter of non-cohesive particles, the length of eroded hole increased to 1.84 times. Also by doubling the peak discharge from 20 to 40 liters per second, the length of eroded hole was 2.2 times and the maximum scour depth increased to 56 percent. To reduce the transfer of bed loading to the bottom of the blades, they were zigzag, diagonal and perpendicular. The results showed that using the blade, the sediment transport to the downstream decreases. In this case the perpendicular vortex of the substrate had the best performance and reduced the length and depth of the eroded hole by the inputs. Finally, the amount of sediment transfer volume decreased by 89% relative to the non-blown state.

**Conclusion:** The results showed that the increase of discharge peak in sediment transfer was effective and also the bed sloping and reduction of the particle diameter average size caused a greater increase in bed loading. Based on the experiments, the most critical mode was selected and the blade effect on the erosion of the bed was investigated. The results of the surveys showed that the greatest reduction in erosion was due to the vertical placement of the blades, the crowns of the blades being flattened.

**Keywords:** Bed Erosion, Blade, Dry Flume, Flood Wave, Hydrograph

---

\* Corresponding Author; Email: [khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

