

مطالعه أزمایشگاهی تاثیر جریانهای سیلابی ناشی از شکست سد بر انتقال مصالح رسوبی بستر

خهبات خسروی⁽، محمود حبیب نژاد روشن^۲، کاکا شاهدی^۳، امیرهوشنگ نظامیوند چگینی^۴ و کامران چپی[°]

۱ - دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (نویسنده مسوول: Khabat.khosravi@gmail.com) ۲ و ۳- استاد و دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری ۴- استادیار گروه عمران-آب، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان ۵- استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گردستان تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۴ صفحه: ۱۳۲ تا ۱۳۲

چکیدہ

جریان های متغیر سریع همچون سیلابهای ناگهانی ناشی از شکست سد در اثر وقوع زلزله، پدیده رگاب، بمباران، روگذری جریان و یا وجود اشتباه در طراحی و اجرای پروژه محتمل بوده و میتواند خسارات جانی و مالی فراوانی در پایین دست آنها ایجاد نمایند. غیردائمی بودن جریان در وقایع سیلابی، دارای تاثیر زیادی بر روی ساختار میدان جریان حرکت ذرات رسوبی و همچنین پراکنش آلودگی در رودخانه میباشد. این مطالعه با هدف بررسی آزمایشگاهی تاثیر انواع شیب، ذرات رسوبی و جریان متغیر با دبیهای متفاوت بر روی حمل رسوب در رودخانهها در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض و عمق ۰/۰ متر و با قابلیت شیب پذیری انجام شد. در این پژوهش دو نوع مصالح رسوبی یکنواخت با اندازههای ۱۰/۳۰ و ۲۰/۰ و ۲۰/۰ و مانتی در بستر فلوم فوق سرب پذیری انجام شد. در این پژوهش دو نوع مصالح رسوبی یکنواخت با اندازههای ۱۰/۳۰ و ۱۶ میلی متر در بستر فلوم فوق سیب پذیری انجام شد. در این پژوهش دو نوع مصالح رسوبی یکنواخت با اندازههای ۱۰/۳۰ و ۱۶ میلی متر سد نیز از یک دریچه بالارونده در ۲/۲ متری ابتدای فلوم، با سه ارتفاع آب بهترتیب برابر با ۲۲، ۲۰ و ۲۰/۰ و بانتی متری در پشت دریچه، استفاده شد. نتایج نشان داد که در جریان متغیر ناشی از شکست سد برای حالتی که ارتفاع آب پشت دریچه ۲۰ سانتیمتر باشد با ۱/۳۵ برابر شدن قطر ذره بستر، حمل رسوب ۱۳/۰ برابر و همچنین با دو برابر شدن شیب بستر سانتیمتر باشد با ۱/۳۵ برابر شدن قطر ذره بستر، حمل رسوب ۱/۰ برابر و همچنین با دو برابر شدن شیب بستر سانتیمتر باشد با ۱/۳۵ برابر شدن قطر ذره بستر، حمل رسوب ۱/۰ برابر و همچنین با دو برابر شدن شیب بستر سر (۱۰/۰ به

واژههای کلیدی: بار بستر، بررسی آزمایشگاهی، جریان متغیر، شکست سد

مقدمه

شکست سدهای بتنی میتواند بهعلت پدیدههای سرریزشدن از روی سد بهدلیل ناتوانی ظرفیت تخلیه سرریز، تراوش، اثر زلزله، ایجاد موج ضربهای در اثر ورود لغزشهای شدید دامنههای سد به داخل مخزن صورت گیرد (۱۳). نمونه شکست سدهای بزرگ دنیا می توان به سد بالدوین هیلز در سال ۱۹۶۴ در کالیفرنیا، سد سن فرناندو در سال ۱۹۷۱ در کالیفرنیا، سد بوفالو در سال ۱۹۷۲، سد نیوتن در سال ۱۹۷۶، سد لورل ران و سد سندی ران در سال ۱۹۷۷ اشاره داشت (۱۳). امواج سهمگین آزاد شده در اثر جریان سیلاب ناگهانی ناشی از شکست سد، و در پی آن خسارات قابل توجه جانی و مالی رخ داده، این پدیده را تبدیل به موضوعی مهم و متمایز از سایر پدیدههای هیدورلیکی برای متخصصین و مهندسین هیدرولیک کرده است. در دهههای اخیر تلاشها در خصوص مطالعه هیدرولیک شکست سد افزایشیافته (۲) ولی بیشتر مطالعات و محاسبات بر بستر ثابت و بدون توجه به توانایی فرسایشی جریان ناپایدار و تکامل مرفولوژیکی مربوط به آن در بستر پاییندست انجام شده است. در اثر جریان غیردائمی مقدار قابل توجهي رسوبات بستر به سمت پايين دست منتقل می شود که باعث تغییرات شدیدی در ریخت شناسی رودخانه می شود. در حقیقت این تغییر مرفولوژیکی تاثیر مهمی در حداکثر سطح أب و زمان رسيدن جبهه مثبت موج دارد که

یک مشخصه مهم برای ارزیابی ریسک به حساب می اید (۲۳،۱۲). اثر شکست ناگهانی سدها ممکن است تا کیلومترها در پایین سد باعث خسارات شدید گردد، مثلا میتوان به شکست سدهای Eder و Mohen در ألمان در اثر بمباران توسط منتفقین در جنگ جهانی دوم اشاره کرد که سیلاب ناشی از شکست سد تا فاصله ۵۰ کیلومتری پاییندست سد گسترش یافته بود (۱۱). بهطور کلی تحقیقات صورت گرفته در مورد شکست سد، بیشتر بر روی نحوه تشکیل جریان و حرکت پیشانی موج مثبت در روی بستر صلب توسط روشهای تفاضل مرکزی و الگوریتم مک کورمک، روشهای جریان بالادستی جهتمند، حلکنندههای تقریب ریمان و یا روش مبتنیبر حرکت ذرات (۸،۷) تمرکز دارد. همچنین برخی از پژوهشهای صورت گرفته بر روی بسترهای متحرک، بدون در نظر گرفتن تغییرات نرخ حمل بار بستر بوده (۱۸) و یا تحقیقات صورت گرفته بر روی نحوه تشکیل جریان و حمل رسوب بستر توسط روشهای عددی انجام شده است (۱۷). حدادیان و همکاران (۹) تحقیقی با عنوان تاثیر شیب بستر بر جریان ناشی از شکست سد بر روی بستر فرسایش پذیر انجام دادند. ایشان با نصب ۷ دوربین در یک فلوم شش متری که فقط برای آزمایشهای شکست سد طراحی شده بود، اقدام به تاثیر تغییر شیب بستر (صفر، ۲+ و ۲- درصد) بر شکست سد نمودند. براى انجام اين أزمايش كليه شرايط اوليه ثابت بوده و

تنها شیب متغییر بوده است. ایشان بیان کردند که نوک زبانه موج پیش رونده در حالت شیب مثبت بر خلاف دو حالت دیگر تیزتر است. همچنین، حسنزاده و همکاران (۱۰) جریان غیردائمی ناشی از شکست سد ونیار تحت سناریوهای شکست فرضی روگذری جریان و رگاب را با مدل HEC-RAS تحلیل، و پهنه سیلاب ناشی از شکست سد را تعیین نمودند. محمدنژاد و همکاران (۱۷) با استفاده از نرمافزار فلوئنت و حل معادلات ناویر-استوکس به شبیهسازی موج مثبت حاصل از شکست سد در حالت دو بعدی قائم با در نظرگرفتن مدلهای أشفتگی مختلف، پارامترهای فیزیکی و عدد موثر بر این پدیده پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که مدل عددی مورد استفاده، توانایی شبیهسازی شکست سد را در دو حالت بستر خشک و تر داشته و نتایج قابل قبولی را ارائه مینماید. لیل و همکاران (۱۵) در مورد اثر موج حاصل از شکست سد که بهصورت جریان غیرماندگار (متغیر سریع) عمل مینماید را بر تغییرات ایجادشده روی یک بستر قابل حرکت از مواد شنی و مواد سبک متخلخل بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که پیشانی موج بهطور واضحی در بستر متخلخل و دانهبندی سبکتر نسبت به بسترهای شنی و ثابت، کوچکتر است. گارسیا و ساویرون (۶) برای شبیهسازی شکست سد از روش عددی مبتنی بر کاهش مجموع تغییرات (Diminishing Variation Total) گامهای پیشگویی و اصلاحات مک کورمک استفاده کردند. کوهن و لارون (۴) مطالعاتی را در مورد هیدرولیک جریان روی بسترهای متحرک و ارزیابی انتقال رسوب انجام و تغییرات بستر را از طریق مدل کامپیوتری تهیه کردند. ایشان یک مدل نظری بر مبنای اصل بقای جرم در آبراهههای کم عمق ارائه کرده و نتایج ایشان نشان داد که با شکست سد در ابتدای بستر، فرسایش و ابشستگی شدید بهوجود امده و همچنان که موج به سمت پاییندست منتقل می گردد از شدت آن کاسته می شود، که شرایط فوق موجب شسته شدگی شدید در اطراف سد می گردد. کالفی و ولیانی (۳) نیز به بررسی اثر جریانهای ناگهانی ناشی از شکست سد بر بسترهای متحرک خشک و تر پرداختند و یک مدل ریاضی برای پیشبینی چگونگی تغییرات بستر پس از رهاشدن اب ناشی از شکست سد که بهصورت یک موج قوی میباشد ارائه نمودند. عبدرزاک و همکاران (۱) به بررسی مدلسازی عددی یک بعدی تاثیر جریان ناشی از شکست سد بر بستر متحرک پرداختند. مدل یک بعدی ایشان توسط معادلات سنت ونانت برای موج آب، معادله بقای جرم رسوب و معادله تاخیر مکانی برای انتقال رسوب غیرتعادلی به کار گرفته شد. در نهایت نتایج مدل ایشان با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامتر ضریب اصطکاک، مهمترین پارامتر برای ارزیابی فرایندهای انتقال رسوب در طی شکست سد میباشد. لاروکه و همکاران (۱۴) به بررسی ازمایشگاهی و عددی جریانهای ناشی از شکست سد پرداختند و بیان نمودند که مدلسازی آشفتگی، پروفیل

سرعت را در مخزن بالادست متاثر نمی کند، اما تاثیر مهمی بر پیش بینی سرعت پایین دست دارد. از دیگر نتایج ایشان این بود که بزرگی سرعت در یک موقعیت و منطقه خاص با زمان تغییر می کند. ژنگ و همکاران (۲۵) یک مدل یک بعدی ضمنی را برای حل مسئله شکست سد در یک بستر خشک و تر توسعه داده و نشان دادند نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی موجود تطابق رضایت بخشی دارد. کیان و همکاران (۱۸) در دانشگاه وهان در چین، به بررسی مجموعه دادههای آزمایشگاهی جدیدی برای شبیه سازی سیلابهای ناگهانی ناشی از شکست سد بر روی بستر متحرک با قطرهای مختلف مصالح در حالت یکنواخت و مخلوط و همچنین ارتفاعهای متفاوت آب بالادست و پایین دست سد، پرداختند. آنها بیان کردند که سطح رسوبات بستر، یک روند درشت شدن را در آبشستگی و مناطق نهشته شدن رسوبات، نشان می دهد.

با توجه به پژوهشهای صورت گرفته، در بیشتر آنها به بررسی جریان تشکیل شده و همچنین تغییر و تحولات بستر پرداخته شده است و اطلاعات در مورد حمل بار رسوبات بستر، خصوصا به صورت مدل سازی فیزیکی بسیار کم و پراکنده میباشد. هدف از این تحقیق مقایسه بین تاثیر جریانهای متغیر ناشی از شکست سد بر روی حمل رسوبات بستر در شیبهای مختلف و با بستر دارای مصالح با قطرهای متفاوت شیبهای مختلف و با بستر دارای مصالح با قطرهای متفاوت است که در تحقیقات مشابه، به بررسی همزمان این پارامترها بر حمل رسوب پرداخته نشده است.

مواد و روش ها

۱ – تنظيمات فلوم

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی دانشگاه گیلان، در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض و عمق ۰/۵ متر انجام گرفت. جدارههای فلوم بهمنظور مشاهده جریان از جنس شیشه شفاف انتخاب شد. فلوم قابلیت شیبپذیری داشته و در این تحقیق دو شیب ۲۰/۱ و ۲۰/۲ در نظر گرفته شد. مصالح این تحقیق دو شیب ۲۰/۱ و ۲۰/۲ در نظر گرفته شد. مصالح انتخابی در این تحقیق با اندازههای ۱۰/۳۵ و ۱۴ میلیمتر متر در نظر گرفته شد. بسترهای ثابت ابتدا و انتهای فلوم، (۲ متر در نظر گرفته شد. بسترهای ثابت ابتدا و انتهای فلوم، (۲ متر ابتدایی و همچنین ۲/۵ متر انتهای فلوم) توسط چسپاندن مصالح مورد نظر بر روی موزاییک و چوب (با ارتفاع و طول مناسب) بهمنظور عدم تاثیر برگشت آب بر روی حمل رسوب تهیه شدند. ارتفاعهای آب توسط سه عدد، سنسور التراسونیک شبت کننده سطح آب ضبط گردید.

۲- خصوصيات مصالح رسوبي بستر

در پژوهش حاضر از دو مصالح یکنواخت طبیعی (بهخوبی گردشده) ۱۰/۳۵ و ۱۴ میلیمتری استفاده گردید و خصوصیات فیزیکی آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱– خصوصیات فیزیکی رسوبات بستر مورد استفاده در تحقیق حاضر Table 1. Physical properties of bed sediment in this research										
شکل ذرہ	تخلخل	چگالی (Kg/M^ ³)	متوسط اندازه ذرات به میلیمتر	نوع مصالح						
گردشده	٪۴۰	۲۳۷۵	۱۰/۳۵	شن						
گردشده	140	79	١۴	شن						

۳- جریان متغیر ناشی از شکست سد

یکی از بارزترین نوع جریانهای غیردائمی متغیر، جریانهای ناشی از شکست سدها میباشد، که شناخت مشخصات این نوع جریان ها در پایاب سدها برای تخمین و کنترل خسارتهای منتج از أنها ضرورت دارد. برای مدلسازی فیزیکی شکست ناگهانی سد، یک دریچه از جنس PVC که به صورت عمودی توسط دستگیره، از پایین به بالا باز می شود در ۲/۲ متری از ابتدای فلوم قرار داده شد. مصالح

شنی با قطر متوسط ۱۰/۳۵ و ۱۴ میلیمتری (بهطور جداگانه و در آزمایشهای متفاوت) در طول ۵ متر داخل فلوم ریخته شد، به طوری که ۲/۳ متر در بالادست دریچه و ۴/۷ متر هم در پایین دست دریچه قرار داده شد (شکل ۱) و در انتهای بستر نیز تله مناسب برای جمعآوری رسوبات حمل شده قرار داده شد (آزمایشها در بستر تر با ارتفاع آب ۲ سانتیمتر، که معادل آب پاییندست سد سفید رود میباشد، اجرا شد).



شکل ۱- موقعیت دریچه و بستر متحرک Figure 1. Location of gate and mobile bed

زمان بازشدن کامل دریچه از روی فیلمهای ثبتشده استخراج شد که برابر ۴۵/۰ ثانیه، سرعت پیشانی موج مثبت از روى سنسورهاى التراسونيك (بين ١/۶ تا ٢/٨ متر بر ثانيه) و سرعت متوسط در طول بستر از روی فیلمهای ثبتشده استخراج گردید که بین ۱/۳ تا ۲/۳۵ متر بر ثاینه متغیر بوده است. بهطور کلی سه دوربین در فواصل و مکانهای مناسب نصب گردید، اولی در محل دریچه، دومی از نمای روبهرو به دریچه (در امتداد فلوم) در طول ۴ متری از دریچه و سومین دوربین هم دقیقا در موقعیت تلهها قرار داده شد. از روی دوربین اولی سرعت بازشدن دریچه، از روی دوربین دومی سرعت موج و از روی دوربین سومی نحوه و سرعت پرشدن تلهها با زمان مشخص گردید. سه عدد سنسور التراسونیک ارتفاعسنج نیز یکی در پشت دریچه برای کنترل ارتفاع آب پشت دریچه، دومی با ۰/۷ متر فاصله بعد از دریچه و سومی نيز ۱ متر پايين تر از سنسور دومي قرار داده شد (شکل ۲).

برای بهدست اوردن سرعت موج، تغییرات ثبت شده اوج موج در هنگام عبور از سنسورها ملاک قرار داده شد.

بهطور کلی مراتب انجام آزمایشها مبتنی بر مراحل زیر بوده است: ۱- مصالح شنی با قطر متوسط ۱۰/۳۵ یا ۱۴ میلیمتری در بالا و پاییندست دریچه ریخته شد، ۲- ارتفاعهای آب در بالادست دریچه برابر ۱۲، ۲۰ و ۴۰ سانتیمتری تنظیم شدند (شکل ۳). ۳-وسایل ثبت و ضبط دادهها توسط ویدیوها و دستگاه التراسونیک در موقعیتهای مکانی مناسب نصب و تنظیم گردید. ۴- دریچه بهصورت دستی و با سرعت زیاد و تقریبا یکنواخت باز گردید. ۵- وسایل ثبت و ضبط دادهها جهت جمع اُوری دادههای تغییرات تراز سطح آب و انتقال رسوب، همزمان با بازشدن دریچه شروع شد (شکل ۴). ۶- ادامه جریان تا حدود ۲ دقیقه انجام گردید. ۷– اطلاعات و دادههای ثبت و ضبطشده جهت أنالیز و دستیابی به اهداف تحقیق از جمله تغییرات مرفولوژی بستر استفاده گردید.



شکل ۲– مدل فیزیکی و موقعیت سنسورها Figure 2. Physical model and location of sensors





شکل ۳– ارتفاع آب ۴۰ سانتیمتری پشت دریچه Figure 3. The 40 cm water level behind the gate



شکل ۴- نمونهای از تصاویر ثبت شده: الف) توسط دوربین ب) سنسورهای التراسونیک Figure 4. Recorded some figures by: Digital Camera (a), Ultrasonic Sensors (b)

٤- نحوه جمع آوری و تئوری آنالیز ذرات رسوبی

برای جمع آوری رسوب حمل شده در اثر جریان های سیلابی ناشی از شکست سد از یک تا چهار تله رسوب گذار، بعد از بستر متحرک استفاده گردید. تلههای مورد استفاده دارای ابعادی به طول هم عرض فلوم (۵/۰ متر) و عرض هرکدام از (پشت سرهم) قرار داده شدند. از مزیتهای مهم تلههای پشت سر هم برآورد نرخ انتقال بار رسوب بستر در طول آزمایش می باشد. به این ترتیب که بعد از پرشدن تله اول و اندازه گیری زمان مربوطه و تکرار مراتب فوق برای تلههای دیگر، میزان انتقال رسوب برآورد گردید. زمان پرشدن مصالح مر تله به صورت جداگانه محاسبه گردید، و همچنین مصالح رسوبی منتقل شده به هر تله جداگانه جمع آوری شده و پس از خشک شدن، توزین گردیدند. برای محاسبه شدت انتقال رسوبات بستر از رابطه (۱) استفاده شد (۱۸).

$$I = \frac{m}{NT} \tag{(1)}$$

که در آن I شدت انتقال رسوب، m تعداد ذرات جابجا شده در طول فاصله زمانی T در سطحی به مساحت A با تعداد ذرات رسوبی موجود در آن سطح از بستر متحرک (N) میباشد. بهعبارت دیگر شدت انتقال رسوب کسری یا نسبتی از همه ذرات در سطح بستر میباشد که در هر ثانیه جابجا میشود. برای محاسبه تعداد ذرات در بستر ستحرک یا N از رابطه (۲) استفاده گردید:

$$N = \frac{Ad(1-a)}{\frac{\Pi d^3}{6}}$$

که در آن d قطر مصالح و a تخلخل بستر می باشد.

نرخ انتقال بار بستر بر حسب کیلوگرم بر متر بر ثانیه توسط رابطه (۳) محاسبه گردید (۲۰):

$$q_s = \frac{G}{T * b} \tag{(Y)}$$

$$\sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{a, b \in \mathcal{L}} \sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{a, b \in \mathcal{L}} \sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{a, b \in \mathcal{L}} \sum_{b \in$$

نمونه برداری و b عرض فلوم می باشد. استار استار استار از ۲۰

برای محاسبه بار بستر بی بعد اینشتین نیز از رابطه (۴) استفاده شد (۲):

$$V = C_{\sqrt{R_H(S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}}}$$
(*)

که در آن ho_s چگالی مصالح بستر، g شتاب ثقل، ${
m S}=
ho_s$ / ho

٥- مبانی هیدرولیکی جریان ناشی از شکست سد

معادلات حاکم بر مساله شکست سد را معادلات پیوستگی و دینامیکی در جریانهای متغیر غیردائمی تشکیل میدهند که میتوان تحت عنوان معادلات سن ونانت ارائه نمود (۱۷). این معادلات به صورت روابط ۵ تا ۸ ارائه شده است.

با در نظر گرفتن Q=A*V که در آن Q دبی جریان، V سرعت متوسط جریان و A مساحت تر شده بهعنوان متغیرهای وابسته و x فاصله و t زمان را بهعنوان متغیرهای مستقل میباشند میتوان رابطه (۵) را نوشت (۱۷):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{(a)}$$

با مفروض داشتن توزیع فشار هیدرواستاتیکی، توزیع یکنواخت سرعت در مقطع و با صرف نظر کردن از مولفه قائم شتاب ذرات سیال، معادله اندازه حرکت به شرح رابطه (۶) می باشد:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = S_0 - S_f \tag{8}$$

که در آن S_0 شیب بستر و S_f شیب خط انرژی می باشند. در نهایت سرعت و دبی در یک جریان غیردائمی به صورت روابط (۲ و ۸) قابل تعریف است (۱۵):

$$V = C \sqrt{R_H (S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}}$$
(Y)

که در آن C ضریب شزی، $\frac{\partial h}{\partial x}$ شیب سطح آزاد جریان آب، که در آن C ضریب شزی، $\frac{\partial V}{\partial x}$ شیب سرعت نسبت به $\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}$ شیب سرعت ناشی از تغییر سرعت مسیر جریان x، $\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$ شیب سرعت ناشی از تغییر سرعت نسبت به زمان t میباشد.

$$Q = A^*V = A^*C \sqrt{R_H(S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}}$$
(A)

نتايج و بحث

در این تحقیق دادههای مربوط به مشخصات جریان شامل سرعت سطحی و عمق جریان توسط سطح سنج التراسونیک و رسوب بهوسیله تله گذاری و تصویربرداری جمع آوری گردید، که تاثیر شکست سد بر روی حمل رسوب را آشکار مینماید. در این تحقیق مصالح مورد استفاده با قطر متوسط ۱۰/۳۵ ملیمتری با شیب ۱۰/۰ و ارتفاعهای آب ۱۲ و ۴۰ سانتیمتر امیلی مالح ۱۴ میلیمتری، تحت شیبهای ۱۰/۰ و ۲۰/۰ و با ارتفاعهای ۱۲، ۲۰ و ۴۰ سانتیمتری آب پشت دریچه انجام گردید که نتایج آزمایشها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مقایسه نرخهای حمل رسوب ناشی از شکست سد

Table 2. Comparison between sediment transport rate resulting from dam-break										
سرعت متوسط (متر بر ثانيه)	بار بستر انشتين	تعداد ذرات در بستر متحرک	تعداد ذرات متحرک (تعداد)	نرخ انتقال رسوب (کیلوگرم بر ثانیه در متر)	وزن خشک ذرات جمع آوری شدہ (گرم)	مدت نمونه گیری (ثانیه)	آب پشت دریچه (سانتیمتر)	شيب	قطر مصالح (میلیمتر)	رديف
	٠/٣٩۵	١٨٨٧٨	2080	۳/۶۱۵	3618	٢				١
۲/۳۵	•/•۴۹۵	51016	2481	۰/۴۵۳	42.1	۲.	۳۵			۲
	٠/٠٠٩١	18181	877	٠/٠٨٣	١٠٩٠	78		٠/٠١	۱.	٣
١/٣	•/•۴۵١	ነ۳۴ለ۴	1018	۰/۴۱۳	۲۴۷۸	١٢	١٢			۴
	•/••۴۴	51016	۱۹۶۵	•/•۴•٩	246.	١٢٨				۵
٢	•/•۴۴٧	2114	1.17	1/17	۵۰۶۰/۶	٩	۳۵			۶
	•/•••٣٨	AIV14	۵۳	•/••YA	788/4	۶٨				٧
۰/۰۰ ۱/۶۶	۰/۰۳۱۵	۵۴۴۹	۵۸۴	•/٩	۲۹۲۳	۱.	۲.	۰/۰۱		٨
	•/•••٣١	۵۴۴۹	۳۱	۰/۰۰۴۵	۱۵۴	۶٨				٩
۱/۲۵	•/• ١۴٣	۵۴۴۹	411	٠/۴١	۲۳۵۶	11	١٢			۱.
	•/••• ١٧۴	۵۴۴۹	۲۵	۰/۰۰۳۵	174	۶۹				11
	۰/۱۵۳	13822	1788	۴/۲	8310	٣				١٢
	•/•٣٧	13822	۱۱۱۵	•/۵۵Y	۵۵۷۶	۲.	۳۵			۱۳
۲/۳	•/•778	13875	١٢۵٢	•/۴۶۵	۶۲۸۵	۲۷				۱۵
	۰/۰ ١۶۱	13875	1118	•/٣٣٢	۵۸۲۴	۳۵				۱۵
	۰/۰۱۶	13875	777	•/٣٣•	3783	۲۲			۱۵	١۶
١/٧۵	۰/۰۵۸	13875	1818	1/87	۶۵۶۵	٨				١٧
	۰/۰۱۸	13875	1184	•/٣٧	۵۸۳۶	۳۱				۱۸
	٠/٠ ١۵٩	13873	1744	•/٣٢	577.	۳۸	۲.	۰/۰۲		۱۹
	٠/٠١٧	13873	۱۲۰۸	۰/۳۵	۶۰۴۰	٣۴				۲.
	•/• \•	13873	9.57	•/٢	4712	45				71
١/٣٣	•/•۴٨	13875	١٢٩٣	•/૧૧۴	۶۴۶۵))				77
	•/•٣١	13873	177.	١/١۶	۶۱۰۰	۳۷				۲۳
	•/•٣٣٩	13873	١٢۵٩	•/۶٩٩	۶۲۹۵	۱۸	١٢			74
	•/•٣٨	13873	١٠٩٠	•/۵YY	۵۴۸۵	۱۹				۲۵
	۰/۰۱۵	13873	۶۹۰	•/٣١٣	۳۴۵۰	۲۲				78

در شکل ۵ عمق آب پشت دریچه در برابر بار بستر اینشتین، برای مصالح با قطر ۱۰/۳۵ میلیمتر با شیب ۰/۰۱ و با ۲ ارتفاع متفاوت آب پشت دریچه ۱۲ و ۴۰ سانتیمتر نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ مشخص است که، در

شیب ۰/۰۱، با ۳/۳۳ برابرکردن (۴۰ نسبت به ۱۲ سانتیمتر) ارتفاع آب پشت دریچه، نرخ بار بستر اینشتین ۸/۷۵ برابرشده است که با نتایج کیان و همکاران (۱۸) دارای همخوانی میباشد.



شکل ۵- بار بستر اینشتین بهعنوان تابعی از ارتفاع آب پشت دریچه Figure 5. Ernestine bed load parameter as a function of water level behind the gate

برای حالت اول که عمق آب پشت دریچه ۱۲ سانتیمتر بوده است، نرخ انتقال رسوب در مدت ۱۲ ثانیه اول برای جبهه موج مثبت ناشی از شکست سد، معادل ۴۱۳/۰کیلوگرم بر ثانیه بر متر و با ادامهیافتن جریان نرخ انتقال رسوب برابر با ۰/۰۴۰۹ کیلوگرم بر ثانیه بر متر شده است (جدول ۲). تغییرات مورفولوژی بستر در این حالت فقط محدود به ۲۵ متر ابتدای دریچه بوده و در بقیه طول بستر تغییر خاصی مشاهده نشد.

نتایج نشان داد در حالت دوم که ارتفاع آب پشت دریچه ۴۰ سانتیمتر بوده است، برای جبهه موج مثبت ناشی از شکست سد، مقدار نرخ انتقال رسوب در ۲ ثانیه اول برابر با ۳/۶ کیلوگرم بر ثانیه بر متر بوده و با ادامهیافتن جریان بهمدت زمانهای ۲۰ و ۲۶ ثانیه، مقادیر نرخ انتقال رسوب بهترتیب برابر با ۴۵/۰ و ۲۰/۰۰ کیلوگرم بر متر بر ثانیه شده است (جدول ۲)، که دلالت بر کاهش نرخ انتقال رسوب با زمان دارد. نرخ حمل رسوب ناشی از پیشانی موج بهترتیب، ۸

برابر و ۴۵ برابر زمانهای بعدی سپریشده میباشد، پس عمده انرژی و حمل رسوب، مربوط به پیشانی موج میباشد. سرعت پیشانی موج مثبت در محل دریچه برای حالتی که آب پشت دریچه ۴۰ سانتیمتر بوده است، ۲/۸ متر در ثانیه و سرعت متوسط موج در طول ۵ متر بستر مورد مطالعه برابر با در ۲/۳۵ متر بر ثانیه میباشد. مرفولوژی بستر در مدل فیزیکی نشان داد که برای حالتی که آب پشت دریچه ۴۰ سانتیمتر باشد، در محل شکست سد، تخریب و آبشستگی بسیار شدید ست، به طوری که تا ۲/۸ متر بعد از دریچه باعث شستهشدن شدید بستر گردید. مرفولوژی بستر نیز در این حالت دچار تغییرات شدیدی گردید، به طوری که ۴ گودال در بستر ایجاد شد و بعد از هر گودال، یک برآمدگی نیز در اثر شدت حمل رسوبات کندهشده از داخل گودال، ایجاد گردید، یعنی بستر به صورت یک موج سینوسی در آمد (شکل ۶ الف و ب).



شکل ۶– تغییرات ریختشناسی بستر بعد از آزمایش: الف) در راستای عرضی فلوم و ب) در راستای طولی فلوم Figure 6. Bed evolution after each experiment: a. at transverse direction and b. longitudinal direction of the Flume

با افزایش آب پشت دریچه مقدار سرعت متوسط موج بهطور خطی بیشتر شده است، به طوری که برای شیب ۰/۰۱، با افزایش ارتفاع آب پشت دریچه از ۱۲ به ۴۰ سانتیمتر،



شکل ۷- سرعت متوسط موج سیلاب به عنوان تابعی از ارتفاع آب بالادست دریچه، برای مصالح ۱۰/۳۵ میلی متری Figure 7. Average celerity of wave as a function of water level (for particle size of 10.35 mm)

آب پشت دریچه، نرخ بار بستر اینشتین بهترتیب ۲/۵ و ۱/۵۳ برابر و برای شیب ۰/۰۲ مقادیر فوق بهترتیب ۱/۲ و ۲/۸۸ برابر شده است (شکل ۸).

سرعت متوسط موج از ۱/۲۵ به ۲/۳۵ متر بر ثانیه (۱/۸۸

برابر) رسیده است (شکل ۷).

برای مصالح با قطر ۱۴ میلیمتر، دو شیب ۰/۰۱ و ۰/۰۲ با سه ارتفاع متفاوت آب پشت دریچه ۱۲، ۲۰ و ۴۰ سانتیمتر اجرا گردید. با شیب ثابت ۰/۰۱، با ۱/۶۶ برابر (۲۰ نسبت به ۱۲ سانتیمتر) و ۲ برابرشدن (۴۰ نسبت به ۲۰ سانتیمتر) ارتفاع



شكل ۸– بار بستر اينشتين به عنوان تابعی از ارتفاع آب بالادست دريچه برای مصالح ۱۴ ميلی متری Figure 8. Ernestine bed load parameter as a function of water level behind the gate for particle size of 14 mm

سانتی متر، با ۲ برابر شدن شیب، بار بستر اینشتین به ترتیب ۱/۵ و ۲/۸ برابر شده است (شکل ۹).

١٢٨

با ارتفاع ثابت ۱۲ سانتی متری آب پشت دریچه، با افزایش شیب از ۰/۰۱ به ۰/۰۲ (۲ برابر شدن شیب) بار بستر اینشتین ۳/۱ برابر شده است. برای ارتفاعهای ثابت ۲۰ و ۴۰

در شکل ۱۰ نرخ تغییرات سرعت متوسط موج مثبت

جریان در برابر ارتفاع آب پشت دریچه نشان داده شده است.

همانطور که مشخص است با افزایش ارتفاع آب پشت دریچه

مقدار سرعت متوسط موج مثبت نیز بیشتر شده است. با شیب



شکل ۹- بار بستر اینشتین به عنوان تابعی از شیب بستر، برای مصالح یکنواخت ۱۴ میلی متری Figure 9. Ernestine bed load parameter as a function of bed slope for particle size of 14 mm

مثبت برای هر دو حالت ۱/۳ برابر شده است، برای شیب ۲۰/۰۲ نیز بهترتیب ۱/۳ و ۱/۵ برابر شده است. با ارتفاع آب ثابت ۴۰ سانتیمتر، با افزایش شیب از ۲۰/۰۱ به ۲۰/۰ (۲ برابرشدن شیب)، مقدار سرعت متوسط موج ۱/۱۸ برابر و نرخ انتقال رسوب بار بستر اینشتین ۲/۸ برابر شده است.



شکل ۱۰– سرعت متوسط موج سیلاب به عنوان تابعی از ارتفاع آب بالادست دریچه، برای مصالح ۱۴ میلی متری Figure 10. Average celerity of wave as a function of water level behind the gate for particle size of 14 mm

در شیب ۰/۰۲، برای حالتی که ارتفاع آب پشت دریچه ۴۰ شدید است بهطوری که تا ۱/۸ متری بعد از دریچه باعث سانتیمتر باشد، در حوالی محل شکست سد، تخریب بسیار شسته شدن شدید بستر گردید و همچنین در شیب ۰/۰۲

با شیب ثابت ۰/۰۱ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، هرچه مصالح دارای قطر بیشتری باشند نرخ انتقال آنها کاهش مییابد، بهطوری که شیب نمودار مربوط به مصالح ۱۴ میلیمتری دارای کمترین شیب میباشد. نسبت به شیب ۰/۰۱، گودالهای تشکیلشده در بستر از شکل دایره به بیضی تمایل دارند. **تاثیر قطر مصالح بستر بر حمل رسوب** در شکل ۱۱ تغییرات بار بستر اینشتین در برابر ارتفاع آب پشت دریچه برای مصالح یکنواخت ۱۰/۳۵ و ۱۴ میلی متری

با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که با ۱/۳۵ برابرشدن

قطر ذرات مورد استفاده در شرایط تقریبا یکسان پتانسیل اولیه

دینامیکی جریان آب (ارتفاع آب ۴۰ سانتیمتر و شیب ثابت



شکل ۱۱– بار بستر اینشتین به عنوان تابعی از ارتفاع آب پشت دریچه برای مصالح با قطر متفاوت Figure 11. Ernestine bed load parameter as a function of water level behind the gate for different particle size

۰/۰۱)، میزان پارامتر بی بعد بار بستر اینشتین ۰/۱۳ برابرشده است. که برای ارتفاع آب ۱۲ سانتی متری نیز، بار بستر اینشتین ۰/۱۸ برابر شده است.



شکل ۱۲- بار بستر اینشتین به عنوان تابعی از مصالح با قطرهای ۱۰/۳۵ و ۱۴ میلی متر Figure 12. Ernestine bed load parameter as a function of different particle grain size of 10.35 and 14 mm

اهمیت مشخصات فیزیکی اندازه گیری شده ذرات رسوبی (شامل قطر و چگالی) مورد استفاده، در اندرکنش با شرایط دینامیکی جریان آب را میتوان در ارتباط با پارامتر بی بعد بار بستر اینشتین (مطابق شکل ۱۳) ارائه نمود. از طرف دیگر،

پارامتر بیبعد بار بستر اینشتین را میتوان جهت نمایش نسبت میزان ذرات جابجاشده (با اندازه قطر معین) به دیگر ذرات هم اندازه حرکت نداشته در بستر نیز استفاده نمود.



شکل ۱۳– مقایسه پارامتر بی بعد بار بستر اینشتین نسبت به مصالح با قطرهای متفاوت و همچنین سرعتهای متفاوت جریان ناشی از شکست سد Figure 13. Comparisons between Einstein bed load parameters for different bed materials and flows resulting from

dam-break

با توجه به مقایسه مقادیر بهدست آمده برای بار بستر اینشتین در شکل ۱۳، بیشترین مقدار بار بستر اینشتین مربوط به ارتفاع آب ۴۰ سانتیمتری در پشت دریچه بهترتیب برای مصالح با قطر ۱۰/۳۵ میلیمتری، با شیب ۱۰/۰ و برای مصالح با قطر ۱۴ میلیمتری در شیب ۱۰/۲ میلمتری با شیب مقدار نیز متعلق به مصالح با قطر ذرات ۱۴ میلیمتری با شیب ۱۰/۰ و ارتفاع آب ۱۲ سانتیمتری پشت دریچه می باشد.

در این پژوهش که در مجموع ۸ آزمایش اجرا گردید، به بررسی تاثیر جریانهای سیلابی ناشی از شکست سد بر نرخ انتقال رسوب مصالح با قطرهای ۱۰/۳۵ میلیمتر تحت شیب ۰/۰۱ و مصالح ۱۴ میلی متر، تحت دو شیب ۰/۰۱ و ۰/۰۲ با ارتفاعهای ۱۲، ۲۰ و ۴۰ سانتیمتر عمق آب پشت دریچه پرداخته شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که بیشترین نرخ حمل بار بستر و همچنین تغییرات مرفولوژی بستر مربوط به زبانه موج مثبت جریان ناشی از شکست سد بوده و با گذر زبانه موج، نرخ حمل بار بستر بهشدت کاهش می یابد، که ناشی از انرژی بسیار زیاد زبانه موج میباشد. همچنین اًبشستگی بستر و نهشتهشدن رسوبات در پایین دست، با افزایش ارتفاع آب پشت دریچه بیشتر شده است که ناشی از بیشتربودن انرژی پتاسیل موج با افزایش ارتفاع آب پشت دریچه میباشد. همچنین میتوان بیان داشت که با افزایش ارتفاع آب پشت دریچه مقدار سرعت موج ناشی از شکست سد تقريبا بهصورت خطی افزايش می يابد. نتايج حاکی از أن است که با افزایش قطر مصالح بستر نرخ بار بستر بهشدت

کاهش مییابد. در انتهای هر آزمایش آبشستگی شدید بستر همراه با گودالهای بزرگ در نزدیک دریچه مشاهده شد، که با فاصله گرفتن از دریچه مقدار محیط گودال و همچنین عمق آن کاهش مییابد. با افزایش شیب، محیط گودالها بزرگترشده و از شکل دایره به سمت بیضی تمایل دارند که ناشی از زاویه برخورد زبانه موج با بستر میباشد. یافتههای این تحقیق برای بهبود درک فرآیندهای انتقال رسوب در جریانهای متفاوت که موضوع دامنه وسیعی از شرایط جریان غیردائمی بوده، مفید و ضروری میباشد. برای جریانهای شدید ناشی از شکست سد اطلاعات زیادی از مقیاس زمانی مکانیزمهای ورود رسوب به جریان در مقایسه با مقیاس زمان مورد نیاز برای به تعادل رسیدن انتقال رسوب وجود ندارد و لذا نمی توان رابطه خاصی بین میزان رسوب موجود در جریان و ظرفیت حمل رسوب ارائه کرد.

تشكر و قدرداني

بدینوسیله از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری کشور جهت تامین مالی تحقیق حاضر، همچنین دانشگاه گیلان در خصوص همکاری با نویسندگان جهت انجام تحقیقات در آزمایشگاه هیدرولیک و همچنین از مسوولین محترم آزمایشگاه جناب آقایان مهندس نادر ایزدپناه و مهندس حسین جهانگیری کمال تشکر را داریم.

منابع

- 1. Abderrrezzak, K.E.K., A. Paquier and B. Gay. 2008. One dimensional numerical modeling of dam break waves over movable beds: application to experimental and field cases. Environmental fluid mechanics, 8(2): 168-198.
- 2. Baharestani, A. and M. Banihashemi. 2010. Modeling of water and sediment transport in dam break using finite element. Journal of Civil Engineering, 44: 12-25.
- 3. Caleffi, V. and A. Valiani. 2002. A mathematical model for dam-Break over movable bed. IAHR proceeding of the international conference on Fluvial Hydraulic, Louvianla Neuve, Belgium, 981-990.
- 4. Cohen, H. and J.B. Laronne. 2005. High rates of sediment transport by flashfloods in the southern Judean desert, Israel. Hydrological Process, 19(8): 1687-1702.
- 5. Einstein, H.A. 1942. Formulas for the transportation of bed load, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 107: 561-597.
- 6. Garcia-Navarro, P. and J.M. Saviron. 1986. Numerical solution of the St. Venant equations with Mac Cormaack finite difference scheme. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 6: 259-274.
- Gesteira M.G., B.D. Rogers, R.A. Dalrymple and J.C. Cerespo. 2010. State-of-the-art of classical SPH for free surface flows. Journal of Hydraulic Research, 48(1): 6-27.
- 8. Guinot, V. 2003. Godunov-type schemes: an introduction for engineers. First edition, Elsevier press, 469 pp.
- 9. Hadadian, S., M. Montazeri Namin, F. Bahman Pour and N. Eshaghi. 2014. Impact of bed slope in dam break on mobile bed. National Conferences in Civil Engineering, Tabriz, Iran (In Persian).
- 10. Hassanzadeh, Y. 1997. Rapidly varied unsteady flow in a small-scale dry bed model, International Journal of Engineering, 10(1): 1-10.
- 11. Honoré, R.H. 1945.Un aspect de la guère modern les brisures de barrage, La Houille Blanche.
- Joao, G.A.B., R.M.L. Leal, A.H. Ferreira and A. Cardoso. 2002. Dam-break waves on movable bed. Journal of Hydraulic Engineering, 135(11): 115-128.
- 13. Komasi, M., A. kahzadi and A. Hoseini. 2015. Hydraulic simulation of Dez dam break using MIKE. Journal of Hydraulic, 10(3): 63-69 (In Persian).
- La Rocque, L., J. Imran and M. Chaudhry. 2013. Experimental and numerical investigations of twodimensional dam-break flows. Journal of Hydraulic Engineering, 139(6): 569-579.
- 15. Leal, J., R. Ferreira, A. Cadoso and A.B. Almeida. 2003. Comparison between numerical and experimental results on dam break wave over dry mobile beds. 3th IMPACT Workshop, At Lovain-la-Neuve.
- 16. Mc-Cuen, R.H. 2011. Hydrologic analysis and design. Prentic-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 815 pp.
- 17. Mohammad Nejad, B., M.E. Fatemi Kia, J. Behmanesh and M. Montaseri. 2013. 2-D vertical numerical simulation of dam break wave. Journal of Civil and Environmental Engineering, 44(3): 76-90.
- 18. Qian, H., Zh. Cao, H. Liu and G. Pender. 2017. New experimental dataset for partial dam-break floods over mobile beds. Journal of Hydraulic Research, http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2017.1289264.
- 19. Ressler, RF.1954. Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave. Proc. of International Association of Hydrological Sciences, 38(3): 319-328.
- 20. Safavi, H. 2010. Engineering hydrology, Third edition, Isfahan university press, 724 pp (In Persian).
- 21. Shvidchenko, A.B and G. Pender. 2000. Flume study of the effect of relative depth on the incipient motion of coarse uniform sediments. Water Resources Research, 36(2): 619-628.
- Wang, L., J. Alan, S. Cuthbertson, G. Pender and Zh. Cao. 2015. Experimental investigations of graded sediment transport under unsteady flow hydrographs. International Journal of Sediment Research, 30(4): 306-320.
- 23. Yalin, M.S. 1972. Mechanics of Sediment Transport, Pergamon, Tarry town, NY press, 450 pp.
- 24. Zech, Y., S. Soares-Frazão, B. Spinewine and N. Le Grelle. 2008. Dam-break induced sediment movement: Experimental approaches and numerical modelling. Journal of Hydraulic Research, 46(2): 310-327.
- 25. Zhang, H., Y. Hassanzadeh, D.L. Nguyen and K. René. 1992. A 1-D numerical model applied to dam break flows on dry beds. Journal of Hydraulic Research, 30(2): 211-224.

DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.5.0

Experimental Investigation of Flash Flood Resulting from Dam-Break on Bed Sediment Transport

Khabat Khosravi¹, Mahmood Habibnejad Roshan², Kaka Shahedi³, Amir Hoshang Nezamivand Chegini⁴ and Kamran Chapi⁵

 Ph.D. Student of Watershed Management, Faculty of natural resources, Sari agricultural science and Natural Resources University, Iran, (Corresponding author: Khabat.khosravi@gmail.com)
 and 3- Professor and Associated Professor, Department of watershed management, Faculty of natural resources, Sari agricultural science and Natural Resources University, Iran
 4- Assistant Professor, department of civil engineering, Guilan University. Iran
 5- Assistant Professor, department of watershed management, faculty of natural resources, University of Kurdistan, Iran
 Received: April 11, 2017

Abstract

Varied flows such as flooding resulting from dam break can happen due to earthquakes, seepage, bombing, overtopping, mistake in design and project performance as well as causing financial damages and human losses. Unsteady flow during flooding events has a high impact on flow field pattern, sediment motion, ecology and also, distribution of contamination in the river. In this study, the impact of various slopes, sediment diameters and unsteady flows with different discharges on sediment transport were carried out at the flume with 12 m length, 0.5 m width and height. In this research, two type of uniform sediment particle with 10 and 15 mm in diameter were spread over the bed of above mentioned flume with slope of 0.01 and 0.02. To build a dam physical model, a mechanical lift-gate was used at 2 m from the upstream inlet of the flume. Potential hydrostatic initial conditions of the fluvial experimental model resulted from dam-break was based on using three water depths of 35, 20 and 12 cm at the gate upstream and one water depth of 3cm at the downstream of the gate. By considering the above mentioned procedures, fluvial flows were produced and have been used with discharge between 0.07 to 0.66 m^{3} . The result showed that by increasing the sediment particle size 1.35 times the sediment transport have been reduced by 1/4 for 35 cm upstream water depth and also by increasing the slope by 2 times from 0.01 to 0.023 for sediment with 15 mm and with initial upstream water depth condition was 35, 20 and 12 cm the sediment transport have been increased 3.42, 1.83 and 3.38 times respectively. The above mentioned points show the significance of fluvial flows and their effects on sediment transport and therefore the morphological changes of rivers. Result has been shown that high sediment transport rate and bed evolution was resulting from positive wave head and after that, sediment transport rate have been intensity decreased.

Keywords: Bed load, Dam break, Experimental investigation, Unsteady flow