

مدل سازی تجربی تأثیر شرایط غیردائمی جریان بر رفتار بستر فرسایش پذیر

اشکان آل بویه^{۱*}، کاظم اسماعیلی^۲ و سعیدرضا خدائشناس^۳

چکیده

رگبارهای ناگهانی و وقایعی همچون شکست سد، احتمال وقوع سیلاب‌های سریع را که دارای زمان پایه به نسبت کوتاه و دبی اوج بالایی هستند را به دنبال دارد. در این پژوهش آزمایشگاهی با شبیه‌سازی جریان بر بستر رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک اثر سیلاب‌های سریع بر فرسایش‌پذیری بستر بررسی شد. در این راستا مجموعه هیدروگراف‌های مختلف مثلثی شکل با دبی اوج در بازه ۲۰ تا ۵۵ لیتر بر ثانیه بر متر و سه زمان پایه ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه روی بستر قابل فرسایش و با دانه‌بندی دارای قطر متوسط ۲/۵ میلی‌متر آزمایش شد. نتایج نشان داد وجود جریان پایه و رخداد هیدروگراف جریان، فرسایش بستر رسوبی را افزایش می‌دهد. برای هیدروگراف‌های دارای دبی اوج یکسان، هنگامی که زمان پایه هیدروگراف آن‌ها ۱/۵ و ۲ برابر شود، مقدار کل رسوب فرسایش یافته، به ترتیب ۴۵ و ۹۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین تغییر تراز بستر رسوبی نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش در ابتدای آن صورت می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: جریان غیرماندگار، سیلاب سریع، بستر زنده، جریان پایه.

ارجاع: آل بویه ا. اسماعیلی ک. و خدائشناس س. ر. ۱۳۹۵. مدل‌سازی تجربی تأثیر شرایط غیردائمی جریان بر رفتار بستر فرسایش‌پذیر. مجله پژوهش آب ایران. ۲۱: ۱۴۳-۱۵۲.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: a.alebouveh15@gmail.com

مقدمه

مهار و کنترل آب‌های سطحی کشور و استفاده بهینه از آن مستلزم شناخت آن‌ها از نظر کمی و توزیع زمانی و مکانی آن‌ها است. در همین راستا آگاهی از میزان مواد رسوبی که با جریان حمل یا ترسیب می‌شود نیز جزء اطلاعات لازم و اولیه برای اجرای هر پروژه آبی است. گاهی بارش ناگهانی باران در مناطق خشک و نیمه‌خشک و یا پدیده‌هایی همچون شکست سد، سبب وقوع سیل‌های ناگهانی می‌شود. این نوع سیل‌ها دارای زمان پایه کوتاه و نقطه اوج بالا هستند. به عبارت دیگر سیلاب‌های سریع (آنی)، بعد از بارندگی‌های زیاد به وقوع می‌پیوندد و به صورت طغیان از داخل و کناره‌های رودخانه جریان یافته و تمام موانع موجود در مسیر را یکجا شسته و تخریب می‌کند. وقوع چنین پدیده‌های مخربی ممکن است چندین بار در سال رخ دهد. سیلاب‌های ناگهانی نمونه‌ای بارز از سیلاب‌هایی هستند که نیاز به بیشترین توجه و رسیدگی دارند (به نقل از مه‌اب‌قدس، ۱۳۸۱). به دلیل وقوع جریان زیاد یا رواناب در حوضه آبریز رودخانه‌ها، فرسایش‌های عظیمی در سطح حوضه رخ دهد و مشکلات زیادی را در پایین‌دست به وجود می‌آورد که بخشی از آن ناشی از ته‌نشینی و انباشته شدن رسوب است (قدسیان، ۱۳۷۷).

تاکنون بررسی‌ها و پژوهش‌ها وسیعی در زمینه انتقال رسوب انجام شده است. بسیاری از پژوهشگران از جمله ارمنیا و فراکارلو (۱۹۹۹)، والیانا و کائفی (۲۰۰۲)، متئو و همکاران (۲۰۰۷) و بمبار و همکاران (۲۰۱۱)، مدل‌های ریاضی انتقال رسوب بار بستر تحت تأثیر جریان غیرماندگار را ارائه دادند (به نقل از بمبار و همکاران، ۲۰۱۱). بسیاری نیز به انجام بررسی‌های آزمایشگاهی و صحرایی در زمینه جریان ماندگار و غیرماندگار و تأثیر آن در فرسایش بستر رسوبی پرداختند. رید و همکاران (۱۹۸۵) الگوی بار کف را نسبت به هیدروگراف جریان برای یازده سیل درآبراهه لندن بررسی کردند. آن‌ها توضیح دادند که مقدار زیادی از رسوبات بار کف، درشاخه صعودی هیدروگراف ایجاد شده است. گرف و سوزکا (۱۹۸۵) رابطه انتقال رسوب را تحت وضعیت جریان غیرماندگار و جریان ماندگار، دریک کانال مستقیم، بررسی کردند. آن‌ها شاخصی به عنوان پارامتر غیرماندگاری جریان تعریف کردند. همچنین نتیجه گرفتند که حجم

رسوبات به دست آمده در حالت غیرماندگار همواره بیشتر از مقدار آن در حالت ماندگار است. کوهنل (۱۹۹۲) روی دو رودخانه ماسه‌ای در ایالات متحده آمریکا پژوهش کرد. او متوجه شد که جریان بار کف در طول شاخه صعودی هیدروگراف در مقابل شاخه نزولی آن، در وضعیت جریان‌های شدید، بیشتر است.

وانگ و پلیت (۱۹۹۴) یک تأخیر زمانی بین وقوع دبی اوج هیدروگراف جریان و دبی اوج هیدروگراف انتقال رسوب مشاهده کردند و آن را تأخیر اینرسی کف نامیدند. لین و همکاران (۱۹۹۷) پژوهش‌هایی را در مورد ارتباط هیدروگراف ورودی و خروجی جریان در رودخانه‌های فصلی انجام دادند. سونگ و گرف (۱۹۹۷) بیان داشتند که شدت تلاطم در شاخه صعودی هیدروگراف، به طور معمول بزرگ‌تر از شاخه نزولی آن است و این نسبت با افزایش غیرماندگاری هیدروگراف کمی بیشتر می‌شود. آن‌ها بیان داشتند که افزایش شدت تلاطم در شاخه صعودی هیدروگراف ممکن است به دلیل پیشی گرفتن موج سیلاب از جریان پایه باشد. یانگ و کارپات (۱۹۹۸) بررسی‌های آزمایشگاهی خود را در مورد موج انتقال یافته ناشی از شکست سد، روی بسترهای قابل حرکت بررسی و مشاهده کردند که شدت آب‌شستگی کف در ابتدای مجرا بیشتر است. لیل و همکاران (۲۰۰۳) در مورد اثر موج حاصل از شکست یک سد که به صورت پدیده‌ای غیرماندگار عمل می‌کند بر تغییرات ایجاد شده روی یک بستر قابل حرکت (مواد شنی و مواد سبک متخلخل) آزمایش‌هایی را انجام دادند. اسپین‌وین (۲۰۰۳) تأثیر جریان ناشی از شکست یک سد را روی بستر قابل حرکت و تخت بررسی کرد و نتیجه گرفت که یک جبهه قوی پیشروی در ابتدای شکست سد وجود دارد که می‌تواند فرسایش قابل ملاحظه‌ای را در بستر ایجاد کند.

نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی لی و همکاران (۲۰۰۴) در مورد روند انتقال رسوب کف در شرایط جریان غیرماندگار نشان می‌دهد بین دبی حداکثر هیدروگراف و حداکثر هیدروگراف رسوب تأخیری وجود دارد که ناشی از تأثیر اندازه قطر ذرات است. این میزان تأخیر حدود ۶ تا ۱۵ درصد از دوره هیدروگراف جریان را تشکیل می‌دهد. اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۵) آزمایش‌هایی را روی رسوب بار کف تحت جریان غیرماندگار انجام دادند. نتایج نشان داد که زمان پایه هیدروگراف نقش مؤثری بر میزان رسوب

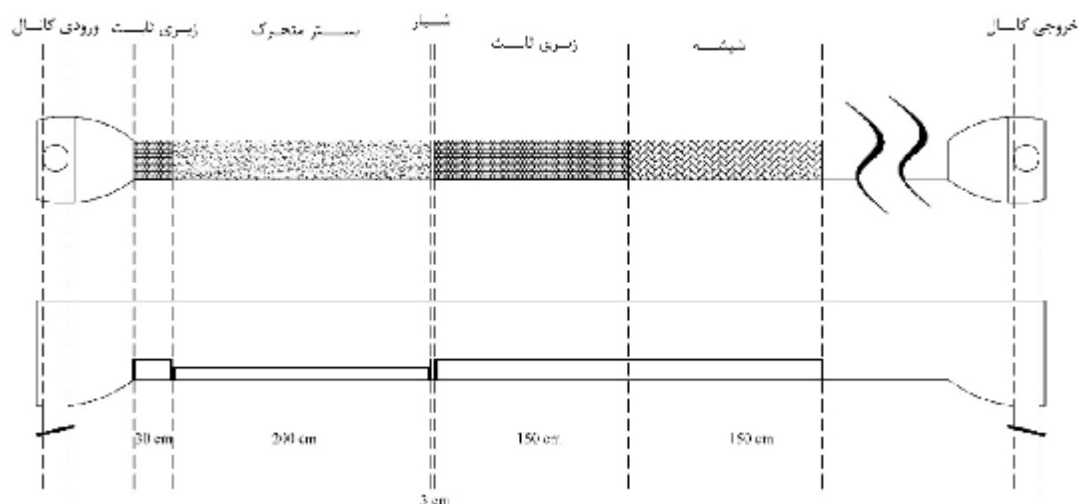
۵۰ سانتی‌متر انجام شد. شیب کانال در طول آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰/۰۵ تنظیم شد. ذرات رسوبی مورد استفاده به عنوان رسوبات بستر، از جنس ماسه رودخانه‌ای و با قطر متوسط ۲/۵ میلی‌متر و ضریب یکنواختی و ضریب دانه بندی به ترتیب برابر با ۱/۲۲ و ۰/۹ تهیه شد. با توجه به هدف پژوهش برای ایجاد شرایط مناسب برای نمونه‌برداری از رسوبات حمل شده با جریان، روشی نوین ابداع شد. این روش نمونه‌برداری از رسوبات بار بستر، با وسایل و امکانات ساده‌ای ایجاد شد که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود. برای انجام آزمایش‌ها لازم است تا تغییراتی در شکل کانال آزمایشگاهی ایجاد شود که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این حال کف کانال به اندازه ۱۵ سانتی‌متر بالا آورده شد. در طول کانال چهار قسمت مشخص در کف مشاهده می‌شود. 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 ۶ سانتی‌متر ارتفاع و هم عرض با کانال است. قسمت سوم، محل خروج (نمونه‌برداری) رسوبات کف منتقل شده بوده و بالاخره قسمت چهارم نیز بستری است که ۱/۵ متر ابتدایی آن از رسوبات ثابت پوشیده شده و ادامه آن از جنس شیشه است.

انتقالی دارد و با افزایش زمان پایه هیدروگراف، دبی متوسط انتقالی کاهش می‌یابد. بمبار و همکاران (۲۰۱۱) مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را بر روی بار کف 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، تأخیر زمانی متوسط به اندازه، به ترتیب ۱۱ و ۳۰ ثانیه دارند.

در این پژوهش روشی نوین در اندازه‌گیری و نمونه‌برداری از رسوبات بار بستر در آزمایشگاه و نیز تأثیر سیلاب‌های ناگهانی (هیدروگراف‌های مثلثی شکل) روی بستر قابل فرسایش بررسی شد. تأثیر عواملی همچون زمان پایه هیدروگراف، وجود یا عدم وجود جریان پایه بر میزان انتقال رسوب به پایین‌دست و تغییر فرم بستر رسوبی از دیگر موارد مورد بررسی است.

مواد و روش‌ها

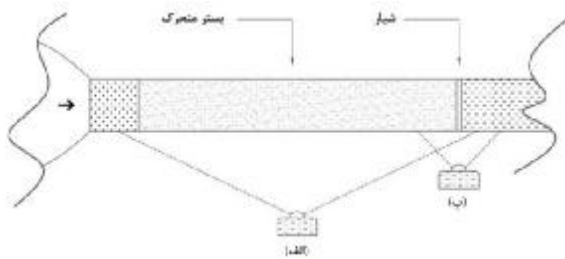
این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد در یک کانال آزمایشگاهی شیب‌پذیر به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۰ و



شکل ۱- شمای ساده از مدل فیزیکی مورد استفاده در این پژوهش

نظر گرفته شد. برای جمع‌آوری رسوبات خارج شده از قسمت شیار، نمونه بردار رسوب که نمای آن در شکل ۲ آمده طراحی و استفاده شد.

مقدار بازشدگی برای ریزش رسوبات و نمونه‌برداری از آن‌ها (شیار) به روش سعی و خطا به دست آمد چنان که با توجه به هیدروگراف‌های ورودی جریان و اندازه دانه‌بندی ذرات رسوبی، این فاصله برابر با ۳ سانتی‌متر در



شکل ۳- محل قرارگیری دوربین های فیلم برداری. (الف) فیلم برداری از شیار. (ب) فیلم برداری از بستر رسوبی

از آنجا که هدف از این پژوهش بررسی اثر شرایط غیردائمی جریان بر انتقال بار کف است لازم است تا رسوبات مورد استفاده تحت تأثیر جریان های مختلف همواره به صورت بار کف حرکت کرده و در شرایط معلق قرار نگیرند. بدین منظور از معیار بگنولد (۱۹۶۶) که بر اساس سرعت برشی جریان و سرعت سقوط ذرات در حالت مستغرق است، استفاده شد (به نقل از اسماعیلی و همکاران ۱۳۸۵). بر اساس معیار بالا، هرگاه نسبت سرعت برشی جریان به سرعت سقوط ذرات کمتر از ۰/۲۵ شود، ذرات به صورت بار کف جابجا می شوند. سرعت برشی جریان و سرعت سقوط ذرات (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷) بر اساس معادلات زیر محاسبه شد:

$$U_* = \sqrt{g \cdot R_h \cdot S} \quad (1)$$

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

در معادلات بالا g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، R_h شعاع هیدرولیکی جریان (متر)، S شیب کف کانال، G_s چگالی 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 به صورت معلق در نمی آیند. مشاهدات چشمی در هنگام انجام آزمایش ها نیز صحت موارد بالا را تصدیق می کند. متغیرهای مؤثر بر انتقال بار بستر تحت تأثیر جریان غیرمادگار به شرح زیر است:

$$f(m_s, Q_p, T_p, T_b, S, \rho, \mu, \omega_s, g, y_{it}, V_{it}) = 0 \quad (3)$$

در معادله بالا، m_s دبی جرمی رسوب منتقل شده به پایین دست تحت تأثیر جریان غیرمادگار در زمان های مختلف (کیلوگرم بر ثانیه)، Q_p دبی اوج هیدروگراف جریان ورودی (لیتر بر ثانیه)، T_p مدت زمان رسیدن



شکل ۲- سیستم ریلی نمونه گیر بار کف

این نمونه گیر متشکل از یک قاب اصلی دارای طول و عرض به ترتیب ۱/۵ و ۰/۲۵ متر و ۲۰ جعبه از جنس توری مقاوم که دارای روزه های ریز است، می باشد. ابعاد تمامی جعبه های توری با یکدیگر برابر بوده و حجم آن ها برابر با ۳×۵×۲۵ سانتی متر است. در هنگام عبور جریان از روی بستر رسوبی، لازم است تا نمونه گیر رسوب با سرعتی هماهنگ با سرعت حرکت جریان و مدت زمانی مشابه با زمان پایه هیدروگراف عبوری از روی بستر، از زیر شکاف عبور داده شود تا عمل نمونه برداری به طور صحیحی انجام شود. بدین منظور از یک موتور الکتریکی که در انتهای کانال نصب شده استفاده شد. با تنظیم سرعت حرکت دورانی این موتور، سرعت حرکت خطی نمونه بردار نیز با سرعت عبور جریان قابل تنظیم گردید. جریان های غیرمادگار با استفاده از وسیله ای الکتریکی به نام کنترل دور^۱ به مدل VFD-M که به طور مستقیم به پمپ کانال متصل شده بود، تولید شدند. این دستگاه با تغییر در فرکانس پمپ و همچنین برنامه های موجود در آن، هیدروگراف های جریان ورودی متفاوت با زمان پایه و دبی اوج مختلف را ایجاد کرد. مشخصات هیدروگراف های جریان ورودی به شرح جدول ۱ است.

به دلیل غیردائمی بودن جریان و برای ثبت اطلاعات برای هر آزمایش از روش فیلم برداری استفاده شد. شکل ۳ محل قرارگیری دوربین ها را نشان می دهد. با مشخص بودن مدت زمان عبور هر شبکه از قسمت شیار (مدت زمان نمونه برداری هر شبکه) و همچنین مقدار رسوب منتقل شده به داخل آن، میزان رسوب تله افتاده یا عبور کرده از بستر در فاصله زمانی عبور شبکه به دست آمد. دومین دوربین در فاصله ای مناسب از بستر رسوبی نصب شد به طوری که تمامی طول بستر را پوشش دهد. تغییرات عمق جریان، تراز بستر رسوبی و گذشت زمان با این دوربین ثبت می شد.

جریان مشاهده می‌شود. روش جدید نمونه‌برداری از رسوبات متحرک کف در آزمایشگاه که اشاره شد مزیت‌هایی دارد که می‌توان به مواردی همچون نمونه‌گیری از رسوبات بار بستر در کانال‌های آزمایشگاه با ابعاد محدود، نمونه‌برداری از رسوبات منتقل شده با جریان بلافاصله بعد از بستر رسوبی، نمونه‌برداری از تمامی ذرات رسوبی منتقل شده با جریان (راندمان ۱۰۰٪) و افزایش تعداد نقاط موجود در منحنی تغییرات دبی رسوب در مقابل زمان، با افزایش سرعت حرکت نمونه‌بردار و همچنین افزایش تعداد شبکه‌های موجود در نمونه‌بردار رسوب و در نتیجه افزایش دقت آزمایش (در آزمایش‌های بالا، مدت زمان نمونه‌برداری هر شبکه از نمونه‌بردار رسوب برای هیدروگراف‌های ورودی مختلف، ۳ تا ۶ ثانیه است) اشاره داشت.

هیدروگراف به نقطه اوج (ثانیه)، T_b زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی (ثانیه)، S شیب بستر رسوبی، ρ جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، μ لزجت دینامیک آب (کیلوگرم ثانیه بر متر)، ω_s سرعت سقوط ذرات رسوب (متر بر ثانیه)، g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، y_{it} تغییرات عمق جریان با زمان (متر) و V_{it} تغییرات سرعت جریان با زمان (متر بر ثانیه) هستند. سه پارامتر ρ ، V_{it} و y_{it} به عنوان متغیرهای اصلی یا تکرار شونده و به ترتیب به عنوان مشخصه سیال، مشخصه جریان و مشخصه هندسی در نظر گرفته شدند. گروه‌های بدون بعد به دست آمده از روش Π باکینگهام و با انجام اعمال جبری، شامل شش گروه بوده و به شرح زیر هستند:

$$f\left(\frac{m_s}{\rho \cdot Q_p}, \frac{T_p}{T_b}, S, \frac{\omega_s}{V_{it}}, \frac{g \cdot V_{it}}{V_{it}^2}, \frac{\mu}{\rho \cdot V_{it} \cdot y_{it}}\right) = 0 \quad (4)$$

همان‌گونه که مشخص است در بین گروه‌های بدون بعد، معکوس عدد رینولدز جریان و معکوس مجذور عدد فرود

جدول ۱- محدوده متغیرهای آزمایشی

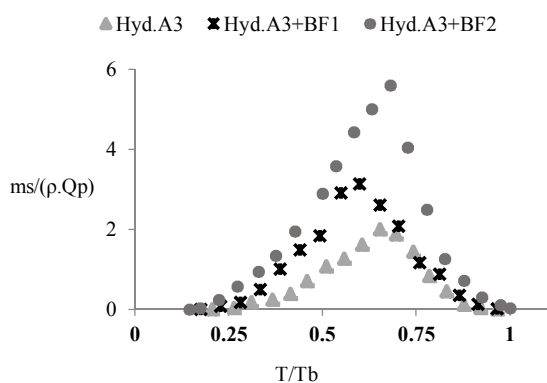
مدت زمان شاخه نزولی (ثانیه)	مدت زمان شاخه صعودی (ثانیه)	زمان پایه (ثانیه)	دبی اوج هیدروگراف (لیتر بر ثانیه بر متر)	هیدروگراف جریان ورودی
۳۰	۳۰	۶۰	۵۴	Hyd.A1
			۴۴/۴۵	Hyd.A2
			۳۳/۹	Hyd.A3
			۲۱/۹	Hyd.A4
۴۵	۴۵	۹۰	۵۴	Hyd.B1
			۴۴/۴۵	Hyd.B2
			۳۳/۹	Hyd.B3
			۲۱/۹	Hyd.B4
۶۰	۶۰	۱۲۰	۵۴	Hyd.C1
			۴۴/۴۵	Hyd.C2
			۳۳/۹	Hyd.C3
			۲۱/۹	Hyd.C4

نتایج و بحث

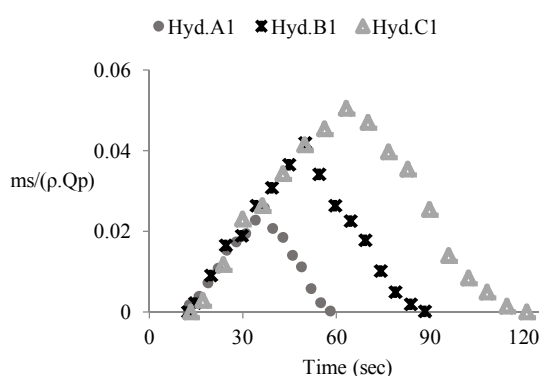
تأثیر جریان پایه در انتقال بار بستر

تأثیر هیدروگراف جریان عبوری از روی بستر در شرایط وجود جریان پایه با نتایج حاصل از هیدروگراف‌های عبوری بدون جریان پایه مقایسه شد. دو جریان یکنواخت با دبی ثابت ۰/۹۵ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه بر متر (به ترتیب BF1 و BF2) به عنوان جریان‌های پایه انتخاب شدند. بار بستر منتقل شده به پایین دست تحت تأثیر هیدروگراف جریان ورودی به همراه دو جریان پایه و بدون آن، برای

بخشی از آزمایش‌ها در شرایط وجود جریان پایه در کانال انجام شد. انتخاب جریان پایه متناسب با قطر ذرات رسوبی مورد استفاده در آزمایش انتخاب شد. به طوری که وجود جریان پایه و عبور آن از روی بستر رسوبی نباید سبب جابجایی و انتقال ذرات شود. فرسایش بستر رسوبی تحت



شکل ۴- روند تغییر عامل بدون بعد رسوب در برابر عامل بدون بعد زمان تحت تأثیر جریان پایه و بدون آن



شکل ۵- روند تغییر عامل بدون بعد رسوب در برابر عامل زمان برای هیدروگراف‌های ورودی با دبی اوج یکسان و زمان پایه متفاوت

جدول ۲- کل رسوب منتقل شده به پایین دست در زمان پایه‌های انتخابی (کیلوگرم بر متر)

هیدروگراف جریان ورودی	بدون جریان پایه	جریان پایه اول (BF1)	جریان پایه دوم (BF2)
Hyd.A3	۲/۳۹۲	۲/۶۷	۳/۸۲۶
Hyd.B3	۲/۸۵۳	۳/۵۰۷	۴/۰۵۵
Hyd.C3	۳/۵۷۵	۴/۰۲۵	۴/۳۸۸
Hyd.A4	۰/۷۷۲	۱/۲۸۴	۲/۲۳۷
Hyd.B4	۱/۳۱۳	۱/۷۳۸	۲/۵۶
Hyd.C4	۱/۹۱۹	۲/۱۵	۲/۸۶۵

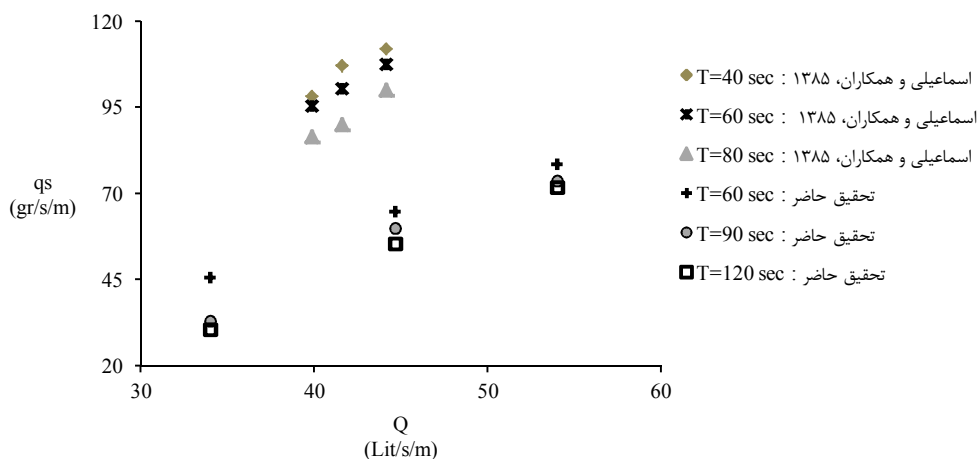
تأثیر زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی بر فرسایش بستر رسوبی

در این سری از آزمایش‌ها، تأثیر هیدروگراف‌های جریان بر انتقال بار بستر در شرایطی که دارای دبی اوج یکسان ولی زمان پایه متفاوت هستند، بررسی شد. شکل ۶ تأثیر زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی را بر میزان رسوب منتقل شده به پایین دست و برای هیدروگراف‌های دارای دبی اوج یکسان و برابر با ۵۴ لیتر بر ثانیه بر متر نشان می‌دهد.

هیدروگراف Hyd.A3 در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر رسوب منتقل شده، با کاهش دبی جریان پایه، کاهش می‌یابد و در حالتی که جریان پایه در کانال وجود ندارد، حداکثر رسوب منتقل شده به کمترین مقدار خود در مقایسه با وجود جریان پایه می‌رسد. به عبارت دیگر کاهش جریان پایه در بستر رسوبی به دلیل کاهش مومنتم جریان، کاهش فرسایش را به دنبال دارد (در شکل ۵، Hyd.A3+BF2 نشان‌دهنده وقوع هیدروگراف Hyd.A3 و وجود جریان پایه BF2 در کانال است).

همچنین نتایج نشان داد که مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین دست تحت تأثیر هیدروگراف جریان ورودی، در حالت وجود جریان پایه در کانال، بیشتر از مقدار کل رسوب انتقالی تحت شرایط بدون جریان پایه است. بنابراین وجود جریان پایه در کانال و وقوع هیدروگراف، می‌تواند در فرسایش بالادست مؤثر باشد و شدت فرسایش را افزایش دهد. جدول ۲ مقدار کل رسوبات منتقل شده با جریان به پایین دست را تحت تأثیر هیدروگراف‌های مورد آزمایش، با و بدون جریان پایه نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش، مشاهده شد که مقدار کل رسوب منتقل شده (کیلوگرم بر متر) برای آزمایش‌های با جریان پایه ۰/۹۵ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه بر متر نسبت به آزمایش‌های با هیدروگراف‌های جریان ورودی مشابه با حالت قبل و بدون جریان پایه، به ترتیب در حدود ۲۶/۵ و ۷۶/۵ درصد افزایش می‌یابد که این عامل تأثیر جریان پایه بر فرسایش بستر رسوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات متوسط دبی رسوبات تحت تأثیر زمان پایه‌های متفاوت

هیدروگراف‌هایی که با عددهای ۱، ۲، ۳ و ۴ آورده شده است به ترتیب دارای دبی اوج ۵۴، ۴۴/۴۵، ۳۳/۹ و ۲۱/۹ لیتر در ثانیه بر متر هستند. با توجه به جدول بالا و نتایج به دست آمده از آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی ۵۰ و ۱۰۰ درصد افزایش یابد (از ۶۰ به ۹۰ ثانیه و از ۶۰ به ۱۲۰ ثانیه)، مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین دست، به طور متوسط به ترتیب ۴۴/۴ و ۹۲/۱۳ درصد افزایش می‌یابد.

با ورود جریان و حرکت ذرات در روی بستر، در ابتدا فرسایش به وجود آمده سبب افزایش سطح مقطع جریان شده و کاهش عدد فرود را به همراه دارد. به این ترتیب که در ابتدا ذراتی که با وارد شدن مومنتم جریان به آنها شروع به حرکت می‌کنند پس از مدت کوتاهی به دلیل افزایش سطح مقطع ناشی از فرسایش شدید بستر و کاهش سرعت با کاهش نیروی برشی یا مومنتم لازم برای ادامه حرکتشان به سمت جلو روبرو خواهند شد، سرعتشان کاهش و یا روی بستر متوقف می‌شوند. این حالت، کاهش سطح مقطع جریان را به همراه داشته و دوباره سبب افزایش سرعت و افزایش مومنتم وارد بر بستر می‌شود و ذرات دوباره سرعتشان افزایش می‌یابد. این کاهش و افزایش مومنتم وارد بر بستر در طول دوره هیدروگراف بستگی زیادی به پارامترهای مؤثر در جریان دارد و می‌تواند شرایط جریان رسوب را کنترل کند (کاشفی‌پور و همکاران ۱۳۸۸). شکل ۷ تغییرات تراز بستر رسوبی را در سه زمان ۲۵، ۳۵ و ۴۵ ثانیه از شروع هیدروگراف جریان در طول بستر متحرک و برای

بر اساس شکل ۵ با توجه به اینکه دبی اوج هیدروگراف‌های جریان ورودی به کانال برای هر سه هیدروگراف Hyd.A1، Hyd.B1 و Hyd.C1 یکسان و برابر با ۵۴ لیتر بر ثانیه بر متر است، اما سدیگراف^۱ رسوب ناشی از این هیدروگراف‌ها متفاوت بوده به طوری که نقطه اوج در سدیگراف‌های به دست آمده، با افزایش زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زمان پایه هیدروگراف جریان تأثیر زیادی در مقدار فرسایش بالادست و انتقال رسوب به پایین دست دارد. همچنین همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، برای هیدروگراف‌های دارای دبی اوج یکسان با افزایش زمان پایه هیدروگراف، دبی متوسط رسوب منتقل شده به پایین دست کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دبی اوج هیدروگراف جریان، تغییرات دبی متوسط رسوب منتقل شده، با افزایش زمان پایه هیدروگراف کمتر می‌شود. نتایج به دست آمده در این قسمت با نتایج حاصل از آزمایش‌های اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۵) مقایسه شد. با وجود اختلاف در اندازه دانه‌بندی رسوبات، مقدار دبی اوج و زمان پایه هیدروگراف‌های انتخابی در آزمایش‌های اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۵) و آزمایش‌های این پژوهش، هماهنگی خوبی از نظر روند تغییرات مشاهده می‌شود.

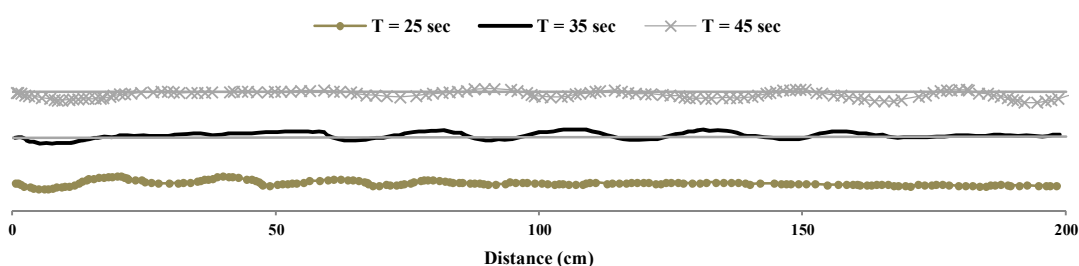
جدول ۳ مقدار کل رسوبات منتقل شده به پایین دست تحت تأثیر هیدروگراف‌های دارای زمان پایه یکسان و دبی اوج متفاوت را نشان می‌دهد. در جدول زیر،

1- Sedigraph

هیدروگراف جریان ورودی Hyd.A3 نشان می‌دهد. فرسایش بستر در ابتدای آن انجام شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، بیشترین مقدار

جدول ۳- کل رسوب منتقل شده با هیدروگراف‌های جریان ورودی

کل رسوب منتقل شده به پایین دست (کیلوگرم بر متر)			دبی اوج هیدروگراف
C	B	A	جریان ورودی
(زمان پایه برابر با ۱۲۰ ثانیه)	(زمان پایه برابر با ۹۰ ثانیه)	(زمان پایه برابر با ۶۰ ثانیه)	
۸/۷۲۱	۶/۳۶۸	۴/۲۱۲	Hyd.1
۶/۴۴۲	۵/۰۴۴	۳/۳۹۲	Hyd.2
۳/۵۷۵	۲/۸۵۳	۲/۳۹۲	Hyd.3
۱/۹۱۹	۱/۳۱۳	۰/۷۷۲	Hyd.4



شکل ۷- تغییرات تراز بستر رسوبی در زمان و تحت تأثیر هیدروگراف جریان Hyd.A3

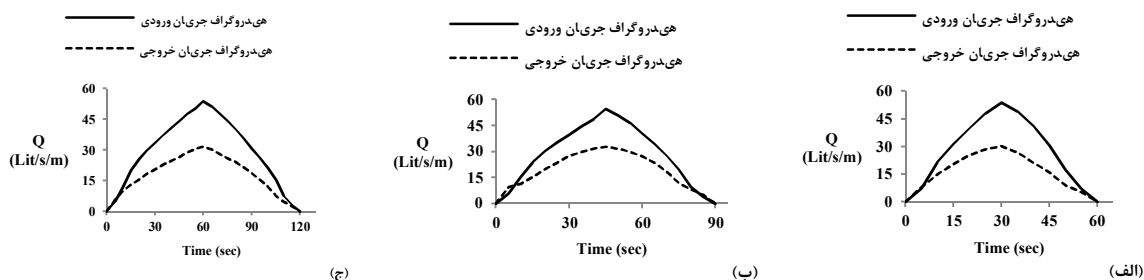
شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود در تمامی موارد هیدروگراف‌های خروجی جریان دارای مقادیر حداکثر کمتری نسبت به هیدروگراف‌های جریان ورودی هستند. دلیل کاهش مقدار اوج دبی جریان در هیدروگراف‌های خروجی، ذخیره شدن قسمتی از جریان در طول کانال و نیز افت انرژی جریان است. این موضوع بروز تغییراتی را در شکل هیدروگراف‌های خروجی ایجاد کرده و در مقایسه با هیدروگراف‌های ورودی دارای تیزی کمتر هستند.

تغییر شکل هیدروگراف جریان ورودی و خروجی

هیدروگراف‌های جریان ورودی با استفاده از دستگاه کنترل دور به دست آمدند. برای به دست آوردن هیدروگراف‌های خروجی در انتهای بستر متحرک، از رابطه مانینگ استفاده شد. ضریب زبری بستر نیز با استفاده از رابطه استریکلر که بر اساس قطر متوسط ذره است با توجه به معادله زیر محاسبه شد (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۷).

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

در رابطه بالا d_{50} قطر متوسط ذرات و بر حسب متر می‌باشد. هیدروگراف‌های جریان ورودی و خروجی در



شکل ۸- هیدروگراف‌های جریان ورودی و خروجی تحت تأثیر بستر متحرک (الف) Hyd.A1، (ب) Hyd.B1، (ج) Hyd.C1

نتیجه‌گیری

آزمایش‌های بالا به منظور بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان بر انتقال بار کف بوده است. مجموعه‌ای از هیدروگراف‌های مثلثی شکل از روی بستر رسوبی عبور داده شدند و رسوبات منتقل شده تحت تأثیر جریان ورودی، با وسیله‌ای ابتکاری نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری ساخته شده قابلیت جمع‌آوری تمامی رسوبات منتقل شده با جریان را داشته و به سادگی می‌توان با تغییر در تعداد شبکه‌ها و سرعت جابجایی آن، دقت و پیوستگی نقاط در منحنی تغییرات دبی رسوب در مقابل زمان را افزایش داد. نتایج حاصل نشان داد که رخداد هیدروگراف جریان به همراه وجود جریان پایه مقدار فرسایش بستر رسوبی را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی مقدار کل فرسایش را افزایش می‌دهد. هنگامی که زمان پایه هیدروگراف جریان ورودی ۵۰ و ۱۰۰ درصد افزایش یابد (از ۶۰ به ۹۰ ثانیه و از ۶۰ به ۱۲۰ ثانیه)، مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین‌دست، به طور متوسط به ترتیب ۴۴/۴ و ۹۲/۱۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که مقدار متوسط دبی رسوب انتقالی با افزایش زمان پایه هیدروگراف جریان کاهش یافته است. بررسی تراز بستر رسوبی بعد از عبور هیدروگراف جریان نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش بستر در ابتدای آن صورت انجام شده. همچنین اندازه‌گیری هیدروگراف جریان در خروجی بستر رسوبی نشان داد که هیدروگراف ورودی با عبور از روی بستر رسوبی دچار تغییر شکل شده به طوری که از حالت نوک تیز به صورت منحنی شکل درآمده همچنین مقدار اوج دبی نیز کم شده است که دلیل آن ذخیره شدن قسمتی از جریان در طول بستر کانال است.

منابع

۱. اسماعیلی ک. شفافی‌بجستانی م. و کاشفی‌پور س. م. ۱۳۸۵. انتقال بار کف تحت شرایط جریان غیرماندگار. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز.
۲. حسینی س. م. و ابریشمی ج. ۱۳۸۷. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات آستان قدس رضوی، ویرایش ۲. مشهد. خراسان رضوی. ۱۶۲ ص.
۳. راس.ان.گش. مهار سیلاب و مهندسی زهکشی (ترجمه دکتر مسعود قدسیان). ۱۳۷۷. شماره انتشار ۴۵، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۴۰۲ ص.
۴. شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس. ۱۳۸۱. سیستم‌های خودکار هشدار سیل محلی. مرجع شماره ۲ هیدرولوژی سازمان ملی هواشناسی. فوریه ۱۹۹۷. تهران. ۱۹۲ ص.
۵. شفافی‌بجستانی م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز. ۵۴۸ ص.
۶. کاشفی‌پور س. م. شفافی‌بجستانی م. و اسماعیلی ک. ۱۳۸۸. بررسی روند انتقال بار کف در رودخانه فصلی ناشی از سیلاب ناگهانی. گزارش نهایی پروژه. دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز. ۹ ص.
7. Bombar G. Elci S. Tayfur G. Guney S. and Bor A. 2011. Experimental and numerical Investigation of Bed-Load Transport under Unsteady Flows. Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 137:1276-1282.
8. Graf W. H. Suszka L. 1985. Unsteady flow and its effect on sediment transport. Proceeding, 21 st IAHR Congress. August 1985. Melbourne. Australia. 540-544.
9. Kuhnle R. A. 1992. Bed-load transport during rising and falling stages on two small streams. Earth Surf. Processes Landforms. 17(2): 191-197.
10. Lee K.T. Lui Y. L. and Cheng K. H. 2004. Experimental investigation of bed load transport processes under unsteady flow condition, Hydrological processes. 18: 2439-2454.
11. Lane L. J. Hernandez M. and Nichols M. 1997. Processes controlling. Journal of Hydraulic Engineering. 122(10): 549-558.
12. Leal J. G. A. B. Ferreira R. M. L. Cardoso A. H. and Almedia A. B. 2003. Comparison between Numerical and Experimental Results on Dam-Break waves over Dry Mobile Beds. Journal of Riverflow. 9: 368-381.
13. Reid I. L. Frostick E. and Layman J. T. 1985. The incidence and nature of bed-load transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels. Earth Surf. Processes Landforms. 10(1): 33-44.
14. Song T. and Graf W. H. 1997. Experimental study of bed-load transport in unsteady open-channel flow. International Journal of Sediment research. 12(3): 63-71.

15. Spinewine Z. Y. 2003. Dam break waves over movable beds. Department Civil and Environmental Engineering. Universite Catholique de Louvain, Belgium. 13(4): 61-69.
16. Wang Z. AND Plate E. J. 1994. An experimental study of bed deformation in unsteady and non-uniform flows. International Journal of Sediment Research. 9: 206-215.
17. Young D. L. and Carpat H. 1998. Formation of a jump by the dam-Break wave over a granular bed. Journal of Fluid Mechanics. 372: 165-187.