

مقایسه اثر الگوی جریان ورودی و شیب آبراهه بر انتقال رسوب بستر در شرایط آزمایشگاهی

اشکان آل بویه^{۱*} - کاظم اسماعیلی^۲ - سعیدرضا خدانشناس^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۹

چکیده

سیلاب‌های سریع در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل رگبار سریع وقوع می‌یابند و دارای زمان پایه کوتاه و نقطه اوج بالا می‌باشند. بررسی رفتار بار بستر منتقل شده تحت تاثیر چنین سیلاب‌هایی به پایین دست که بر ویژگی‌های رودخانه تاثیرگذار است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این تحقیق، به ارزیابی آزمایشگاهی اثر سیلاب ناگهانی بر میزان بار بستر انتقالی به پایین دست از طریق مدل پرداخته شده است. جریان‌های ورودی از نوع مثلی و به دو صورت متقارن و نامتقارن در نظر گرفته شد. زمان پایه آب‌نمودها ثابت و برابر با ۹۰ ثانیه و دبی اوج آن‌ها از ۶/۵۸ تا ۱۶/۱۸ لیتر در ثانیه در نظر گرفته شد. ذرات رسوبی مورد استفاده به عنوان بار بستر، رسوبات یک‌نواخت با قطر متوسط ۲/۵ میلی‌متر بود که در سه شیب کانال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد بین مقدار اوج آب‌نمود جریان و مقدار بیشینه رسوب‌نمود، تاخیر زمانی معادل با ۵ تا ۱۱ درصد زمان پایه آب‌نمود وجود دارد. همچنین شیب کانال و دبی اوج آب‌نمود جریان ورودی، تاثیر قابل توجه‌ای در میزان انتقال رسوب به پایین دست و فرسایش بالادست داشته چنان‌که با دو برابر شدن شیب کف (از ۰/۰۵ به ۰/۰۱)، میزان بار رسوبی ۱/۵ برابر و با چهار برابر شدن شیب کف کانال (از ۰/۰۵ به ۰/۰۲)، حدوداً ۵ برابر گردید. همچنین بار رسوبی انتقال یافته تحت تاثیر آب‌نمودهای مثلی متقارن بیش‌تر از آب‌نمودهای مثلی نامتقارن بود.

واژه‌های کلیدی: سیلاب سریع، جریان غیرماندگار، رودخانه‌های مناطق خشک، آب‌نمود مثلی، رسوب بستر

مقدمه

سیلاب‌های ناگهانی^۴ به دلیل بارندگی‌های شدید و کوتاه مدت ایجاد می‌شوند و به صورت طغیان از مسیر و کناره‌های رودخانه جاری و تمام موانع موجود در سر راه خود را شسته و تخریب می‌کند. آب‌نمود چنین سیلاب‌هایی از نقطه اوج بالایی برخوردار است. تغییر حالت و وضعیت رودخانه‌های آرام به شرایط سیلابی ممکن است چندین بار در سال اتفاق رخ دهد. سیل‌های ناگهانی از جمله مواردی هستند که نیاز به بیش‌ترین توجه و رسیدگی توسط سازمان‌های دولتی و توده مردم را دارند. در راستای انتقال بار بستر و فرسایش تحت تاثیر این نوع جریان، مطالعات نه چندان زیادی صورت گرفته است. رید و لارون (۱۹۹۵)، کوهن و لارون (۲۰۰۵)، متسو و همکاران (۱۲) و بمبار و همکاران (۶)، به ارائه مدل ریاضی رسوب منتقل شده و هم‌چنین تغییرات شکل بستر تحت تاثیر جریان غیرماندگار پرداختند (۶). رید و همکاران (۱۹۹۵) الگوی بارکف را تحت تاثیر آب‌نمود جریان، برای یازده سیل در آبراهه لندن مورد بررسی قرار دادند. با رخداد اولین سیل پس از یک دوره خشکی طولانی، مشاهده شد که یک تاخیر زمانی در شاخه نزولی آب‌نمود وجود دارد که علت آن سست شدن مواد بستر بود. در مقابل، وقتی سیلی به دنبال سیل دیگر جریان یافت، آن‌ها

به جریان عظیمی که سطح آب در آن بالا آمده و موجب آب گرفتگی اراضی حاشیه رودخانه می‌شود سیل اطلاق می‌شود. این نوع جریان زمین‌های اطراف را که معمولاً در زیر آب نیست، غرقاب کرده و با زیر آب بردن زمین‌ها و نواحی ساحلی، آثار بسیار زیان‌آوری برجای می‌گذارد. سیل جزء جدایی‌ناپذیر و طبیعی زندگی انسان به شمار می‌آید. وقوع سیلاب مشکلاتی همچون اختلال در ارتباطات، تخریب خاکریزها، راه‌ها، راه‌آهن‌ها، آبروها و سازه‌های دیگر را به وجود می‌آورد. علاوه بر آن، سیلاب مانعی برای زهکشی موثر و استفاده اقتصادی از اراضی برای کشاورزی و اهداف صنعتی می‌باشد. به دلیل وقوع سیل، فرسایش‌های عظیمی در سطح حوضه اتفاق می‌افتد و نهایتاً مشکلات عمده‌ای را بدلیل ته‌نشینی و انباشته شدن رسوب در پایین دست به وجود می‌آورد. از اینرو مطالعه و بررسی رفتار رسوب تحت تاثیر جریان سیلاب حائز اهمیت می‌باشد. یکی از دلایل وقوع سیلاب، توزیع غیریک‌نواخت زمانی و مکانی بارندگی است.

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده مسئول: (Email: a.alebouyeh15@gmail.com)

تخمین زده شود. اسماعیلی و همکاران (۱) آزمایش‌هایی را بر روی بارکف تحت جریان غیرماندگار انجام دادند. نتایج نشان داد که در آزمایش‌های با آب‌نمودهای مشابه از نظر دبی حداکثر، دبی رسوب متوسط با افزایش زمان پایه آب‌نمود، روند کاهشی داشته ولی میزان رسوب انتقالی همواره نسبت به شرایط جریان ماندگار بیش‌تر است. ایشان هم‌چنین مشاهده کردند که تغییر شکل بستر ناشی از جابجایی ذرات کف در ابتدای بستر بیش‌ترین مقدار را دارد. بمبار و همکاران (۶) مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را بر روی بارکف تحت شرایط جریان غیرماندگار انجام دادند. آن‌ها مجموعه‌ای از آب‌نمودهای مثلی و دوزنقه‌ای را بر روی بستر متحرک برقرار کردند. نتایج آزمایش نشان داد که نرخ انتقال بار بستر به دنبال تغییرات زمانی آب‌نمودهای مثلی و دوزنقه‌ای، تاخیر زمانی به اندازه ۴ تا ۱۴ درصد از زمان پایه آب‌نمودهای جریان ورودی دارند. پائولو بیلی (۵) اندازه‌گیری جریان و انتقال رسوب را در طول فصل بارانی (ژولای و آگوست) در رودخانه گرب-اودا^۱ که دارای کف شن و ماسه و جزو رودخانه‌های فصلی به حساب می‌آید، انجام داد. عدد فرود برای بررسی وقوع شرایط فوق‌بحرانی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ساختار رسوب محاسبه گردید. تغییرات غلظت رسوبات معلق با دبی آنالیز شد و منحنی‌های ساده برای انتقال بارمعلق و بارکف استخراج گردید. هم‌چنین ایشان تعدادی از معادلات پیش‌بینی بارکف را برای داده‌های رودخانه مذکور بررسی کردند. همانگونه که در بالا ذکر گردید، محققین مختلفی به بررسی بار بستر منتقل شده در شرایط جریان سیلابی، آزمایش‌های را انجام دادند. نمونه‌برداری از رسوب در آزمایش‌های آن‌ها یا به صورت الکترونیکی بوده که نیاز به وجود لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته دارد، یا رسوبات به صورت کلی و در انتهای کانال و یا در بازه‌های زمانی کوتاه مدت (بین ۱۰ تا ۲۰ ثانیه) و در انتهای کانال جمع‌آوری گردیده است. در این تحقیق رسوبات بلافاصله بعد از بستر مورد آزمایش نمونه‌برداری گردید. به طور کلی هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی آزمایشگاهی انتقال بار بستر می‌باشد. در این راستا تغییرات زمانی بار بستر و مقدار جریان، اندازه‌گیری و مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر انجام گرفت. جداره‌های کانال به منظور مشاهده جریان از جنس شیشه شفاف انتخاب شد. کانال قابلیت شیب‌پذیری داشته و در این تحقیق

بیان داشتند که مقدار قابل توجهی از رسوبات بارکف، در شاخه صعودی آب‌نمود ایجاد شده است (۱). گرب و سوزکا (۸) رابطه انتقال رسوب را تحت وضعیت جریان غیرماندگار و جریان ماندگار، در یک کانال مستقیم بررسی کردند و نتیجه گرفتند که حجم رسوبات بدست آمده در حالت غیرماندگار همواره بیش‌تر از مقدار آن در حالت ماندگار می‌باشد. کوهنل (۱۰) بر روی دو رودخانه ماسه‌ای در ایالات متحده امریکا تحقیق کرد. او مشاهده کرد که جریان بارکف در طول شاخه صعودی آب‌نمود در مقابل شاخه نزولی آن، در وضعیت جریان‌های شدید، بیش‌تر است. فاصله زمانی بین وقوع اوج جریان و دبی اوج رسوب در آزمایش‌های وانگ و پلیت (۱۵) مشاهده شد که آن را تاخیر اینرسی کف نامیدند. کاپارت و یانگ (۷) مطالعات آزمایشگاهی خود را در مورد موج انتقال یافته ناشی از شکست سد، بر روی بسترهای قابل حرکت مطالعه نمودند و مشاهده کردند که شدت آبشستگی کف در ابتدای مجرا بیش‌تر است (با توجه به ویژگی‌های موج سیلاب سریع و موج جریان سیلاب ناشی از شکست سد). کو (۱۳) جریان غیرماندگار که در کانال‌های روباز بر روی بستر ثابت و بستر متحرک مورد آزمایش قرار داد. پروفیل سرعت برای جریان یک نواخت ماندگار اندازه‌گیری گردید و از روی آن دبی جریان را محاسبه نمود. وی ۱۲ آزمایش جریان غیرماندگار با استفاده از آب‌نمودهای مثلی بر روی کف‌های متحرک را انجام داد. قبل از انجام آزمایش‌های جریان غیرماندگار، آزمایش‌های جریان ماندگار انجام پذیرفت. نتایج آزمایش نشان داد که پروفیل لگاریتمی سرعت برای جریان‌های غیرماندگار با انتقال بارکف در ناحیه خطی جریان وجود دارد هم‌چنین مشاهده کرد که وقوع حرکت بارکف با پایداری و دوام جریان کاهش می‌یابد. اسپین‌وین (۱۴) تاثیر جریان ناشی از شکست یک سد را روی بستر قابل حرکت و تخت مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که یک جبهه قوی پیشروی در ابتدای شکست سد وجود دارد که می‌تواند فرسایش قابل ملاحظه‌ای را در بستر ایجاد کند. لی و همکاران (۱۱) آزمایش‌های 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 تاثیر اندازه قطر ذرات است. حسن و همکاران (۹) در آزمایش‌های خود، از افزایش تدریجی دبی استفاده کرده و بر پوشش در رودخانه‌های با کف شنی تحقیق کردند. آن‌ها آزمایش‌هایی را با آب‌نمودهای متقارن و نامتقارن انجام دادند و مشاهده کردند که در دوره‌های زمانی کوتاه برای آزمایش‌های با آب‌نمود متقارن، تاخیر زمانی بین دبی اوج آب‌نمود جریان و رسوب‌نمود وجود دارد. متئو و همکاران (۱۲) یک روش برای تعریف و پیش‌بینی روند شستشو، تحت جریان غیرماندگار در شرایط پایدار بدون بعد زمانی ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت بین شسته شدن عمق و عمق بالقوه شستشو در کف، برای آب‌نمود داده شده می‌تواند به‌عنوان تابعی از پارامتر زمان مشخص

پدیده را فهرست نموده، سپس به روش آنالیز ابعادی گروه‌های بدون بعد موثر تعیین و تغییرات آن‌ها از طریق نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، روش Π باکینگهام برای تحلیل ابعادی بین متغیرهای موثر بر انتقال بار بستر در رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای موثر بر انتقال بار بستر تحت تاثیر جریان غیرماندگار به شرح زیر می‌باشد:

$$f(Q_s, Q_p, T_p, T_b, S, \rho, \mu, \omega_s, g, y_{it}, V_{it}) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه فوق، Q_s دبی جرمی رسوب منتقل شده به پایین دست تحت تاثیر جریان غیرماندگار در زمان‌های مختلف (کیلوگرم بر ثانیه)، Q_p دبی اوج آب‌نمود جریان ورودی (لیتر در ثانیه)، T_p مدت زمان رسیدن آب‌نمود به نقطه اوج (ثانیه)، T_b زمان پایه آب‌نمود جریان ورودی (ثانیه)، S شیب بستر رسوبی، ρ جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، μ لزجت دینامیکی 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) می‌باشند. 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. با استفاده از روش Π باکینگهام، گروه‌های بدون بعد به شرح زیر بدست آمدند:

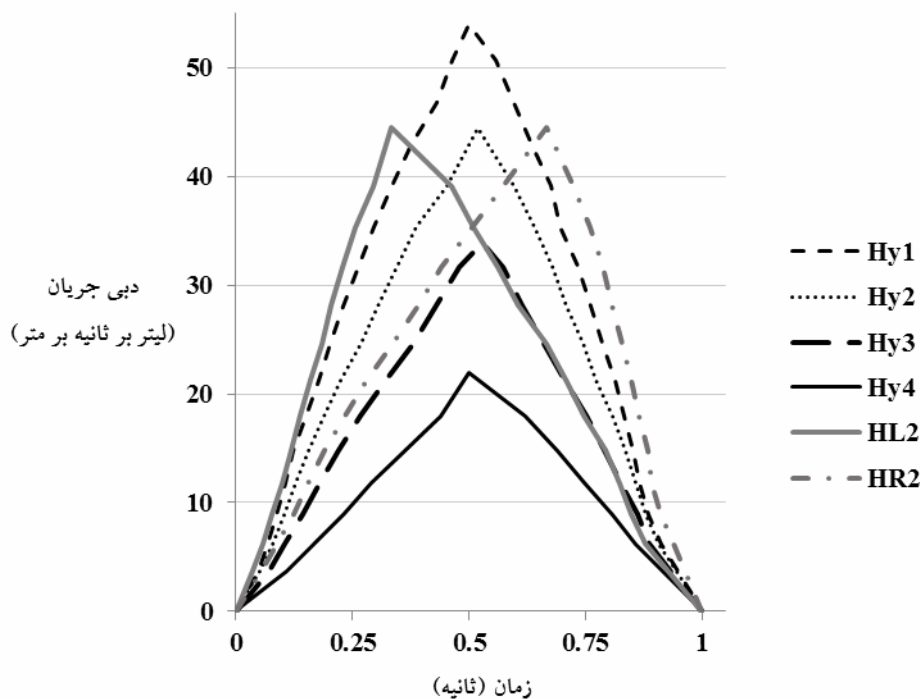
$$f\left(\frac{Q_s}{\rho \cdot Q_p}, \frac{T_p}{T_b}, S, \frac{\omega_s}{V_{it}}, \frac{g \cdot y_{it}}{V_{it}^2}, \frac{\mu}{\rho \cdot y_{it} \cdot V_{it}}\right) = 0 \quad (2)$$

که در رابطه فوق مقدار بی‌بعد $\frac{g \cdot y_{it}}{V_{it}^2}$ برابر با عکس مجذور عدد فرود جریان و مقدار بی‌بعد $\frac{\mu}{\rho \cdot y_{it} \cdot V_{it}}$ برابر با معکوس عدد رینولدز می‌باشد. این تحقیق به منظور بررسی تاثیر آب‌نمود جریان بر بستر می‌باشد لذا رسوبات مورد استفاده در آزمایش باید در طی جریان غیرماندگار، به صورت بار بستر حرکت کرده و معلق نشوند. معیار موجود که نشان دهنده حرکت ذرات به صورت بارکف باشد، نسبت U^*/ω_s است که در آن U^* سرعت برشی و ω_s سرعت سقوط ذرات در حالت مستغرق می‌باشد. معیارهای مختلفی برای کنترل شرایط معلق بودن ذرات وجود دارد که از جمله می‌توان به معیار بگنولد (۱۹۶۶) اشاره نمود که چنانچه $(U^*/\omega) < 0.25$ باشد، آنگاه حرکت ذرات فقط به صورت بارکف است (۱). می‌توان نوشت.

سه شیب 0.05 ، 0.1 و 0.2 در نظر گرفته شد. به منظور ایجاد جریان غیرماندگار، از سیستم کنترل دور^۱ مدل VFR-M استفاده شد. این وسیله با افزایش و کاهش تدریجی فرکانس پمپ، جریان غیرماندگار را تولید می‌نماید. با استفاده از برنامه‌های موجود در این دستگاه، مدت زمان شاخه‌های صعودی و نزولی آب‌نمود جریان به دستگاه وارد گردید. دبی اوج آب‌نمودهای ورودی، با توجه به اندازه دانه‌بندی رسوب و از طریق شیر تنظیم، تعیین شد. آب‌نمودهای بکار گرفته شده در این آزمایش‌ها از نوع مثلثی شکل دارای زمان پایه ۹۰ ثانیه بوده و به دو صورت مثلثی متقارن و نامتقارن مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱ آب‌نمودهای اندازه‌گیری شده در کانال را نشان می‌دهد.

مدت زمان شاخه‌های صعودی و نزولی در آب‌نمودهای مثلثی متقارن با یکدیگر برابر و معادل ۴۵ ثانیه و در آب‌نمودهای مثلثی نامتقارن این دو پارامتر دارای زمان‌های متفاوتی بودند. مشخصات آب‌نمودهای مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

رسوبات مورد استفاده در این تحقیق از جنس ماسه رودخانه‌ای و دارای قطر متوسط $2/5$ میلی‌متر و d_{60} و d_{10} ذرات به ترتیب برابر با $2/3$ و $2/8$ میلی‌متر بودند و ضریب یک نواختی ذرات رسوب برابر با $1/21$ بدست آمد. بستر رسوبی به طول ۲ متر و ضخامت رسوب‌ریزی ۶ سانتی‌متر و هم عرض با کانال آزمایشگاهی آماده‌سازی شد. نمونه برداری از بار بستر منتقل شده به پایین دست تحت تاثیر آب‌نمودهای جریان ورودی، بلافاصله بعد از بستر متحرک و در فواصل زمانی کوتاه انجام گرفت. برای این منظور از یکسری جعبه‌های مستطیلی از جنس توری با بدنه مشبک ریز که امکان عبور ذرات رسوبی از آن وجود ندارد انتخاب گردید. ابعاد جعبه‌های مشبک شامل طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲۵، ۵ و ۵ سانتی‌متر بودند. جعبه‌های توری‌های تهیه شده به یک قاب فلزی متصل و توسط یک کابل و موتور که در انتهای کانال نصب گردیده است با سرعت مورد نظر به سمت پایین دست به حرکت در می‌آمد. سرعت حرکت این قاب متناسب با زمان پایه آب‌نمود جریان ورودی انتخاب گردید. پس از هر آزمایش رسوبات موجود در هر جعبه توری به صورت جداگانه و در داخل آون خشک و وزن گردید. با مشخص بودن مدت زمان آزمایش در محدوده هر جعبه توری و وزن رسوب موجود در آن، دبی رسوب منتقل شده به پایین دست تحت تاثیر آب‌نمودهای جریان ورودی قابل محاسبه بود. روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان مستقیماً از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری‌های موجود نظیر قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتم به دست آورد. در چنین مواردی برای استخراج رابطه ریاضی حاکم بر چنین پدیده‌هایی، ابتدا کلیه متغیرهای موثر بر



شکل ۱- آب‌نمودهای جریان ورودی

جدول ۱- مشخصات آب‌نمودهای مورد استفاده در آزمایش

آب‌نمود جریان	دبی اوج آب‌نمود جریان (Lit/sec/m)	مدت زمان شاخه صعودی (sec)	مدت زمان شاخه نزولی (sec)
Hy1	۵۴		
Hy2	۴۴/۵	۴۵	۴۵
Hy3	۳۴		
Hy4	۲۲		
HL2	۴۴/۵	۳۰	۶۰
HR2	۴۴/۵	۶۰	۳۰

U^*/ω_s و $4/8, 7/2$ و 3 سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. جدول ۲ مقدار بی‌بعد U^*/ω_s را برای شیب‌های مختلف بستر نشان می‌دهد.

جدول ۲- بررسی معلق شدن ذرات رسوب بار بستر

U^*/ω_s	ω_s (m/s)	U^* (m/s)	R (m)	y_{max} (m)	S
۰/۱۲۴	۰/۳۰۴	۰/۰۳۸	۰/۰۲۸	۰/۰۷۲	۰/۰۰۵
۰/۱۴۸	۰/۳۰۴	۰/۰۴۵	۰/۰۲۰۶	۰/۰۴۸	۰/۰۱
۰/۱۷	۰/۳۰۴	۰/۰۵۲	۰/۰۱۳۶	۰/۰۳	۰/۰۲

با توجه به مقادیر جدول فوق، مشاهده می‌شود که در تمامی شیب‌های انتخابی نسبت بی‌بعد U^*/ω_s کم‌تر از مقدار $0/25$ شده است و براساس معیار بگنولد می‌توان نتیجه گرفت که ذرات رسوبی مورد

$$U_* = \sqrt{g.R.S} \quad (3)$$

که در آن g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، R شعاع هیدرولیکی جریان (متر) و S شیب کف کانال می‌باشد. هم‌چنین روبی (۱۹۳۳) برای ذرات کوچک، رابطه ۴ را برای محاسبه سرعت سقوط ارائه کرد که برای تمام محدوده عدد رینولدز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (۲).

$$\omega_s = \frac{\sqrt{2.3g(G_s - 1)D_{50}^2 + 36v^2} - 6v}{D_{50}} \quad (4)$$

در رابطه فوق G_s چگالی ذرات رسوب و v لزجت سینماتیک می‌باشد. در این آزمایش سه شیب $0/05, 0/01$ و $0/02$ برای بستر رسوبی در نظر گرفته شد. حداکثر عمق جریان در این سه شیب به ترتیب برابر با

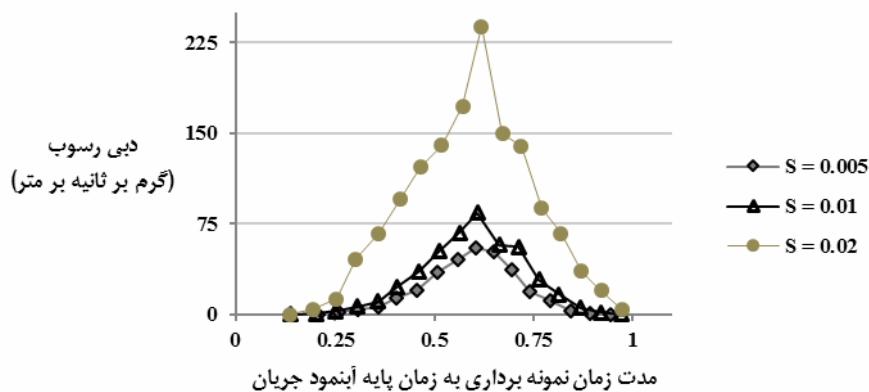
شیب‌های انتخابی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، در یک زمان مشخص با افزایش شیب کانال دبی رسوب منتقل شده به پایین دست افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش زمان، اختلاف بین نقاط نمودار در سه شیب مورد آزمایش، تا رسیدن به نقطه اوج نمودارها افزایش یافته و بعد از آن، این فاصله شروع به کم شدن می‌کند. به عبارت دیگر در شاخه صعودی سدیگراف رسوب، با افزایش زمان فاصله بین نقاط در شیب‌های مختلف و در یک زمان مشخص افزایش پیدا کرده و تا رسیدن به نقطه اوج ادامه دارد و بعد از آن، در شاخه نزولی سدیگراف رسوب، این فاصله با گذشت زمان شروع به کم شدن می‌کند.

استفاده در آزمایش به حالت بارمعلق در نیامده که مشاهدات چشمی را نیز تایید می‌کند و همواره به صورت بار بستر حرکت می‌کنند.

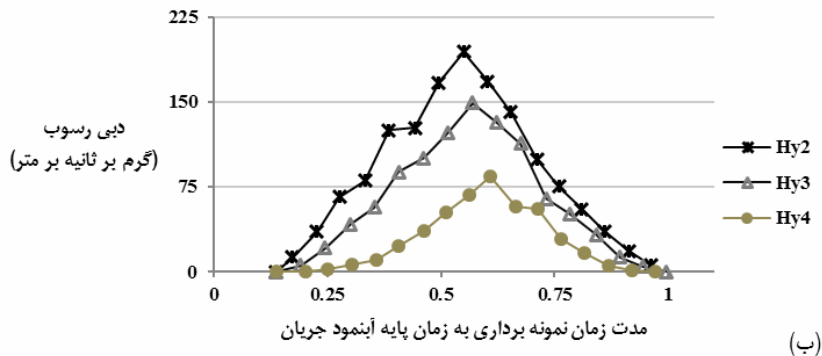
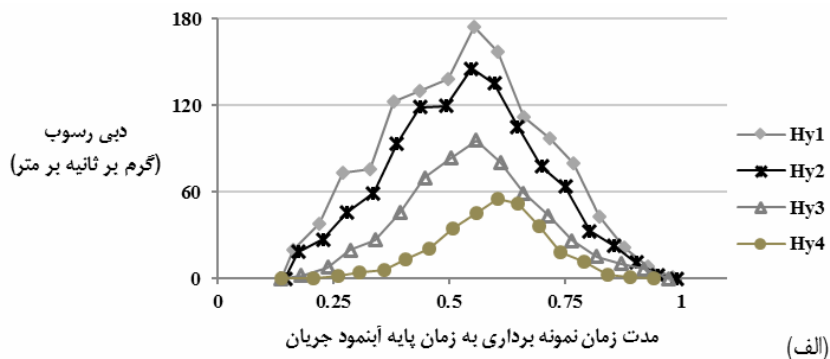
نتایج و بحث

تاثیر شیب بستر بر انتقال رسوب

شیب بستر یکی از عوامل بسیار مهم بر شروع حرکت ذرات می‌باشد. افزایش شیب می‌تواند بدلیل افزایش قدرت آبراهه، ذرات را زودتر به حرکت درآورده و فرسایش ایجاد کند. در این تحقیق، اثر تغییر شیب بستر به شرایط حرکت ذرات مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۲ روند تغییرات دبی رسوب در واحد عرض را نسبت به زمان در



شکل ۲- تغییرات دبی رسوب در واحد عرض تحت تاثیر شیب بستر برای آب‌نمود ورودی Hy4



شکل ۳- تغییرات دبی رسوب تحت تاثیر آب‌نمودهای با دبی اوج متفاوت

(الف) شیب برابر با ۰/۰۵ (ب) شیب برابر با ۰/۰۱

دارای زمان پایه یکسان و دبی اوج مختلف، با افزایش دبی اوج آب‌نمود جریان، افزایش می‌یابد.

آزمایش‌های کوهنل (۱۰) که به بررسی آب‌نمودهای مثلثی متقارن و تاثیر آن‌ها بر فرسایش بستر رسوبی پرداخته بود، نشان داد که مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین‌دست تحت تاثیر جریان غیرماندگار در شاخه صعودی سدیگراف رسوب بیش‌تر از مقدار آن در شاخه نزولی می‌باشد. در این تحقیق نیز نتایج مشابهی بدست آمد و مشخص گردید که در شاخه صعودی سدیگراف رسوب نسبت به شاخه نزولی آن، مقدار بیش‌تری از بار بستر به پایین‌دست منتقل شده که این عامل نشان دهنده تاثیر موج اولیه جریان ورودی بر روی انتقال بار بستر به پایین‌دست می‌باشد. هم‌چنین در شکل ۴ دبی رسوب منتقل شده به پایین‌دست را به صورت تجمعی برای آب‌نمودهای مورد آزمایش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود آب‌نمودهای دارای دبی اوج بیش‌تر، رسوب بیش‌تری را به پایین‌دست منتقل می‌کند.

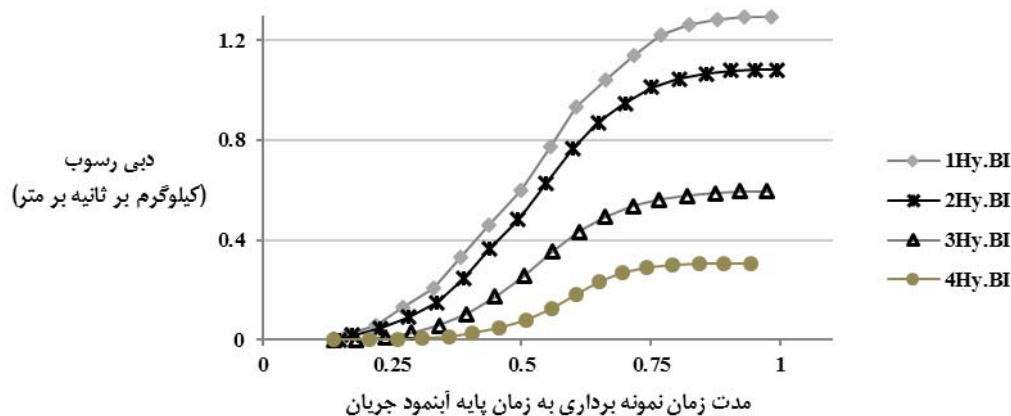
نقطه عطف در نمودار فوق، نقطه‌ای می‌باشد که نمودارها به مقدار حداکثر خود رسیده‌اند. تغییرات دبی رسوب منتقل شده به پایین‌دست در مقابل تغییرات دبی جریان در واحد عرض کانال، برای آب‌نمود ورودی Hy1 و برای شیب ۰/۰۰۵ از کانال آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل فوق، مشاهده می‌شود که تغییرات دبی رسوب روندی مشابه با تغییرات دبی جریان ورودی دارد. بطوریکه با افزایش دبی جریان، دبی رسوب منتقل شده به پایین‌دست نیز افزایش و با کاهش دبی، مقدار آن کاهش می‌یابد.

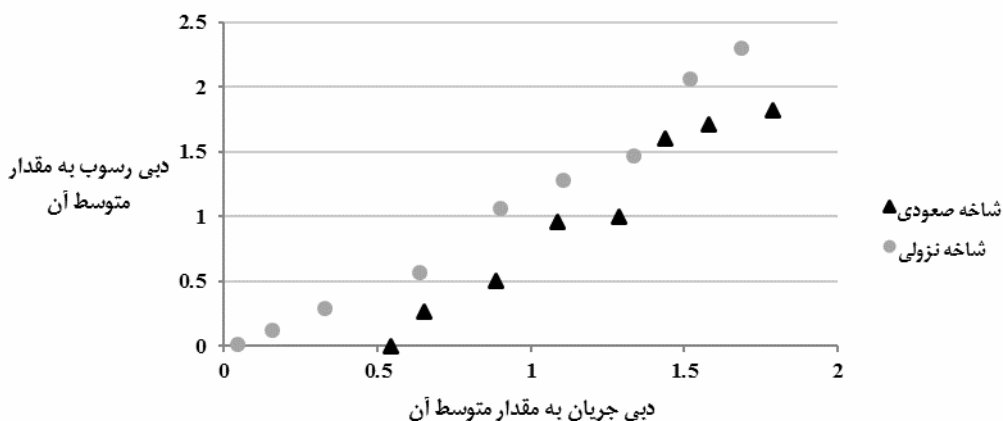
هم‌چنین نتایج نشان دادند که مقدار کل رسوب فرسایش یافته در بالادست تحت تاثیر آب‌نمود جریان ورودی یکسان، با افزایش شیب بستر افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش ۱۰۰ درصدی شیب کف (از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۱)، مقدار رسوب منتقل شده به پایین‌دست تحت تاثیر یک آب‌نمود مشخص، حدوداً ۱/۵ برابر افزایش پیدا کرد. هم‌چنین با افزایش ۳۰۰ درصدی شیب بستر (از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۲)، مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین‌دست، حدوداً ۵ برابر افزایش یافت. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که شیب بستر تاثیر بسیار زیادی در فرسایش بالادست دارد.

تاثیر دبی اوج آب‌نمود ورودی در انتقال بار بستر

براساس میزان شدت بارندگی و هم‌چنین مشخصه‌های فیزیکی حوضه، دبی اوج در آب‌نمودهای ورودی می‌تواند تحت تاثیر واقع شده و در نتیجه بر میزان انتقال بار بستر به پایین‌دست موثر باشد. آب‌نمودهای مثلثی متقارن با دبی اوج متفاوت بر روی بستر رسوبی جریان پیدا کردند و تاثیر هر یک از آن‌ها بر انتقال بار بستر به پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که دبی اوج آب‌نمود نقش بسزایی در میزان فرسایش بالادست دارد. شکل ۳ تغییرات دبی رسوب منتقل شده به پایین‌دست را نسبت به زمان و تحت تاثیر آب‌نمودهای مثلثی متقارن ورودی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی اوج آب‌نمود جریان ورودی، مقدار اوج سدیگراف رسوب نیز افزایش می‌یابد. به طوری که افزایش دبی اوج آب‌نمود توانایی انتقال بار بستر به پایین‌دست را افزایش می‌دهد. هم‌چنین نتایج نشان داد که مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین‌دست تحت تاثیر آب‌نمودهای



شکل ۴- تغییرات تجمعی دبی رسوب در شیب ۰/۰۰۵



شکل ۵- تغییرات دبی رسوب منتقل شده به پایین دست در مقابل تغییرات دبی جریان ورودی آب نمود Hy1

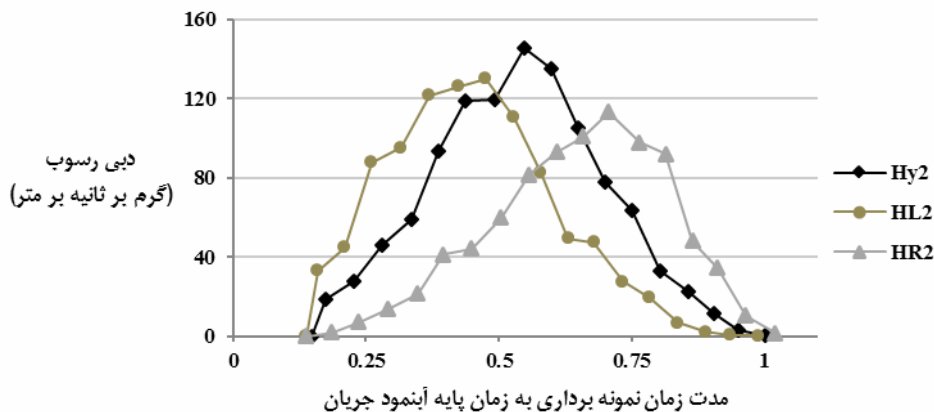
آب نمود جریان و اوج سدیگراف معادل با ۵ تا ۱۱ درصد زمان پایه آب نمود اندازه گیری گردید.

تأثیر آب نمودهای مثلثی نامتقارن در انتقال بار بستر

میزان رطوبت بستر، پوشش گیاهی حوضه، نفوذپذیری بستر، نوع و جنس خاک در حوضه و بسیاری از عواملی دیگر باعث تغییر در شکل آب نمود ورودی جریان شده به طوری که مدت زمان شاخه صعودی و یا نزولی آب نمود ورودی جریان را تغییر داده و باعث می شود که آب نمود از حالت متقارن خارج شده و صورت آب نمود نامتقارن تبدیل شود. تأثیر آب نمودهای مثلثی نامتقارن بر فرسایش بستر رسوبی در مقایسه با آب نمودهای مثلثی متقارن که دارای زمان پایه یکسان می باشند مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت (شکل ۶).

نتایج نشان داد که مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین دست تحت تأثیر آب نمود مثلثی متقارن در مقایسه با آب نمودهای مثلثی نامتقارن که دارای دبی اوج و زمان پایه مشابه می باشند، بیش تر بوده است. هم چنین مقدار کل رسوب انتقال یافته برای آب نمود HL2 همواره بیش تر از مقدار آن در آب نمود HR2 می باشد.

در شکل ۵ شاخه صعودی آب نمود با علامت مثلث و شاخه نزولی آن با دایره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، بین دبی اوج آب نمود ورودی و مقدار حداکثر دبی رسوب منتقل شده به پایین دست اختلاف زمانی وجود دارد که تاخیر زمانی نامیده می شود. این تاخیر زمانی ناشی از نیروی اینرسی ذرات بستر می باشد. چراکه هنگامی که موج اولیه جریان بر روی ذرات بستر تأثیر می گذارد، به دلیل نیروی اینرسی ذرات، مدت زمانی طول می کشد تا ذرات بستر به حرکت در آیند در نتیجه هنگامی که ذرات شروع به حرکت می کنند، موج جریان قبلاً عبور کرده و لذا تاخیر زمانی بین آب نمود و سدیگراف رسوب ایجاد می شود. محققین زیادی در آزمایش های مربوط به انتقال بار بستر تحت تأثیر جریان غیرماندگار، این تاخیر زمانی را مشاهده کرده و مورد بررسی قرار داده اند. از آن جمله می توان به آزمایش های لی و همکاران (۱۱) که اختلاف زمانی معادل ۶ تا ۱۵ درصد زمان پایه آب نمود جریان و هم چنین آزمایش های بمبار و همکاران (۶) که تاخیر زمانی معادل ۴ تا ۱۴ درصد زمان پایه آب نمود جریان را در آزمایش های خود مشاهده کردند، اشاره داشت. در این آزمایش تاخیر زمانی بین دبی اوج



شکل ۶- تغییرات دبی بار بستر تحت آب نمودهای متقارن و نامتقارن در شیب ۰/۰۰۵

جدول ۳- مقدار رسوب منتقل شده به پایین دست تحت تاثیر عوامل مورد بررسی (گرم)

آب‌نمودهای ورودی جریان						شیب کف کانال
Hy1	Hy2	HL2	HR2	Hy3	Hy4	
۱۹۰۹	۱۵۱۲	۱۳۶۹	۱۲۰۵	۸۵۵	۳۹۴	در طول آب‌نمود
۱۰۲۵	۷۸۴	***	***	۴۴۵	۲۰۸	شاخه صعودی ۰/۰۰۵
۸۸۴	۷۲۸	***	***	۴۱۰	۱۸۶	شاخه نزولی
***	۲۰۱۲	۱۸۸۹	۱۹۱۴	۱۴۴۹	۶۱۲	در طول آب‌نمود
***	۱۰۲۷	***	***	۷۴۳	۳۲۹	شاخه صعودی ۰/۰۱
***	۹۸۵	***	***	۷۰۶	۲۸۳	شاخه نزولی
***	***	***	***	***	۱۹۳۴	در طول آب‌نمود
***	***	***	***	***	۱۰۹۶	شاخه صعودی ۰/۰۲
***	***	***	***	***	۸۳۸	شاخه نزولی

***- آزمایش‌ها برای این حالات انجام نشده است.

آب‌نمود جریان ورودی و مقدار اوج سدیگراف رسوب، یک تاخیر زمانی وجود دارد که مقدار آن برابر با ۵ تا ۱۱ درصد زمان پایه آب‌نمود اندازه‌گیری گردید. که این مقدار مطابقت خوبی با آزمایش‌های سایر محققین دارد. مقدار کل رسوب منتقل شده به پایین دست و هم‌چنین مقدار اوج سدیگراف رسوب، تحت تاثیر آب‌نمود جریان مثلی متقارن در مقایسه با آب‌نمود جریان مثلی نامتقارن که دارای دبی اوج جریان و زمان پایه مشابه می‌باشند، بیش تر است. هم‌چنین مقدار اوج سدیگراف رسوب در آب‌نمودهای مثلی نامتقارن که به سمت چپ چولگی دارند، همواره بیش تر از مقدار آن در آب‌نمودهای مثلی نامتقارن با چولگی به راست می‌باشد.

هم‌چنین پیشنهاداتی از قبیل استفاده از محدوده دبی و زمان پایه وسیع تر برای آب‌نمودهای جریان، استفاده از ذرات رسوبی با دانه بندی متنوع تر، استفاده از دستگاه‌های الکترونیکی به منظور قرائت عمق جریان بجای روش فیلم‌برداری، انجام آزمایش‌های انتقال بار بستر تحت تاثیر جریان ماندگار و مقایسه آن با جریان غیرماندگار و استفاده از نمونه‌بردار رسوب با تعداد شبکه‌های جمع‌کننده رسوب بیش تر به منظور افزایش در تعداد نقاط منحنی سدیگراف رسوب و افزایش دقت آزمایش را می‌توان بیان داشت.

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار اوج سدیگراف رسوب برای آب‌نمود مثلی متقارن در مقایسه با آب‌نمودهای مثلی نامتقارن بیش تر می‌باشد. هم‌چنین این مقدار برای آب‌نمود HL2، بیش تر از مقدار آن در آب‌نمود HR2 می‌باشد. مقادیر بار بستر منتقل شده به پایین دست در طول آب‌نمود (شاخه صعودی و نزولی) تحت تاثیر عواملی همچون شیب کف کانال، دبی اوج آب‌نمود و هم‌چنین آب‌نمودهای نامتقارن در جدول ۳ درج شده است.

نتیجه گیری

نتایجی که از این تحقیق آزمایشگاهی حاصل گردید نشان داد که شیب کف کانال تاثیر بسیار زیادی در میزان انتقال بار بستر به پایین دست دارد به طوری که با دو برابر شدن شیب کف کانال (از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۱)، کل رسوب منتقل شده به پایین دست حدوداً ۱/۵ برابر و با چهار برابر شدن شیب کف کانال (از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۲)، این مقدار حدود ۵ برابر افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقدار کل بار بستر منتقل شده به پایین دست در شاخه صعودی آب‌نمود رسوب در مقایسه با شاخه نزولی آن به دلیل شدت موج اولیه جریان، بیش تر می‌باشد. نتایج نشان داد در آب‌نمودهای مثلی متقارن، بین مقدار اوج

منابع

- ۱- اسماعیلی ک، شفاعی ب.م. و کاشفی پور س.م. ۱۳۸۶. بررسی آزمایشگاهی عوامل موثر بر انتقال رسوب در شرایط سیلاب طغیانی. مجله علمی پژوهشی. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال اول - شماره ۲. تابستان ۲۰۰۷.
- ۲- شفاعی بجستان م. ۱۳۸۴. مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی - هیدرولیکی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحه ۶۷.
- ۳- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس. ۱۳۸۱. تهران. سیستم‌های خودکار هشدار سیل محلی، مرجع شماره ۲ هیدرولوژی سازمان ملی هواشناسی، فوریه ۱۹۹۷.
- ۴- مهار سیلاب و مهندسی زهکشی. تالیف پروفیسور اس.ان.گش. ترجمه دکتر مسعود قدسیان. دانشگاه تربیت مدرس. تاریخ انتشار ۱۳۷۷. شماره

- 5- Billi P. 2011. Flash flood sediment transport in a steep sand-bed ephemeral stream. *International Journal of Sediment Research* 26: 193-209.
- 6- 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/ OCTOBER 2011*.137:1276-1282.
- 7- Carpat H., and Yong D.L. 1998. Formation of a jump by the dam-break wave over a granular bed. *J. of fluid Mechanics* 372: 165-187.
- 8- Graf W.H., Suszla L. 1985. Unsteady flow and its effect on sediment transport. *Proceeding 21st IAHR Congress, August 1985, Melbourne, Australia*; 540-544.
- 9- Hassan M.A.R.E., and Parker G. 2006. Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel Bed Rivers. *Water Resource. Research* 42: 1-15.
- 10- Kuhnle R.A. 1992. Bed-load transport during rising and falling stages on two small streams. *Earth Surf. Processes Landforms*, 17(2) 191-197.
- 11- 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, pp. 2439-2454.
- 12- Matteo T., Andrea M. and Stephen C. 2008. Scouring at bed sills as a response to flash flood. Vol.135, No.6, June 1, 2009.
- 13- Qu Z. 2002. Unsteady open channel flow over a mobile bed. PhD thesis. Ecole polytechnique federale de Lausanne.
- 14- Spinewine Z.Y. 2003. Dam break waves over movable beds. Dept. Civ. And Env. Engrg, Universite Catholique de Louvain, Belgium.
- 15- 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.

Comparison of the Effects of Flow Pattern and Bed Slope on Sediment Transport in Laboratory Conditions

A. Alebouyeh^{1*} - K. Esmaili² - S.R. Khodashenas³

Received: 05-05-2013

Accepted: 29-04-2014

Abstract

Flash flood is due to rapid precipitation in arid and semi-arid areas. This flood is example of unsteady flow which has hydrograph with little time duration and high discharge. Investigation behavior of these floods is very important on sediment transport and characteristics streams. In this research evaluated the effect of flash floods on bed load transported to downstream. The input hydrographs are symmetric and Asymmetric triangles. Time duration of hydrograph was selected 90 second and constant and the maximum discharge were changed 6.58 to 16.18 l/s. The median size of particles is 2.5 mm; three bed slopes 0.005, 0.01 and 0.02 were select in these experiments. The results show that a temporal lag was found between the flow hydrographs peak and the sediment hydrograph peak. The temporal lag was found to be about equal to 5 - 11% of flow hydrograph duration. Also bed slope and maximum discharge of hydrograph are effect on upstream erosion and transportation of sediment to downstream. Since increases the bed slope from 0.005 to 0.01 increased 50% bed load transported and with two times the slope it show increase 400% in bed load transported. Bed load transported to downstream with symmetric triangle hydrographs more than symmetric triangle hydrograph.

Keywords: Flash Flood, Unsteady flow, Arid Area, Triangle Hydrograph, Bed load

1,2,3- MSc Student, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively
(* -Corresponding Author Email: a.alebouyeh15@gmail.com)