

بررسی عوامل مؤثر در انتقال رسوب در جریان غیرماندگار

سیدعلیرضا اسماعیلی (دانشجوی دکتری)

سعید گوهری (استادیار)

مجید حدیری* (استادیار)

دانشکده‌ی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۱، ص. ۱۴۵-۱۵۵، (پژوهشی)

با توجه به تأثیر مهم سیلاب در تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه، در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در انتقال بار بستر رسوبی در شرایط سیلاب ناگهانی پرداخته شده است. هیدروگراف جریان ورودی از نوع مثلثی متقارن و زمان پایه‌ی هیدروگراف‌ها برابر ۹۰ ثانیه و دبی بیشینه‌ی آنها از ۳۰ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. جنس ذرات رسوبی از نوع کوارتز و با قطر متوسط ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر بوده و در دو شیب ۰/۰۶ و ۰/۱۴ آزمایش شده‌اند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که نقش شیب کانال در انتقال بار کف اهمیت زیادی دارد، به طوری که با افزایش ۲ برابری شیب کف، میزان کل رسوب انتقالی به پایین دست تقریباً ۵ برابر افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دبی رسوب، پارامتر غیرماندگاری افزایش یافته و پارامتر اخیر نقش مؤثری در کل کار جریان داشته است.

واژگان کلیدی: بار بستر، سیلاب ناگهانی، زمان پایه، هیدروگراف مثلثی، پارامتر غیرماندگاری، کل کار جریان.

۱. مقدمه

به جریان وسیعی که سطح آب به صورت غیرمنتظره افزایش یافته و موجب آب‌گرفتگی اراضی حاشیه‌ی رودخانه و خسارت‌های مالی و جانی جبران‌ناپذیری ایجاد می‌کند، سیل اطلاق می‌شود. به دلیل وقوع سیلاب، فرسایش‌های عظیمی در سطح حوضه صورت می‌گیرد، که باعث مشکلات عمده‌ی، از جمله: ته‌نشینی و انباشته شدن رسوب در پایین دست رودخانه می‌شود. از این رو انتقال بار رسوبی در تغییر مورفولوژی رودخانه نقش مهمی ایفا می‌کند و بر اکولوژی رودخانه تأثیر دارد. [۱] یکی از دلایل وقوع سیلاب، توزیع غیریکنواخت زمان و مکان بارندگی است. سیلاب‌های ناگهانی به علت بارندگی‌های شدید و با زمان پایه‌ی کم صورت می‌گیرند و به صورت طغیان از مسیر و کناره‌های رودخانه جاری و موانع موجود در سر راه خود را شسته یا تخریب می‌کنند. هیدروگراف سیلاب‌های ذکر شده، نقطه‌ی اوج بالایی دارند. انتقال توده‌ی ذرات رسوبی در محیط سیال در یک بستر طبیعی با جنس رسوب‌های مشابه، انتقال رسوب نامیده می‌شود. هنگامی که سرعت برشی کمی بیشتر از سرعت بحرانی آن شود، ذرات شروع به غلطیدن و لغزش بر روی بستر می‌کنند و دائماً با بستر در تماس هستند. [۲]

و شناخت آنها و تأثیر هر عامل در یکدیگر نقش مهمی در فهم رفتار رسوب خواهد داشت. تراز سطح آب ارتباط نزدیکی با مقاومت شکل‌های بستر رسوبی فرسایش‌پذیر در برابر جریان آب دارد. تأثیر متقابل بین جریان آب و بستر فرسایش‌پذیر، که همراه با پدیده‌ی انتقال رسوب است، باعث ایجاد انواع شکل‌های بستر می‌شود. برخی از پژوهشگران روش‌هایی را برای پیش‌بینی فرم بستر ارائه کرده‌اند، که هر کدام محدودیت‌های خاص خود را دارند و می‌توان نتیجه گرفت که در رودخانه‌های شنی، فرم بستر تلماسه^۱ شکل نمی‌گیرد. [۳]

شکل‌های بستر، مقاومتی اضافه در برابر جریان آب تولید می‌کنند، که به آن مقاومت شکل بستر می‌گویند. بنابراین مقاومت کل از دو بخش: (۱) مقاومت ذره، که ناشی از اندازه‌ی ذره رسوبی است و (۲) زبری شکل، که ناشی از شکل‌های بستر است، تشکیل شده است. [۴] حرکت بار کف تحت جریان سیلاب‌های ناگهانی به دلیل شکل هیدروگراف اهمیت ویژه‌ی دارد. در شرایط مذکور، جریان سیل به علت شکل‌گیری سریع همانند یک موج به حرکت در می‌آید و آثار متفاوتی نسبت به سیل‌های با زمان اوج‌گیری طولانی در بستر برجا می‌گذارد. در زمینه‌ی انتقال بار بستر و فرسایش تحت تأثیر جریان غیرماندگار، مطالعات زیادی صورت نگرفته است. رید و لارون (۱۹۹۵)، کوهن و لارون (۲۰۰۵)، متو و همکاران (۲۰۰۸)، بمبار و همکاران (۲۰۱۱) به ارائه‌ی مدل ریاضی رسوب انتقالی و تغییرات شکل بستر تحت تأثیر جریان غیرماندگار پرداخته‌اند. [۵]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۳/۲۹، اصلاحیه ۱۴۰۰/۷/۱۷، پذیرش ۱۴۰۰/۷/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2021.58434.2978

گراف و سوزکا^۲ (۱۹۸۵) در بررسی ارتباط انتقال رسوب تحت جریان ماندگار و غیرماندگار در کانال مستقیم در شرایط آزمایشگاهی دریافتند که میزان حجم رسوب انتقالی در شرایط جریان غیرماندگار همواره بیشتر از مقدار آن در حالت جریان ماندگار است.^{۱۶} کوهنل^۳ (۱۹۹۲)، در بررسی جریان کف در رودخانه‌ی ماسه‌بی در ایالات متحده‌ی آمریکا مشاهده کرد که میزان بار کف در طول شاخه‌ی صعودی هیدروگراف در برابر شاخه‌ی نزولی در شرایط جریان‌های شدید افزایش یافته است.^{۱۷} در آزمایش‌های وانگ^۴ و همکاران (۱۹۹۴)، فاصله‌ی زمانی بین وقوع نقطه‌ی اوج سیلاب و دبی اوج رسوب مشاهده شد که آن را تأخیر ایترسی کف نام‌گذاری کردند.^{۱۸} کوه^۵ (۲۰۰۲)، جریان غیرماندگار در کانال‌های روباز را بر روی بستر ثابت و متحرک در شرایط آزمایشگاهی بررسی کرد. وی جهت محاسبه‌ی دبی جریان در شرایط یکنواخت و ماندگار از پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده استفاده کرد و سپس ۱۲ سری آزمایش جریان غیرماندگار با استفاده از هیدروگراف‌های مثلثی بر روی بستر متحرک انجام داد و دریافت که پروفیل لگاریتمی سرعت برای جریان‌های غیرماندگار با انتقال بار کف در ناحیه‌ی خطی جریان وجود دارد و حرکت بار کف با پایداری و دوام جریان کاهش می‌یابد.^{۱۹} لی^۶ و همکاران (۲۰۰۴)، نیز پژوهش‌های آزمایشگاهی در مورد روند انتقال بار کف تحت شرایط جریان ماندگار انجام دادند و دریافتند که تأخیر زمانی بین دبی بیشینه‌های هیدروگراف و سدیکراف رسوب (تغییرات دبی رسوب به زمان) وجود دارد، که متأثر از اندازه‌ی قطر ذرات رسوبی است.^{۱۹} وو^۷ و همکاران (۲۰۰۴) مدل‌سازی عددی یک‌بعدی در شرایط انتقال بار رسوبی غیریکنواخت را تحت شرایط جریان غیرماندگار پیشنهاد کردند و به مقایسه‌ی برآورد رسوب‌های انتقالی با ۴ مدل معمولی استفاده شده و مدل عددی ساخته شده توسط خودشان پرداختند و نشان دادند که مدل عددی ارائه شده، نتایج رضایت‌بخشی را ارائه می‌کند.^{۱۱}

هو و آبراهام^۸ (۲۰۰۵)، با انجام یک سری آزمایش‌ها، به تعریف مقاومت بستر پرداختند و مقاومت بستر در شرایط بستر متحرک را به دو قسمت اصطکاک ذرات و اثر تغییر شکل بستر تفکیک و اشاره کردند که مقاومت مربوط به تغییر فرم بستر را مستقیماً نمی‌توان اندازه‌گیری کرد و باید در ابتدا، مقاومت کل را در مورد بسترهای متحرک برآورد کرد و سپس با برآورد مقاومت مربوط به ذرات از اختلاف دو مقدار به دست آمده به مقاومت مربوط به تغییر فرم بستر رسید.^{۱۲}

حسن و همکاران (۲۰۰۶)، تأثیر افزایش تدریجی رودخانه‌های شنی در شرایط آزمایشگاهی را بررسی کردند. ایشان ابتدا آزمایش‌هایی با استفاده از هیدروگراف‌های متقارن و نامتقارن انجام دادند و دریافتند که تأخیر زمانی بین دبی اوج هیدروگراف جریان و سدیکراف (تغییرات دبی رسوب به زمان) در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت با هیدروگراف متقارن وجود دارد.^{۱۳} بمبار^۹ و همکاران (۲۰۱۱)، با بررسی یک سری آزمایش بر روی بار کف در شرایط جریان غیرماندگار، تعدادی از هیدروگراف‌های مثلثی و دوزنقه‌یی را بر روی بستر متحرک برقرار کردند و نشان دادند که میزان انتقال بار بستر در اثر تغییرات زمان هیدروگراف‌های مثلثی و دوزنقه‌یی، به اندازه‌ی ۱۱ و ۳۰ ثانیه تأخیر زمانی از زمان پایه‌ی هیدروگراف‌های جریان ورودی دارند.^{۱۵} بیلی^{۱۰} (۲۰۱۱)، میزان جریان و نرخ رسوب انتقالی را برای رودخانه‌ی فصلی گرب - اودا، که دارای کف شن و ماسه است، در فصل‌های جولای و آگوست اندازه‌گیری کرد. وی ابتدا عدد فرود جریان را جهت بررسی شرایط فوق‌بحرانی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های رسوب محاسبه و سپس تغییرات غلظت رسوب‌های معلق با دبی را آنالیز و منحنی‌های ساده‌ی برای انتقال بار کف و معلق استخراج کرد. همچنین تعدادی از معادلات پیش‌بینی بار کف را برای سری داده‌های رودخانه‌ی مطالعاتی بررسی کرد.^{۱۴}

کیورانی و شانه‌ساززاده (۲۰۱۴) در بررسی تأثیر عوامل مؤثر در انتقال بار بستر در جریان ماندگار دریافتند که بیشترین اثر، مربوط به اندازه و شکل ذرات بستر است، به طوری که در طول پرش و تا حدی در سرعت متوسط آن تأثیرگذار است.^{۱۵} مطالعات طبرستانی و زراتی^{۱۱} (۲۰۱۴) نشان داد که خصوصیات جریان از جمله توزیع سرعت و تنش برشی در زمان هیدروگراف ورودی در نرخ انتقال رسوب تأثیرگذار است. همچنین شدت جریان هیدروگراف در شاخه‌ی بالارونده از شاخه‌ی پایین‌رونده بیشتر است، که این افزایش ارتباط مستقیمی با نرخ بار رسوب دارد.^{۱۶} ماورین^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۶)، میزان بار بستر در شرایط سیلابی را بررسی کردند و دریافتند که دو مشخصه‌ی شکل ذرات رسوبی بستر و شیب کانال در فرسایش بستر تأثیرگذار است.^{۱۷} یانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۶)، در بررسی آزمایشگاهی انتقال رسوب بر روی بسترهای ریبیل^{۱۴}، مهم‌ترین مشخصه‌ی فرسایش بسترهای ریبیلی را سرعت جریان آب معرفی کرده‌اند.^{۱۸}

ماروکوسکا^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۸) در شرایط آزمایشگاهی با کانال ۱۲ متری و با دبی‌های ۱/۳ و ۴۵/۶ لیتر بر ثانیه با تولید دو هیدروگراف مثلثی شکل با سنگ‌های گردگوشه و گوشه‌دار، میزان انتقال بار بستر تحت جریان غیرماندگار را بررسی کردند. تراز سطح آب در آزمایش آنها ۲ تا ۱۱ سانتی‌متر و وزن رسوب‌های انتقالی بین ۴/۵ تا ۱۴/۲ کیلوگرم در مدت زمان ۸۰۰ بوده است. ایشان همچنین تأثیر میزان بار کف در تنش برشی و قدرت جریان آبراهه را بررسی کردند و دریافتند که نرخ انتقال رسوب به پارامتر غیرماندگار و فرم بستر وابسته است. همچنین میزان تنش برشی و قدرت جریان با افزایش دبی بارکف کاهش می‌یابد.^{۱۹}

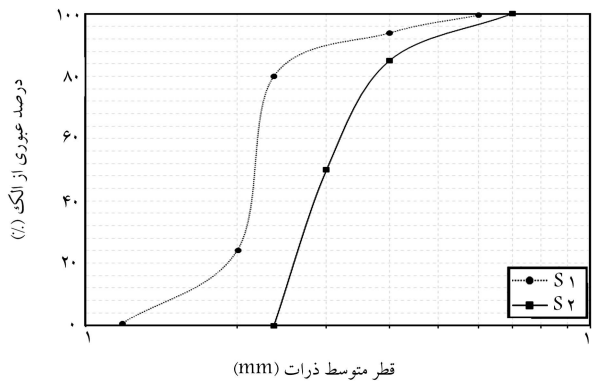
مائو^{۱۶} (۲۰۱۸)، تأثیر سیلاب در انتقال رسوب در رودخانه‌های با بستر شنی را بررسی کرد. شرایط رسوبی و نوع هیدروگراف ورودی نیز در شکل الگوهای هیستریزیک تأثیر به‌سزایی دارد. وی تأثیر زمان‌بندی تداوم جریان غیرماندگار بر انتقال بار بستر را با سه نوع هیدروگراف پله‌یی و متقارن شبیه‌سازی کرد و نتایج وی نشان داد که الگوی هیستریزیک بعد از اولین سیلاب، صعودی است و به دلیل سپردگی^{۱۷} ذرات رسوبی، نزولی می‌شود.^{۲۰}

اولفورد^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۹)، تأثیر مدت زمان سیلاب در پایداری بستر حاوی رسوب‌های غیرچسبیده را با دانه‌بندی یکسان ۴/۸ میلی‌متر و یکنواخت بررسی کردند و ۶۰ سری آزمایش با زمان‌های ۵ تا ۹۶۰ دقیقه انجام دادند و دریافتند که میانگین تنش برشی به میزان ۱۸٪ افزایش یافته و همچنین تنش برشی بحرانی و میزان انتقال رسوب به صورت غیرخطی بوده است.^{۲۱}

ژیوا^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی تأثیر جریان غیرماندگار برای انتقال رسوب در شرایط آزمایشگاهی به طول ۶ متر با هیدروگراف‌های طبیعی، از طریق تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که غیرماندگاری جریان، عامل تسهیل‌کننده برای حرکت رسوب‌هاست و روی رفتار بارکف در اثر افزایش زمان هیدروگراف روند کاهشی داشته و زمان نقطه‌ی اوج دبی جریان نسبت به نقطه‌ی اوج دبی رسوب زودتر رخ داده است.^{۲۲}

دووان^{۲۰} و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی آزمایشگاهی انتقال رسوب‌های بار کف از نوع یکنواخت و غیریکنواخت تحت شرایط جریان غیرماندگار دریافتند که میزان انتقال رسوب برای ذرات رسوبی یکنواخت و غیریکنواخت با قطر متوسط یکسان متفاوت است. همچنین تحلیل نتایج آنها نشان داد که زمان حرکت و انتقال رسوب‌ها تحت جریان غیرماندگار نسبت به شرایط ماندگار به سهولت اتفاق می‌افتد و فاصله‌ی زمانی آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی در شرایط جریان غیرماندگار نسبت به شرایط جریان ماندگار بسیار طولانی است.^{۲۳}

خسروی و همکاران (۲۰۱۹) انتقال بار بستر یکنواخت با دانه‌بندی‌های مختلف



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی نمونه‌ی خاک‌های انتخابی.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ی خاک‌ها.

مؤلفه	S۱	S۲
S_0	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴
d_{10}	۱/۷۵	۲/۵۵
d_{16}	۱/۸۱	۲/۵۷
d_{50}	۲/۱	۳/۰
d_{60}	۲/۱۵	۳/۱
d_{84}	۲/۵۵	۴/۱
δ_g	۱/۱۹	۱/۲۶
D_g	۲/۱۵	۳/۲۵
Cu	۱/۲۳	۲/۲۱

عبوری از الک، انحراف معیار (δ_g)، اندازه‌ی متوسط (D_g) و ضریب یکنواختی (Cu) ذرات رسوب انتخابی با استفاده از روابط ۱ الی ۳ محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

$$D_g = \sqrt{D_{16} \times D_{84}} \quad (1)$$

$$\delta_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (2)$$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

۳.۲. جریان غیرماندگار

سیستم ایجاد جریان غیرماندگار در ابتدای کانال نصب و جریان در فاصله‌ی ۱۲۰ سانتی‌متری وارد بستر با دانه‌بندی متحرک شده است. دبی اوج هیدروگراف‌های ورودی، با توجه به اندازه‌ی دانه‌بندی رسوب و از طریق اینورتر تعیین شده است. دبی جریان بین ۳۳/۷ تا ۴۴/۴ لیتر بر ثانیه بر عرض واحد بوده است. برای تولید هیدروگراف، یک سیستم الکترومکانیک، که شامل مخزن با یک روزنه‌ی دایره‌ی در کف و یک مخروط فلزی متصل به یک سیستم الکترومکانیکی که با باز و بسته کردن تدریجی مجرا، برای عبور جریان با هد ثابت از روزنه‌ی دبی متغیر به وجود می‌آورد، طراحی شده است.

پس از کالیبراسیون سیستم هیدرولیکی و با توجه به ارتفاع بیشینه‌ی آب در تانک (۱۱۴ سانتی‌متر) و نیز میزان عبور بیشینه‌ی جریان هیدروگراف‌های تولیدی ارزیابی شده است. هیدروگراف‌های تولیدی از طریق اندازه‌گیری جریان ورودی به کانال و از طریق سرریز لایه‌ی تیز برداشت شده‌اند. از طرفی با توجه به کم بودن زمان، پایه‌ی

و با نسبت وزنی یکسان تحت جریان غیرماندگار را در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر و عرض ۵/۰ متر ارزیابی کردند و دریافتند که دبی انتقال رسوب‌های ریزدانه نسبت به رسوب‌های گوشه‌دار کمتر بوده و همچنین زمان آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی گوشه‌دار در شرایط افزایش دبی نسبت به رسوب‌های ریزدانه تقدم داشته است.^[۲۴] وانگ و همکاران (۲۰۱۹)، میزان انتقال رسوب انتقالی تحت شرایط جریان غیرماندگار را در یک کانال با بستر ثابت بررسی کردند و آزمایش‌هایی برای انتقال رسوب در فلوم آزمایشگاهی به طول ۲۲، عرض ۷۵/۰ و عمق ۵/۰ متر با دبی ۱۷ لیتر بر ثانیه و شیب کف ۰/۰۲ و دو نمونه‌ی خاک از نوع گراول با دانه‌بندی ۴۰ و ۲۰ میلی‌متر و شن درشت با دانه‌بندی ۱/۹۵ میلی‌متر انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که میزان اندازه‌ی هیدروگراف و پارامتر غیرماندگار تأثیر به سرایی در نرخ انتقال رسوب دارد. همچنین میزان رسوب انتقالی در جریان‌های غیرماندگار در شاخه‌ی صعودی هیستریزس هیدروگراف نسبت به شاخه‌ی پایین‌رونده متفاوت است.^[۲۵] از آن‌جا که وجود شکل‌های بستر تأثیر زیادی در مشخصات جریان، به خصوص مقاومت جریان، می‌گذارند و همچنین تأثیر متقابلی که شکل‌های بستر و نرخ انتقال رسوب در یکدیگر دارند، مطالعه و بررسی آثار مذکور و رابطه‌ی آنها با ابعاد شکل‌های بستر اهمیت خاصی دارد.^[۲۶]

همان‌طور که اشاره شد، پژوهشگران مختلفی در بررسی باربستر انتقالی در شرایط جریان غیرماندگار، آزمایش‌هایی انجام دادند. نمونه‌برداری از رسوب در آزمایش‌های آنها به صورت الکترونیکی بوده و با لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته لازم داشته و یا به طور کلی در انتهای کانال در بازه‌های زمانی کوتاه مدت جمع‌آوری شده است. هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی آزمایشگاهی انتقال بارکف تحت جریان غیرماندگار بوده است.

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر، در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد صورت گرفته و در بخش حاضر، مبانی تئوری و تجهیزات آزمایشگاهی ارائه شده است.

۱.۲. فلوم آزمایشگاهی

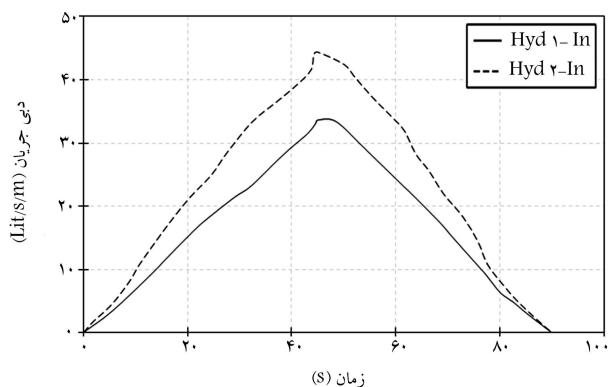
آزمایش‌ها در یک کانال با جداره‌های شیشه‌ی شفاف و کف فلزی صیقلی رنگ شده به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر انجام شده‌اند. کانال مذکور، قابلیت شیب‌پذیری داشته و از دو شیب ۰/۰۰۶ و ۰/۰۱۴ استفاده شده است. طول بستر متحرک بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقدماتی و با توجه به دبی بیشینه، بزرگ‌ترین هیدروگراف و اندازه‌ی قطر ریزترین ذرات مواد بستر انتخابی برابر با ۲۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است، که با اضافه کردن بستر صلب هم‌زیربستر متحرک به میزان ۲۰۰ سانتی‌متر به منظور حذف تغییرات جریان در پایین‌دست به ۴۰۰ سانتی‌متر افزایش یافته است.

۲.۲. دانه‌بندی خاک

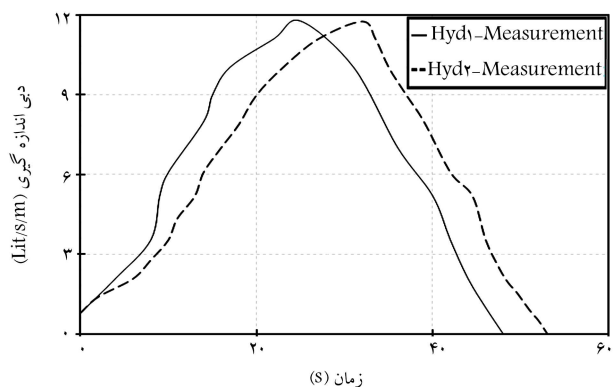
به منظور تعیین منحنی دانه‌بندی و برآورد قطر متوسط ذرات تشکیل‌دهنده‌ی خاک، مدل‌های آزمایشی به روش استاندارد ASTM^[۲۷] تهیه شده‌اند و منحنی دانه‌بندی خاک‌های انتخابی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همچنین مشخصات مربوط به اندازه‌های ۱۰، ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد قطر ذرات

جدول ۲. مشخصات هیدروگراف‌های استفاده شده در آزمایش.

هیدروگراف	دبی اوج هیدروگراف جریان	مدت زمان شاخه‌ی صعودی	مدت زمان شاخه‌ی نزولی
جریان	(Li/sec/m)	(sec)	(sec)
Hyd ۱-I	۳۳/۷	۴۵	۴۵
Hyd ۲-I	۴۴/۴	۴۵	۴۵
Hyd ۱-M	۱۱/۷۶	۲۵	۲۳
Hyd ۲-M	۱۱/۷۶	۳۲	۴۳



شکل ۴. هیدروگراف‌های جریان ورود.



شکل ۵. هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده.

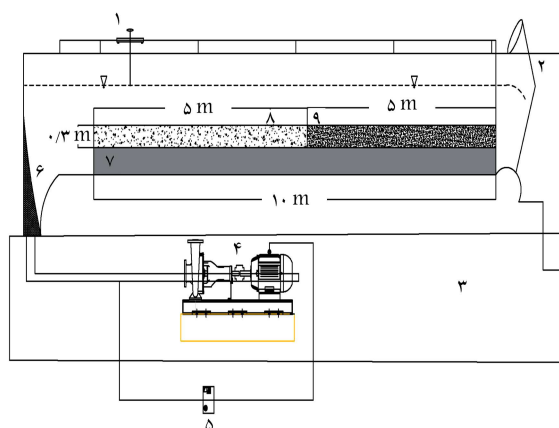
(شکل ۵). مدت زمان شاخه‌های صعودی و نزولی در هیدروگراف‌های مثلثی، متقارن با یکدیگر و معادل ۴۵ ثانیه بودند. همچنین مشخصات هیدروگراف‌های تولید شده در جدول ۲ ارائه شده است. هیدروگراف‌های تولیدی همچون یک موج جریان عمل کرده و زمان تولید آنها کوتاه بوده است (شکل ۶).

۴.۲. معادلات حاکم بر شدت جریان و انتقال رسوب

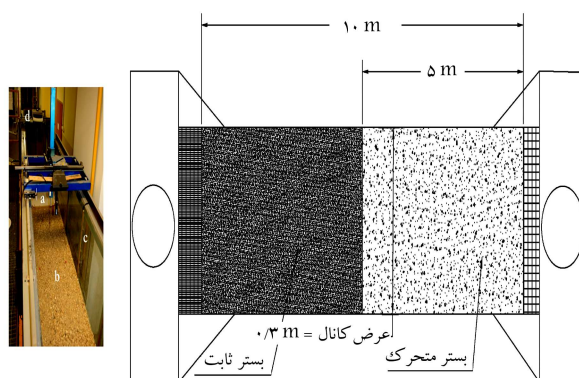
برآورد شدت جریان در شرایط ماندگار در مجاری باز از رابطه‌ی مانینگ^{۲۱} رابطه‌ی ۴ امکان‌پذیر است:

$$Q_0 = AS_0^{1/2} R_h^{2/3} n^{-1} \quad (4)$$

که در آن، A سطح مقطع جریان (مترمربع)، S_0 شیب بستر (متر بر متر)، R_h شعاع هیدرولیکی (متر)، n ضریب زبری مانینگ و Q_0 شدت جریان (متر مکعب بر ثانیه)



شکل ۲. نمای شماتیک از سیستم آزمایشگاهی (۱- عمق سنج مکانیکی، ۲- دریچه‌ی خروجی، ۳- مخزن آب، ۴- پمپ، ۵- تنظیم‌کننده‌ی جریان، ۶- آرام‌کننده‌ی جریان، ۷- بستر صلب، ۸- بستر متحرک، ۹- بستر ثابت).



شکل ۳. الف) پلان بستر رسوبی استفاده شده، ب) تجهیزات استفاده شده (a- عمق سنج مکانیکی، b- بستر ثابت، c- متر، d- عمق سنج الکترونیکی).

هیدروگراف‌ها و همچنین ابزار لازم برای ثبت تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان در زمان کوتاه موجود نبود، لذا تغییرات عمق جریان در طول بستر در فواصل ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۳۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر از ابتدای ورودی بستر (به ازاء هر دبی) از طریق عکس‌برداری برای هر هیدروگراف و نیز تغییرات اخیر در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر بعد از بستر متحرک توسط ۲ دوربین ثبت شده‌اند (شکل ۲). مقادیر زمان تغییرات عمق آب و تراز بستر از تصاویر برداشت شده و توسط نرم‌افزار Plot Digitizer استخراج شده‌اند. در شکل‌های ۳ و ۴، تجهیزات و سیستم آزمایشگاهی مشاهده می‌شوند.

هیدروگراف‌های تولیدی مثلثی با زمان پایه‌ی ۹۰ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند

برای مقایسه بین رسوب‌های مختلف انتقالی، اینشتین (۱۹۴۲)، رابطه‌ی ۱۲ را با در نظر نگرفتن آستانه‌ی حرکت برای رسوب‌های یکنواخت معرفی کرده است: [۲۳]

$$q_b^* = \frac{q_b}{\rho_s \sqrt{(\rho_s - \rho) g d_{50}^3}} \quad (12)$$

که در آن، q_b میزان دبی رسوب بارکف ($\frac{Kg}{m.s}$)، ρ_s و ρ به ترتیب جرم مخصوص ذرات و جرم مخصوص آب و d_{50} اندازه‌ی متوسط ذرات (mm) هستند. همچنین کل شار رسوب انتقالی در طول هیدروگراف جریان غیرماندگار را می‌توان با عملکرد بار کل رسوب انتقالی نرمال به صورت رابطه‌ی ۱۳ محاسبه کرد: [۱۰]

$$W_t^* = \frac{W_t}{\rho_s b d_{50}^2} \quad (13)$$

که در آن، W_t کل وزن بار رسوب انتقالی (kg) و W_t^* عملکرد رسوب انتقالی هستند و سایر پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

۵.۲. تحلیل ابعادی

روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان مستقیماً از قوانین حاکم بر سیالات و تئوری‌های موجود، نظیر: قوانین بقای جرم، انرژی و ممنتوم به دست آورد. در چنین مواردی برای استخراج رابطه‌ی ریاضی حاکم بر چنین پدیده‌هایی، ابتدا کلیه‌ی متغیرهای مؤثر را در نظر گرفته و سپس به روش آنالیز ابعادی، گروه‌های بی‌بعد مؤثر تعیین و تغییرات آنها از طریق نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است. عوامل مؤثر در روند انتقال بارکف را می‌توان به ۵ گروه تقسیم‌بندی کرد:

۱) خواص سیال (μ, ρ, S_g)، به ترتیب: لزجت سیال، وزن مخصوص و جرم.

۲) خواص موج ($\Delta t, A, y_m$)، به ترتیب: زمان پایه‌ی هیدروگراف، حجم آب زیر هیدروگراف در واحد عرض و عمق بیشینه.

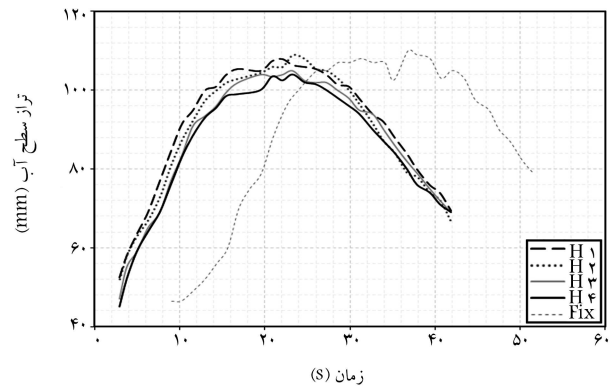
۳) ویژگی‌های کانال ($L, b, S, U^* b, \eta, \eta a, \eta x, \eta'$)، به ترتیب: خصوصیات طول کانال، عرض، شیب، سرعت برشی، ضریب شکل هندسه‌ی مقطع، عامل تصحیح محور طولی کانال و تغییر مقطع عرضی کانال.

۴) ویژگی‌های رسوب ($\rho_s, ds, G_e, G_s, \delta_P, X, \lambda$)، به ترتیب: جرم مخصوص، قطر ذرات، غیریکنواختی ذرات رسوب در طول محیط خیس شده، عامل شکل ذرات رسوب، نفوذپذیری ذرات رسوب و یا دیواره‌های کانال، چسبندگی ذرات و تخلخل ذرات بستر.

۵) جریان پایه (U_0, Y_0, Z_0)، به ترتیب: سرعت جریان، عمق و تراز کف بستر.

$$\left[\frac{y}{y_0}, \frac{U}{U_0}, \frac{Z}{Z_0}, C \right] = f \left[Fr, Re, \frac{A}{y.L}, \frac{L}{y}, \frac{b}{y}, S, \tau_c^*, \eta, \eta a, \eta x, \eta', \frac{ds}{y}, S_g \right] \quad (14)$$

$$\left[\frac{y}{y_0}, \frac{U}{U_0}, \frac{Z}{Z_0}, C \right] = f \left[Fr, T, \frac{A}{y.L}, \frac{L}{y}, \frac{b}{y}, S, S_s, n, \frac{X}{L}, \frac{ds}{y}, \frac{Z_0}{y}, \lambda, \frac{t}{y/U} \right] \quad (15)$$



شکل ۶. مقایسه‌ی پروفیل سطح آب برای آزمایش S_1 .

است. جریان غیرماندگار از طریق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود. [۲۸]

$$Q = BCy^{1/5} \sqrt{\left(S_0 + \frac{\partial A}{\partial Q} \frac{\partial y}{\partial t} \right)} \quad (5)$$

در کانال مستطیلی عریض، دبی در واحد عرض با عمق جریان طبق رابطه‌ی مقاومت به صورت $q=vh$ تغییر پیدا می‌کند. بنابراین شکل ساده‌ی معادله‌ی انتشار موج و رابطه‌ی سرعت موج در جریان آب به صورت رابطه‌ی ۶ است: [۲۹]

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial A} \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

نسبت شدت جریان در شرایط غیرماندگار (Q) به شرایط در حالت دائمی (Q_0) وابسته به سرعت برشی جریان پایه (U_0) و خصوصیات موج جریان ($\frac{\partial y}{\partial t}$) یا تابع عدد غیرماندگاری (Γ) است. عدد غیرماندگاری (Γ) توسط (سوسکا و گراف ۱۹۸۵)، [۶] و (سوسکا (۱۹۸۷))، [۳۰] برای توصیف کمی میزان تغییرات جریان در زمان عبور هیدروگراف معرفی شده است، که مورد توجه سایر پژوهشگران از جمله: (وانگ و همکاران (۲۰۱۵))، [۳۱] (خسروی و همکاران (۲۰۱۹))، [۳۲] (وانگ و همکاران (۲۰۱۹))، [۲۵] (وانگ و همکاران (۲۰۲۱))، [۳۳] بوده است.

$$\Gamma = \frac{1}{U_*} \frac{\partial y}{\partial T} \quad (7)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = f \Gamma \quad (8)$$

نرخ رسوب انتقالی به شدت جریان وابسته است. نسبت دبی رسوب در شرایط جریان غیرماندگار (Q_R) به جریان ماندگار (Q_{R0}) را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۹ بیان کرد:

$$\frac{Q_R - Q_{R0}}{Q_{R0}} = f \left(\frac{1}{U_*} \cdot \frac{\partial y}{\partial T} \right) \quad (9)$$

برای بررسی شکل هیدروگراف‌های جریان ناپایدار، لی و همکاران (۲۰۰۴) و بمبار و همکاران (۲۰۱۱)، رابطه‌ی ۱۰ را برای کل کار انجام شده پیشنهاد کرده‌اند: [۱۰]

$$W_K = \frac{u_b^{*2} Vol}{g H_b^3 B} \quad (10)$$

که در آن، u_b^* سرعت برشی پایه (m/s)، Vol حجم کل هیدروگراف (m^3)، H_b عمق جریان پایه B عرض کانال (m)، W_K کل کار انجام شده و پارامتر غیرماندگاری است: [۱۰]

$$q_s = f(W_K, \Gamma) \quad (11)$$

جدول ۳. بررسی معلق شدن ذرات رسوب بار بستر.

$\frac{h_s}{d_s}$	θ_C	$\frac{U_*}{\omega_s}$	ω_s (m/s)	U_* (m/s)	R (m)	y_{max} (m)	S_0
۳/۵	۰/۱۴	۰/۳۷	۰/۱۵	۰/۰۵۷	۰/۰۵۶	۰/۰۸۳	۰/۰۰۶
	۰/۰۲۱	۰/۴۶	۰/۱۸	۰/۰۳۸	۰/۰۵	۰/۰۷۵	۰/۰۱۴

متغیر بوده است، برای رسیدن به نسبت‌های مشخص $\frac{h_s}{d_s}$ ، دبی جریان پایه نیز تغییر خواهد کرد. لذا نسبت مذکور چنان انتخاب شده است که ریزترین ذرات بستر برای بیشترین عمق جریان، پایه‌ی حرکتی نداشته باشند.

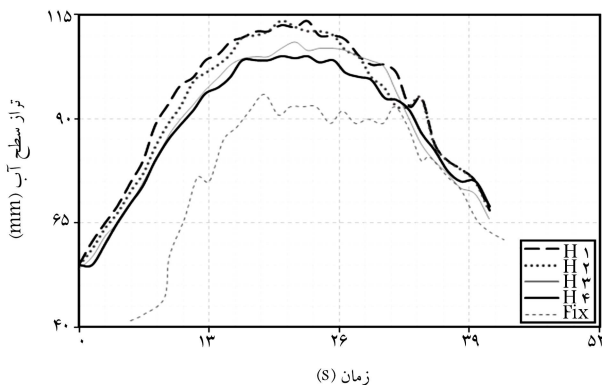
با توجه به مقادیر جدول ۳ مشاهده می‌شود که در تمامی شیب‌های انتخابی، نسبت بی بعد $(\frac{U_*}{\omega_s})$ بیشتر از مقدار پیشنهادی انگولند شده و با توجه به معیار بگنولد می‌توان نتیجه گرفت که ذرات رسوبی بستر استفاده شده در آزمایش، معلق بوده‌اند، که مشاهدات چشمی نیز آن را تأیید می‌کند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی پروفیل‌های سطح آب

همان‌گونه که در آبراهه‌های کم عمق، جریان در فرم بستر تأثیر می‌گذارد و شکل آن را تغییر می‌دهد، اثر متقابل آن، شکل سطح آب را متأثر خواهد کرد. به نظر می‌رسد تجمیع شرایط ذکر شده، خصوصیات هیدرولیکی جریان، مانند سرعت و عدد فرود، را نسبت به بسترهای غیرمتحرک متفاوت می‌کند. چنانکه در جریان‌های اشاره شده به وضوح مشاهده می‌شود، وقوع مقادیر حدی پارامترهای موجود (سرعت، دبی، تنش برشی، عدد فرود و ...) هم‌زمان رخ نمی‌دهد و تفاوت زمانی شرایط وقوع، تابع شرایط بستر و خصوصیات تراز جریان است. در شکل‌های ۶ و ۷، پروفیل سطح آب برای آزمایش‌های S_1 و S_2 مشاهده می‌شود.

با توجه به پروفیل‌های به دست آمده برای نقاط مختلف در طول بستر مشخص است که تغییرات عمده‌ی به وجود آمده در سطح بستر، در ابتدای آن بیش از سایر نقاط بوده و در نقاط دوم و سوم که بخشی از رسوب‌ها جابه‌جا و در مناطق مذکور جمع شده‌اند، به دلیل کاهش سطح مقطع، سرعت افزایش و عمق جریان کاهش یافته است. نقاط بعدی به سمت پایین دست نیز به لحاظ این‌که تحت تأثیر موج رسوبی قرار نگرفته است، تغییر فرم زیادی نداشته و لذا مقاومت ایجاد شده در برابر جریان در نقاط اشاره شده کمتر و سطح بستر یکنواخت‌تر و تراز سطح آب در چنین نقاطی نسبت به نقاط قبلی کمتر بوده است.



شکل ۷. مقایسه‌ی پروفیل سطح آب برای آزمایش S_2 .

از مجموعه گروه‌های بدون بعد ذکر شده (روابط ۱۴ و ۱۵)، روابط ۱۶ الی ۱۹ در انتقال بار کف تحت تأثیر جریان غیرماندگار، اهمیت بیشتری دارند.

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd_i} = \frac{R_h S_0}{(s - 1)d_s} \quad (16)$$

$$Re^* = \frac{\sqrt{gR_h S_0} d_s}{\nu} \quad (17)$$

$$Fr^* = \frac{Q_p}{\sqrt{(s - 1)gd_s^3}} \quad (18)$$

$$\kappa = \frac{Q_s}{Q_p \rho (s - 1)} \quad (19)$$

که در آنها، τ^* پارامتر شیلدز، τ تنش برشی، R_h شعاع هیدرولیکی، S_0 شیب کف، Re^* رینولدز برشی ذره، Fr^* فرود ذره، ρ و ρ_s به ترتیب جرم مخصوص ذرات و جرم مخصوص آب، d_i قطر ذره، Q_p دبی بیشینه‌ی هیدروگراف، Q_s دبی رسوب، K پارامتر وابسته، d_s قطر ذرات و g شتاب ثقل هستند. تشخیص شرایط جریان بر مبنای پارامتر بدون بعد رینولدز است، چنانچه مقدار آن در کانال‌ها بیش از ۲۰۰۰ باشد، آن‌گاه جریان آشفته خواهد بود.

۳.۲. شرایط معلق شدن ذرات

معیارهای مختلفی برای کنترل شرایط معلق بودن ذرات وجود دارد، که نشان‌دهنده‌ی حرکت ذرات به صورت بار کف هستند، که به نسبت $(\frac{U_*}{\omega_s})$ بستگی دارد، که در آن ω_s سرعت سقوط ذرات حالت مستغرق است و U_* از رابطه‌ی ۲۰ به دست می‌آید. نسبت $(\frac{U_*}{\omega_s})$ ، که به عنوان معیار بگنولد^{۲۳} شناخته می‌شود، واحد بوده و طبق پیشنهاد انگولند^{۲۴} مساوی ۰/۲۵ است و در صورتی که نسبت اخیر کمتر از مقدار پیشنهادی باشد، آن‌گاه حرکت ذرات فقط به صورت بار کف است. [۲۳، ۲۴] رویی برای برآورد سرعت سقوط ذرات (ω)، روابط ۲۱ و ۲۲ ارائه کرده است. [۲۶]

$$U_* = \sqrt{gR_h S_0} \quad (20)$$

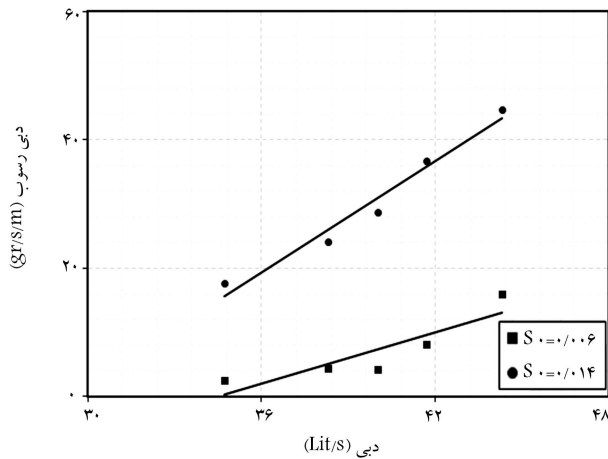
$$\omega_s = \frac{\sqrt{2.13g(G_s - 1)d_{s_0}^3 + 36\nu^2} - 6\nu}{D_{s_0}} \quad d < 2mm \quad (21)$$

$$\omega_s = 3.22(d_{s_0})^{0.5} \quad d > 2mm \quad (22)$$

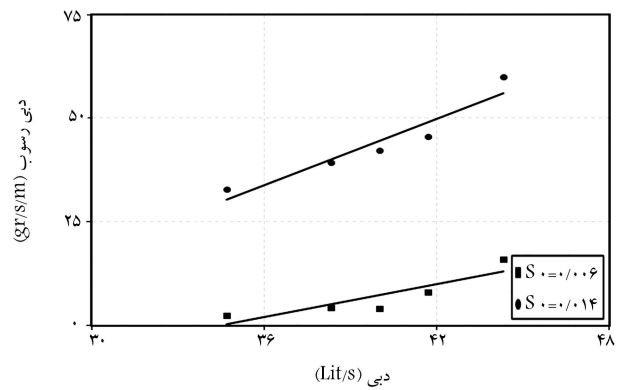
که در آنها، g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، R_h شعاع هیدرولیکی جریان (متر)، S_0 شیب کف کانال (متر بر متر)، G_s چگالی ذرات رسوب و ν لزجت سینماتیک سیال هستند.

در آزمایش‌های پژوهش حاضر از دو شیب ۰/۰۰۶ و ۰/۰۱۴ برای بستر رسوبی استفاده شده است. بیشینه‌ی عمق جریان در دو شیب اخیر برابر با ۷/۹ و ۸/۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. در جدول ۳، مقدار بی‌بعد $(\frac{U_*}{\omega_s})$ برای شیب‌های مختلف بستر ارائه شده است.

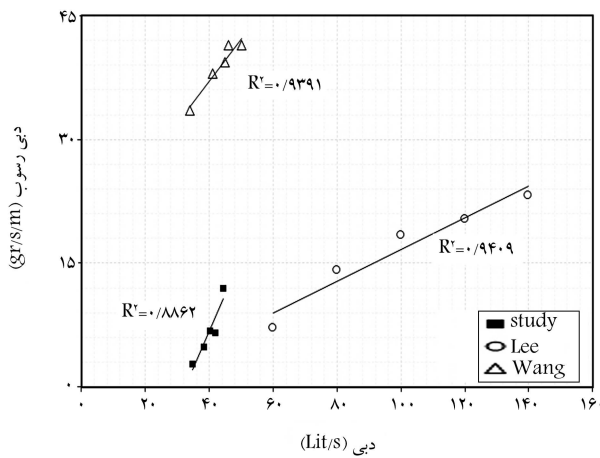
برای کنترل میزان خروجی پمپ، آن را از طریق میزان بازشدگی شیرخروجی و به روش حجمی، کالیبره کرده و چون شیب بستر در حالت‌های مختلف آزمایشی



شکل ۸. مقایسه‌ی دبی متوسط بارکف با $D_{50} = 2/1 mm$.



شکل ۹. مقایسه‌ی دبی متوسط بارکف با $D_{50} = 3/0 mm$.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج روند تغییرات دبی رسوب انتقالی.

میزان رسوب انتقالی در شیب بیشتر، علی‌رغم این‌که افزایش نامحسوسی نسبت شیب کمتر دارد، به هر صورت مؤید نتیجه‌گیری قبلی است. همچنین با توجه به پایین بودن مقادیر دبی بیشینه‌ی هیدروگراف‌های انتخابی، حساسیت شیب در نتایج اخیر واضح‌تر بوده و روند انتقال رسوب کنترل شده است. البته ذکر این نکته لازم است که عرض کم کانال آزمایشی در میزان رسوب انتقالی مؤثر خواهد بود، که این موضوع در گزارش حاضر، مطالعه و بررسی نشده است.

در دانه‌بندی ۲/۱ میلی‌متر، نتایج تحقیقات لی (۲۰۰۴)^[۱۰] قابل مقایسه با نتایج مطالعه‌ی حاضر است. نکته‌ی قابل توجه این‌که زمان پایه‌ی هیدروگراف‌های آزمایش‌های وی طولانی و بین ۱۲۶۰ تا ۴۸۰۰ ثانیه تغییر می‌کرده است. عمق جریان پایه حدود ۸۸/۰ متر و دبی پایه ۴۰ لیتر بر ثانیه بر واحد عرض، دبی بیشینه‌ی هیدروگراف‌ها بین ۵۰ تا ۱۴۰ لیتر بر ثانیه بر واحد عرض متغیر در نظر گرفته شده است. علی‌رغم این‌که شرایط اولیه در آزمایش‌های کاون با مطالعه‌ی حاضر، در بیشتر موارد متفاوت است؛ ولی در شرایط خاصی امکان سنجش کلی نتایج از دو روش وجود دارد.

در شکل ۱۰، نتایج مربوط به دانه‌بندی ۲/۱ میلی‌متر، با نتایج لی و همکاران (۲۰۰۴)^[۱۰] و وانگ و همکاران (۲۰۱۹)^[۲۵] مقایسه شده است. علی‌رغم این‌که از نظر شیب و دبی جریان در مطالعات انجام شده تفاوت وجود دارد، اما روند تغییرات دبی رسوب انتقالی از آزمایش‌های لی و وانگ با نتایج پژوهش حاضر، هماهنگی

مقایسه‌ی فاصله‌ی تراز سطح آب در منحنی‌های مربوط به دانه‌بندی ۳ میلی‌متر (S_1) در نقاط مختلف با منحنی‌های مربوط به دانه‌بندی ۲/۱ میلی‌متر (S_2) نشان می‌دهد که اولاً، تراز کلی سطح آب در دانه‌بندی ۳ میلی‌متر به دلیل شیب زیاد در آزمایش‌های مذکور کمتر بوده است. اما اختلاف تراز سطح آب در نقاط مختلف در طول بستر نیز کمتر از منحنی‌های مشابه در دانه‌بندی ۲/۱ میلی‌متر بوده است.

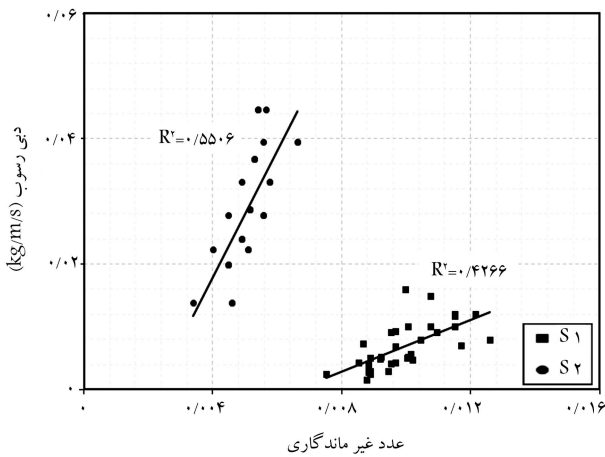
۲.۳. بررسی دبی بارکف در شرایط غیرماندگار

گرف ۲۵ (۱۹۹۸)، با بیان رابطه‌ی پیوستگی و مومنتم و معادله‌ی شزی^{۲۶} به ارائه‌ی رابطه‌ی اصلی جریان غیرماندگار پرداخته و به تغییرات زمانی متغیرهایی، از جمله: ضرایب مقاومت داریسی، شیب خط انرژی، ضریب مقاومت شزی، سرعت برشی، سرعت، دبی و عمق جریان نسبت به زمان توجه کرده است.^[۲۷] بیشینه‌ی عمق جریان همواره بعد از دبی بیشینه رخ می‌دهد و سرعت متوسط نیز قبل از دبی بیشینه وقوع می‌یابد.^[۲۷، ۲۸]

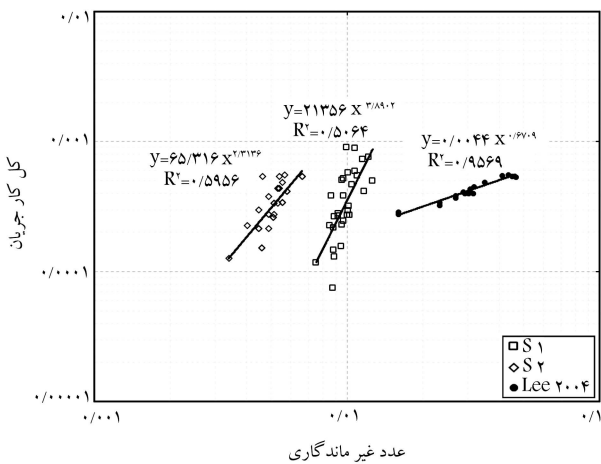
رودخانه‌های فصلی معمولاً در اراضی پرشیب واقع هستند. شیب زیاد، آبراهه‌های مذکور را در زمره‌ی رودخانه‌های پرشیب با عرض کم و عمق زیاد قرار داده است. از طرفی، با توجه به خصوصیات هواشناسی و اقلیمی مناطق قرارگیری آبراهه‌های اشاره شده، بروز رگبارهای شدید و تشکیل رواناب در فاصله‌ی زمانی کوتاه، شرایط را برای ایجاد سیلاب قوی و با قدرت زیاد و توان انتقال مواد بستر با قطر زیاد را نیز فراهم می‌کند. همچنین شیب زیاد، شرایط انتقال ذرات کف (درشت‌دانه) را به سمت پایین دست فراهم می‌کند و چون قدرت جریان در فاصله‌ی زمانی کوتاه، کاهش سریع دارد، مواد بستر به صورت رسوب‌های وارزیه‌بی و با پیشانی نسبتاً قائم قرار می‌گیرند، که نشان‌دهنده‌ی انتقال بارکف به صورت گام به گام به سمت پایین دست است. این وضعیت از خصوصیات مهم رودخانه‌های فصلی است.

بر اساس دو شیب استفاده شده، میزان دبی رسوب انتقالی (متوسط) در واحد عرض بستر و برای دبی واحد عرض اندازه‌گیری شده است. نتایج دبی به دبی رسوب برای دو سری از دانه‌بندی با قطر ۲/۱ و ۳ میلی‌متر در شکل‌های ۸ و ۹ تنظیم شده است. در شکل ۸، با قطر ذرات متوسط ۲/۱ ملاحظه می‌شود که به ازاء یک دبی واحد، عرض معین اختلاف در میزان دبی رسوب انتقالی به شدت با افزایش شیب افزایش یافته است. هر چند که روند هر دو سری آزمایش با افزایش میزان دبی بیشینه، هیدروگراف افزایشی بوده است، اما نرخ افزایش دبی رسوب در شیب‌های بیشتر بزرگ‌تر مشاهده می‌شود.

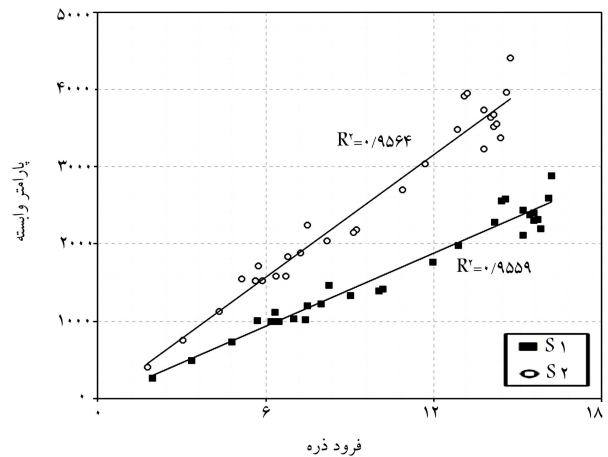
در شکل ۹، نیز مقایسه‌ی جهت دو شیب ۰/۰۶ و ۰/۱۴ برای دانه‌بندی با قطر ۳ میلی‌متر صورت گرفته است، که مطالب قبلی را تأیید می‌کند. روند افزایشی



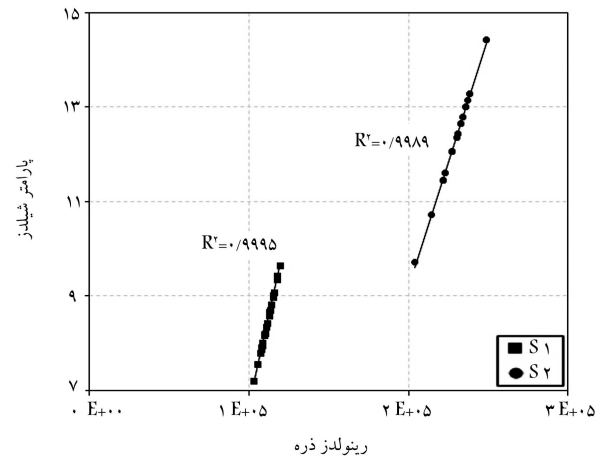
شکل ۱۳. تغییرات عدد غیرماندگاری نسبت به دبی رسوب.



شکل ۱۴. تغییرات عدد غیرماندگاری نسبت به کل کار جریان.



شکل ۱۱. تغییرات مؤلفه‌های بی بعد فرود ذره و پارامتر وابسته.



شکل ۱۲. تأثیر مؤلفه‌های بی بعد رینولدز ذره و پارامتر شیلدز.

۴.۳. تغییرات عدد غیرماندگاری (Γ)

بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته توسط سایر پژوهشگران، پارامتر مؤثر در جریان غیرماندگار با میزان انتقال رسوب، عدد غیرماندگاری است؛ که از نسبت سرعت جریان در حال افزایش به سرعت برشی جریان پایه حاصل می‌شود. بر اساس مقدار عدد غیرماندگار، شرایط انتقال رسوب تغییر می‌کند. در شکل ۱۳، تغییرات عدد غیرماندگاری نسبت به دبی رسوبی برای دو شیب $0/6^\circ$ و $1/4^\circ$ درصد مشاهده می‌شود. با توجه به شکل اخیر، با افزایش عدد غیرماندگاری میزان رسوب انتقالی برای هر دو شیب افزایش یافته است. از طرفی چنانکه ملاحظه می‌شود تغییرات رسوبی بر حسب جریان پایه، نتایج را در دو حالت کاملاً از یکدیگر مجزا کرده است. در صورتی که در شرایط به کارگیری سرعت برشی، چنین وضعیتی وجود ندارد.

این مسئله ناشی از تفاوت ماهیت سرعت جریان پایه و سرعت برشی است. کل کار جریان صورت گرفته، تأثیر به سزایی در انتقال رسوب نسبت به پارامتر غیرماندگاری دارد.^[۳۲] در شکل ۱۴، تغییرات عدد غیرماندگاری نسبت به کل کار جریان با دانه‌بندی‌های مختلف مشاهده می‌شود، که بر اساس آن، افزایش کل کار جریان نسبت به مقدار پارامتر غیرماندگار نسبت مستقیمی دارد، که با نتایج لی و همکاران و نتایج پژوهش حاضر، هماهنگی قابل قبولی را نشان می‌دهد.

قابل قبولی مشاهده می‌شود. همچنین مقایسه روند تغییرات نشان می‌دهد که اثر شیب بستر در انتقال رسوب نقش به سزایی دارد، چنانکه شیب نتایج مطالعاتی حاضر ($0/06^\circ$) و شیب بستر مربوط به نتایج لی و وانگ از مقدار اخیر کمتر است.

۳.۳. بررسی پارامترهای بی بعد (τ^* , Re^* , Fr^*)

بررسی همبستگی پارامتر بدون بعد وابسته (κ) با گروه بدون بعد مستقل (فرود ذره) (Fr^*)، نقش اندازه‌ی ذرات رسوب را در انتقال آنها بیشتر روشن می‌کند (شکل ۱۱). از این رو در شرایط مختلف آزمایشی، رابطه‌ی گروه‌های وابسته و مستقل در برابر یکدیگر ترسیم شده است. تأثیر متغیرهای اصلی، مانند: شیب، قطر ذرات و زمان پایه در روند انتقال رسوب به گونه‌ی بی‌بده است که روند ارتباط بین گروه متغیرهای وابسته و مستقل برای اغلب حالت‌های مشابه است.

با افزایش عدد رینولدز، نقش لزجت بر جریان کاهش یافته است و لذا می‌توان از تأثیر پارامتر بدون بعد رینولدز صرف نظر کرد. در آزمایش‌های انجام شده، رابطه‌ی عدد بی‌بعد رینولدز برشی ذره (Re^*) با پارامتر شیلدز (τ^*) بررسی شده است، که نتایج آن در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. مقادیر عدد رینولدز برشی برای نتایج به دست آمده همواره بیشتر از 5000 بوده است، که حاکی از جریان کاملاً آشفته است؛ لذا نقش عدد رینولدز بر جریان قابل اغماض است.

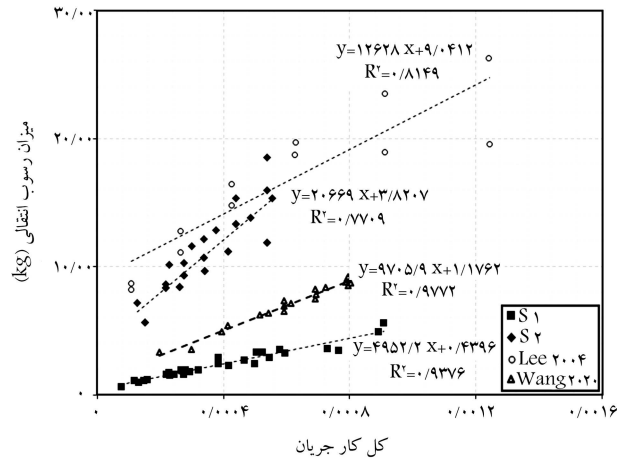
هماهنگی خوبی را نشان می‌دهد (شکل ۱۵). بر این اساس، رابطه‌ی خطی بین میزان کل کار جریان با انتقال رسوب استخراج و در جدول ۴ به آن اشاره شده است.

۴. نتیجه‌گیری

جریان در آبراهه‌های فصلی و مسیل‌ها، ویژگی‌های خاصی دارد. به همین دلیل ثبت و اندازه‌گیری پارامترهای جریان و رسوب در آبراهه‌های فصلی، اصولاً کاری مشکل و گاهی غیرممکن است. از این رو رویکرد مطالعه درخصوص آبراهه‌ی فصلی از طریق مدل‌سازی آزمایشگاهی کاری انجام‌پذیر است. نتایج محدود مطالعات پیشین حاکی از آن است که نقش شیب آبراهه، اندازه‌ی ذرات رسوب‌ها، زمان و بیشینه‌ی دبی اوج سیلاب، اهمیت قابل توجهی دارند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که نقش شیب کانال در انتقال بارکف اهمیت زیادی دارد، به طوری که با افزایش ۲ برابری شیب کف از ۰/۰۰۶ به ۰/۰۱۴، کل رسوب انتقالی به پایین‌دست تقریباً ۵ برابر افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دبی رسوب، پارامتر غیرماندگاری افزایش می‌یابد و این پارامتر نقش مؤثر در کل کار جریان دارد. زمان پایه، که می‌تواند تأثیر سرعت افزایش دبی را نشان دهد، حاکی از آن است که به شدت در آبراهه‌ی فصلی مؤثر است؛ به طوری که هر چه زمان اوج‌گیری سیلاب سریع‌تر باشد، امکان انتقال رسوب بیشتر است و احتمال خرابی و تخریب توسط سیل وجود دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان نوشتار حاضر، از حمایت‌های علمی پژوهشکده‌ی آب و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد تشکر و قدردانی می‌کنند.



شکل ۱۵. تغییرات کل کار جریان نسبت به میزان رسوب انتقالی.

جدول ۴. معادلات رگرسیونی استخراج شده.

R ^۲	Equation	
۰/۹۶۸	$W_t^* = 1156/1W_K^{0.7859}$	Study-S1
۰/۹۱۵	$W_t^* = 1612/6W_K^{0.6251}$	Study-S2
۰/۹۳۱	$W_t^* = 408/92W_K^{0.4241}$	Lee 2004
۰/۹۶۰	$W_t^* = 4952/2W_K^{0.7772}$	Wang 2020

به طور کلی در هیدروگراف‌های با مقادیر بالا، میزان عملکرد رسوب افزایش می‌یابد و ارتباط زیادی بین میزان رسوب انتقالی با کل کار جریان وجود دارد، که تحلیل رگرسیون صورت گرفته برای آزمایش‌های سری اول با نتایج وانگ و همکاران (۲۰۲۰) و آزمایش‌های سری دوم با نتایج لی و همکاران (۲۰۰۴)

پانویس‌ها

1. dunes
2. Graf & Suszka
3. Kuhnle
4. Wang
5. Qu
6. Lee
7. Wu
8. Hu & Abrahams
9. Bombar
10. Billi
11. Zarrati
12. Maurin
13. Yang
14. Ripple Bed
15. Mrokowska
16. Mao
17. armour layer
18. Ockelford
19. Xiao

20. Duan
21. Manning formula
22. Suszka & Graf
23. Bagnold
24. Engelund
25. Graf
26. Chezy

منابع (References)

1. Khosravi, K., Chegini, A.H., Cooper, J.R. and et al. "Uniform and graded bed-load sediment transport in a degrading channel with non-equilibrium conditions", *International Journal of Sediment Research*, **35**(2), pp. 115-124 (2020).
2. Roshani, E., Hossienzade Dalir, S., Farsadzade, D. and et al. "Alluvial streams; bed forms; reducing width transitions; ripple height", *Journal of Water and Soil*, **31**(1), pp. 28-39 (2017).

3. Shafai Bajestan, M. "Basic theory and application of hydraulic sediment transport", 560, *Shahid Chamran University Press* (in Persian) (2009).
4. Samadi-Boroujeni, H., Maleki, P., Fattahi-Nafchi, R. and et al. "Experimental study on the effect of the parallel and flake ripple bed forms on the manning roughness coefficient", *Journal of Hydraulics*, **8**(4), pp. 55-65 (in Persian) (2013).
5. Bombar, G., Elci, Ş., Tayfur, G. and et al. "Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, **137**(10), pp. 1276-1282 (2011).
6. Graf, W. and Suszka, L. "Unsteady flow and its effect on sediment transport", *In 21st IAHR Congress* (1985).
7. Kuhnle, R.A. "Bed load transport during rising and falling stages on two small streams", *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**(2), pp. 191-197 (1992).
8. Wang, Z., Krob, W. and Plate, E. "An experimental study of bed deformation in unsteady and non-uniform flows", *Int. J. Sediment Res.*, **9**(3), pp. 206-215 (1994).
9. Qu, Z. "Unsteady open-channel flow over a mobile bed", *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland* (2002).
10. Lee, K.T., Liu, Y.L. and Cheng, K.H. "Experimental investigation of bedload transport processes under unsteady flow conditions", *Hydrological Processes*, **18**(13), pp. 2439-2454 (2004).
11. Wu, W., Vieira, D.A. and Wang, S.S. "One-dimensional numerical model for nonuniform sediment transport under unsteady flows in channel networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(9), pp. 914-923 (2004).
12. Hu, S. and Abrahams, A.D. "The effect of bed mobility on resistance to overland flow", *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, **30**(11), pp. 1461-1470 (2005).
13. Hasan, M.A., Egozi, R. and Parker, G. "Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel bed rivers", *Water Resources Research*, **42**(9) (2006).
14. Billi, P. "Flash flood sediment transport in a steep sand-bed ephemeral stream", *International Journal of Sediment Research*, **26**(2), pp. 193-209 (2011).
15. Kaboorani, S. and Shanehsazzadeh, A. "Modeling the saltation and evaluating the parameters affecting the random movement of sediment particles in bed Load transport under steady flow", *Modares Civil Engineering Journal*, **14**(1), pp. 95-104 (2014).
16. Tabarestani, M.K. and Zarrati, A. "Sediment transport during flood event: a review", *International Journal of Environmental Science and Technology*, **12**(2), pp. 775-788 (2015).
17. Maurin, R., Chauchat, J. and Frey, P. "Dense granular flow rheology in turbulent bedload transport", arXiv preprint arXiv: 06712/1602 (2016).
18. Yang, Z., Li, H., Liang, B. and et al. "Laboratory experiment on the bed load sediment transport over a rippled bed", *Journal of Coastal Research*, **75**(sp1), pp. 497-501 (2016).
19. Mrokowska, M.M., Rowinski, P.M., Ksiazek, L. and et al. "Laboratory studies on bedload transport under unsteady flow conditions", *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, **66**(1), pp. 23-31 (2018).
20. Mao, L. "The effects of flood history on sediment transport in gravel-bed rivers", *Geomorphology*, **322**, pp. 196-205 (2018).
21. Ockelford, A., Woodcock, S. and Haynes, H. "The impact of inter-flood duration on non-cohesive sediment bed stability", *Earth Surface Processes and Landforms*, **44**(14), pp. 2861-2871 (2019).
22. Xiao, Y., Hu, J. and Yang, F. "Experimental investigation of effects of unsteady flow on bed-load transport process", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **146**(4), 06020001 (2020).
23. Duan, Z., Chen, J., Jiang, C. and et al. "Experimental study on uniform and mixed bed-load sediment transport under unsteady flow", *Applied Sciences*, **10**(6) (2020).
24. Khosravi, K., Chegini, A.H., Binns, A.D. and et al. "Difference in the bed load transport of graded and uniform sediments during floods: An experimental investigation", *Hydrology Research*, **50**(6), pp. 1645-1664 (2019).
25. Wang, L., Cuthbertson, A., Pender, G. and et al. "Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs", *Water Resources Research*, **55**(7), pp. 5431-5452 (2019).
26. Shahsavari, H., Panahi, G. and Khodashenas, S. "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", *Journal of Water and Soil Conservation*, **26**(3), pp. 91-107 (in Persian) (2019).
27. ASTM D. "Standard test method for particle-size analysis of soils (2007).
28. Chanson, H. "Hydraulics of open channel flow", *Elsevier* (2004).
29. Julien, P.Y. "River Mechanics", *Cambridge University Press* (2018).
30. Suszka, L. "Sediment transport at steady and unsteady flow: a laboratory study", *Lausanne, EPFL*, pp.1-280 (1987)
31. Wang, L., Cuthbrtson, A.J., Pender, G. and et al. "Experimental investigations of graded sediment transport under unsteady flow hydrographs", *International Journal of Sediment Research*, **30**(4), pp. 306-320 (2015).
32. Wang, L., Cuthbrtson, A.J., Zhang, S.H. and et al. "Graded bed load transport in sediment supply limited channels under unsteady flow hydrographs", *Journal of Hydrology*, **595**, 126015 (2021).
33. Pender, G., Shavidchnko, A.B. and Chegini, A. "Supplementary data confirming the relationship between critical shields stress, grain size and bed slope", *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, **32**(11), pp. 1605-1610 (2007).

34. Esmaili, K., Shafaei Bajestan, M. and Kashefipour, S.M. "Experimental investigation of the effective parameters on sediment transport under flash flood", *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, **1**(2), pp. 3-10 (in Persian) (2007).
35. Alebouyeh, A., Esmaili, K. and Khodashenas, S. R. "Comparison of the effects of flow pattern and bed slope on ediment transport in laboratory conditions". *Water and Soil*, **28**(2), pp. 286-295 (In Persian) (2014).
36. Morris, G. and Fand, J. "Reservoir sedimentation", *Handbook McGraw-Hill* (1997).
37. Graf, Walter H. and Altinakar, Mustafa S. "Fluvial hydraulics: flow and transport processes in channels of simple geometry", *Chichester*, **551**, pp.1-680 (1998).
38. Hassanzadeh, Y. "Evaluation of sediment load in a natural river", *Journal of the Water International*, **32**(1), pp.145-154 (2007).