

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر ظرفیت انتقال بار بستر در بسترهای فرسایشی

احسان حاجی‌بابائی^۱، سید عباس حسینی^{۲*} و مجتبی صانعی^۳

^۱ دکتری، گروه مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، ^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران و ^۳ دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۳۰

چکیده

حرکت بار بستر نقش مهمی در انتقال رسوب و خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها دارد. شیب، دبی جریان و اندازه ذرات از جمله پارامترهای مهم در میزان انتقال بار بستر در بسترهای فرسایش‌پذیر هستند. تا کنون، مطالعات گسترده‌ای در خصوص تاثیر این پارامترها در بسترهای غیر فرسایشی انجام شده است. در این پژوهش، با انجام مدل آزمایشگاهی در بسترهای فرسایش‌پذیر، تاثیر پارامترهای شیب، دبی جریان، اندازه ذرات و غلظت ذرات معلق بر میزان انتقال بار بستر مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در دبی‌های ۰/۹۰ تا ۴/۷۵ لیتر در ثانیه با غلظت ذرات معلق صفر و ۱۰ گرم در لیتر و شیب‌های دو، سه و پنج درصد بر روی بار بستر از ذرات غیر چسبیده یکنواخت با دانه‌بندی با قطرهای متوسط ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی‌متر انجام و عدد فرود حاصل از ۰/۹۳ تا ۱/۵۱ و دبی بی بعد بار بستر در محدوده ۰/۰۰۴ تا ۰/۳۱۱ به دست آمد. در نتایج آزمایشگاهی، نحوه تغییرات ظرفیت انتقال بار بستر نسبت به دبی جریان در شیب‌ها و دانه‌بندی‌های مختلف نشان داده شد. همچنین، با افزایش غلظت ذرات معلق به میزان ۱۰ گرم بر لیتر تاثیر قابل توجهی در ظرفیت انتقال بار بستر مشاهده نشد. با انجام تحلیل ابعادی، پارامترهای تاثیرگذار بر دبی بی بعد بار بستر (ϕ) بررسی و رابطه‌ای تجربی در محدوده انجام آزمایش برای تعیین آن نسبت به تنش برشی بی بعد (θ)، اندازه بی بعد ذرات (D^*) و شیب (S) ارائه شد. نتایج حاکی از آن بود که در بسترهای فرسایشی در شیب‌های تند، در نظر گرفتن شیب و اندازه بی بعد ذرات به صورت پارامترهای مستقل در تعیین دبی بی بعد بار بستر نتیجه بهتری نسبت به اصلاح تنش برشی دارد. تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر رابطه تجربی نشان داد که پارامتر شیب بیشترین تاثیر را در رابطه تجربی دارد.

واژه‌های کلیدی: بستر فرسایش‌پذیر، تنش برشی، شیب، غلظت، دبی بی بعد بار بستر

مقدمه

دانه‌بندی مصالح بستر، شکل بستر و غیره است. از آنجایی که بررسی‌های میدانی این جریان‌ها در شیب‌های تند کوهستانی و دبی‌های سیلابی بسیار هزینه‌بر و خطرناک است، لذا، بررسی‌های تجربی

پیش‌بینی طبیعت انتقال رسوب و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها مستلزم شناخت دقیق پارامترهای موثر از جمله شیب رودخانه، دبی جریان، غلظت ذرات معلق،

پرداختند. نتایج این مطالعه، بیانگر آن است که در بسترهای فرسایشی، تاثیر پارامتر شیب بستر بر ظرفیت انتقال بار بستر بیشتر از پارامترهای سرعت متوسط جریان و دبی واحد جریان است. از آنجا که این موضوع بر خلاف نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در کانال‌های با بسترهای غیر فرسایشی است، لذا در بسترهای فرسایشی شناخت و بررسی پارامتر شیب از اهمیت بالایی برخوردار است.

Ghilardi و همکاران (۲۰۱۴)، حرکت رسوب را در سه شیب $6/7$ ، $9/9$ و 13 درصد برای رسوبات با اندازه ذرات

متوسط 75 تا 125 میلی‌متر در بسترهای غیر فرسایشی اندازه‌گیری و رابطه‌ای برای برآورد نرخ انتقال بار بستر پیشنهاد کردند. Wang و همکاران (۲۰۱۵)، با انجام آزمایش‌هایی، ظرفیت انتقال بار بستر را در بسترهای غیر فرسایشی با شیب تند اندازه‌گیری کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در بسترهای غیر فرسایشی، دبی واحد جریان تاثیر بیشتری از شیب در ظرفیت انتقال بار بستر دارد. Wu و همکاران (۲۰۱۶)، نیز با انجام آزمایشاتی در بسترهای غیر فرسایشی در شیب‌های تند به تحلیل پارامترهای موثر بر ظرفیت انتقال بار بستر پرداختند و نتیجه گرفتند، تاثیر پارامتر شیب بستر بر ظرفیت انتقال بار بستر بیشتر از دبی واحد جریان است.

با توجه به مطالب ارائه شده، تا کنون مطالعات اندکی در مورد تاثیر پارامترهای جریان در بسترهای فرسایش‌پذیر بر نرخ انتقال بار بستر انجام شده است و این مطالعات از جامعیت لازم برخوردار نبوده است. از دیگر پارامترهایی که تاثیر آن بر نرخ انتقال بر روی بستر فرسایشی کمتر بررسی شده، وجود ذرات معلق موجود در جریان است. Fukuoka و Kikkawa (۱۹۶۹) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر بار شستشو بر نرخ انتقال بار بستر و ضریب اصطکاک بستر در بستر ثابت پرداخته‌اند. آن‌ها از مصالح بستر به قطر $0/18$ میلی‌متر و از ذرات معلق به قطر $0/05$ و $0/15$ میلی‌متر استفاده کرده‌اند. نتایج این محققان حاکی از آن است که با زیاد شدن غلظت بار شستشو، نرخ انتقال بار بستر افزایش می‌یابد. Wan (۱۹۸۵)، تاثیر بنتونیت و رس معلق بر دبی بار بستر به قطر $3/45$

جریان‌های انتقال رسوب در مقیاس کوچک آزمایشگاهی یکی از بهترین ابزارهای مطالعه پدیده انتقال بار بستر است. تا کنون تحقیقات آزمایشگاهی فراوانی به حرکت انتقال بار بستر خصوصا بسترهای ثابت پرداخته‌اند. اغلب بررسی‌های آزمایشگاهی و معادله‌های انتقال بار بستر برای رودخانه‌های با شیب کم استخراج و واسنجی شده‌اند و این در حالی است که تعداد اندکی از داده‌های تنظیم شده در شیب‌های تندتر از یک درصد به دست آمده است.

Cao (۱۹۸۵)، داده‌های آزمایشگاهی با شیب‌هایی در محدوده $5 < S < 9$ درصد و تنش برشی بی‌بعد با نرخ $0/15 < \theta < 0/15$ را گردآوری کرد. همچنین، Graf و Suszka (۱۹۸۷) آزمایش‌هایی در محدوده $2/5 < S < 0/5$ و $0/08 < \theta < 0/03$ درصد و Smart و Jaeggi (۱۹۸۳) و Rickenmann (۱۹۹۰) داده‌های در محدوده $S < 10$ درصد جمع‌آوری کرده‌اند. کلیه آزمایش‌های فوق بر روی بستر غیر فرسایشی انجام پذیرفته، تعداد کمی از داده‌های تولید شده مربوط به شیب بزرگ‌تر از یک درصد است.

Recking و همکاران (۲۰۰۸)، در آزمایش‌هایی نرخ انتقال بار بستر را در بستر فرسایشی و شیب‌های یک تا نه درصد اندازه‌گیری کردند. آن‌ها در کف فلوم از مصالح بستری با میانگین قطر دانه‌بندی به ابعاد $1/7$ تا $12/5$ میلی‌متر و با ضخامت 10 سانتی‌متر استفاده و آزمایش‌ها را در محدوده دبی $0/2$ تا 20 لیتر در ثانیه و عدد فرود در محدوده $0/5$ تا $1/83$ انجام دادند. با توجه به نتایج به دست آمده، تنش بی‌بعد بین $0/01$ تا $0/29$ و دبی بار بستر در محدوده صفر تا 1600 گرم بر ثانیه بر متر است.

Zhang و همکاران (۲۰۱۱)، در پژوهشی به بررسی اثر اندازه رسوبات بر ظرفیت انتقال بار بستر در شیب‌های تند پرداختند. آن‌ها نرخ انتقال بار بستر را در بسترهای غیر فرسایشی با محدوده دانه‌بندی $0/1$ تا $1/16$ میلی‌متر در شیب‌های تند، در بازه $7/8$ تا $42/3$ درصد اندازه‌گیری کردند.

Ali و همکاران (۲۰۱۲)، با انجام مطالعات آزمایشگاهی، به بررسی اثر پارامترهای سرعت، شیب و دبی بر ظرفیت انتقال بار بستر در بسترهای فرسایش‌پذیر در شیب‌های $5/2$ تا $17/6$ درصد

قدرت جریان و ۴- ارائه رابطه دبی بی بعد انتقال بار بستر در شیب‌های تند در بسترهای فرسایشی در محدوده آزمایش‌های انجام شده.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی: بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پارامترهای موثر در ظرفیت انتقال بار بستر به صورت رابطه (۱) است. ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) تابعی از پارامترهای مختلف از جمله سرعت جریان (U) (ms^{-1})، اندازه متوسط دانه بندی ذرات (D_{50}) (m)، شیب (S) (mm^{-1}) لزجت سینماتیکی سیال (ν_m) (m^2s^{-1})، شعاع هیدرولیکی (R) (m)، ρ_s وزن مخصوص ذرات رسوب (kgm^{-3}) و ρ_m وزن مخصوص سیال (kgm^{-3}) و g شتاب ثقل (m^2s^{-1}) است. $T_c = f_1(r_m, r_s, u_m, g, R, S, D_{50})$ (۱)

با استفاده از تئوری باکینگهام؛

$$\frac{T_c}{\rho_m \sqrt{g(\rho_s - \rho_m) D_{50}^3}} = f_1\left(\frac{\rho_m g R S}{g(\rho_s - \rho_m) D_{50}}, D_{50}^3 \sqrt{\frac{\rho_m}{\nu_m^2}}, S\right) \quad (2)$$

بنابراین، رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\phi = f_1(\theta, D^*, S) \quad (3)$$

که در آن، ϕ دبی بی بعد انتقال بار بستر، θ تنش بی بعد، D^* اندازه بی بعد ذرات و S شیب است.

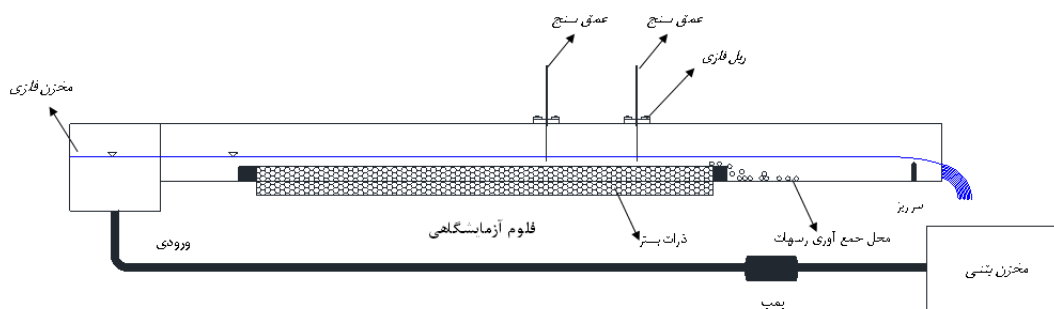
روش اجرای آزمایش‌ها: آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری (گروه تحقیقات مهندسی رودخانه و سواحل) در فلومی به طول هشت متر و عرض ۲۵/۵ سانتی متر که در ارتفاع ۱/۲۰ متری از کف زمین نصب شده، انجام گرفت. سازه اصلی فلوم، فلزی است و دارای دیواره‌ها و کف پلکسی گلاس است. این فلوم شیب پذیر بوده و قابلیت تنظیم شیب بین صفر تا ۱۰ درصد را دارد. شکل ۱، نحوه چیدمان کانال آزمایشگاهی همراه با تجهیزات به کار رفته برای انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

میلی متر و با وزن مخصوص ۱/۲۹ را بررسی کرده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بار معلق نسبت به بار شستشو تاثیر بیشتری بر حرکت انتقال بار بستر دارد.

Khullar و همکاران (۲۰۰۷)، تاثیر بار شستشو را بر حرکت انتقال بار بستر با انجام مدل آزمایشگاهی در بسترهای فرسایشی مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از یک نوع مصالح برای ذرات بار شستشو به قطر ۰/۰۶۴ میلی متر و با غلظت‌های ۲۸ تا ۱۱۳۶۹ پی پی ام استفاده کرده‌اند. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش غلظت بار شستشو موجب بالا رفتن ظرفیت انتقال بار بستر در دانه بندی‌های یکنواخت و غیر یکنواخت می‌شود. Nord و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی تاثیر چگالی ذرات بستر و غلظت ذرات معلق بر ظرفیت انتقال بار بستر در بستر ثابت پرداخته‌اند. در این مطالعه، آزمایش‌ها در حالت‌های جریان ورودی با آب زلال و جریان‌های حاوی ذرات معلق با کائولن با غلظت‌های هفت تا ۸۴ گرم در لیتر با دبی‌های جریان دو تا ۱۵ لیتر در دقیقه انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها بیان گر آن است که غلظت ذرات معلق تاثیر کمی بر بار بستر دارد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مطالعات قبلی اثر ذرات حاوی رسوبات معلق در غلظت‌های مختلف بر حرکت بار بستر مورد توجه پژوهشگران بوده، اغلب در بسترهای غیر فرسایشی بررسی شده است. همچنین، میزان تاثیر شیب خصوصاً شیب‌های تند در بسترهای فرسایشی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا، با توجه به مطالب بیان شده رئوس اصلی این مقاله به شرح زیر است.

۱- بررسی نحوه تاثیر شیب بر حرکت ذرات و فرسایش رسوبات بستر، ۲- بررسی تاثیر ذرات معلق به صورت بار شسته بر ظرفیت انتقال بار بستر در بسترهای فرسایشی، ۳- مقایسه ظرفیت انتقال بار بستر با مشخصه‌های جریان از جمله تنش برشی و



شکل ۱- دیگرام چیدمان فلوم آزمایشگاهی همراه با تاسیسات وابسته

آزمایش، از یک پمپ کفکش برای تزریق دبی در پایین دست کانال (در دو متری انتهای کانال) به منظور جلوگیری از حرکت ناگهانی ذرات بستر استفاده شده است. مزایای استفاده از این پمپ، برقراری جریان یکنواخت و بدون تلاطم قبل از آزمایش بدون حرکت ذرات بار بستر است. جلوگیری از حرکت ناگهانی رسوب همراه با انتقال جریان از بالادست صورت می‌گیرد، به نحوی که وقتی کانال در شیب صفر درجه قرار دارد، با مسدود کردن خروجی کانال به وسیله دریچه کنترل و برقراری جریان با دبی کم از بالادست و پایین دست ذرات بستر بدون حرکت باقی می‌ماند. در این حالت، تا زمانی که جریان مورد نظر به صورت یکنواخت و دائمی برقرار باشد، ارتفاع بستر بدون حرکت و ثابت باقی می‌ماند. مطابق شکل ۱، پس از ایجاد تعادل در جریان، پمپ تغذیه از پایین دست سامانه حذف و دریچه کنترل به آرامی باز می‌شود. جریان با سرریز شدن از دریچه کنترل به مخزن بتنی وارد شده، پس از آن به آرامی شیب فلوم تنظیم و دبی مورد نظر به سامانه وارد می‌شود. تنظیم جریان با پمپ است که با شیر تنظیم، دبی جریان کنترل و با قرائت سطح آب با سرریزهایی مستطیلی شکل در ورودی و خروجی فلوم به منظور کنترل مضاعف دبی هر آزمایش، اندازه‌گیری‌ها دنبال شد. نحوه آغاز آزمایش بدین صورت است که با تنظیم شیب و دبی، پروفیل یکنواخت سطح آب بر روی رسوبات ایجاد می‌شود. این موضوع با دو عمق‌سنج که در فواصل یک متری از ابتدا و انتهای فلوم قرار دارند تا انتهای هر آزمایش کنترل شد. جریان سیال از مخزن بتنی که در پایین دست کانال آزمایشگاهی قرار گرفته، به قسمت ورودی کانال پمپاژ شده و به صورت سامانه گردشی تا

برای بار بستر از دو نوع مصالح با دانه‌بندی یکنواخت با قطرهای میانگین (D_{50}) ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی متر (که مصالح I و II نامیده می‌شوند) استفاده شد. این مصالح از الک کردن شن و ماسه طبیعی در دسترس انتخاب شد. چگالی اندازه‌گیری شده مصالح I و II به ترتیب ۲۶۵۷ و ۲۶۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. مصالح یکنواخت I در محدوده ماسه خیلی درشت و مصالح II در محدوده شن ریز قرار دارند. انحراف معیار هندسی^۱ ذرات بستر معادل $\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$ یعنی کمتر از ۱/۳۳ است و از این رو می‌توان آن‌ها را دانه‌بندی یکنواخت در نظر گرفت (Dey و همکاران، ۲۰۰۱).

در این پژوهش از کائولن یا همان خاک چینی به‌عنوان ذرات معلق با قطر متوسط ۲۰ میکرون استفاده شد. از آنجا که این ذرات غیر چسبنده بوده، در مدت زمان زیادی به صورت معلق در آب باقی می‌مانند، لذا، می‌توان این رسوبات معلق را به‌عنوان بار شستشو در نظر گرفت.

ذرات بستر در میانه فلوم به طول چهار متر و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر تراز می‌شوند. دو متر انتهای کانال به‌عنوان مخزن ذخیره رسوبات جابه‌جا شده در خلال آزمایش استفاده شد. جریان سیال با پمپ کفکش از مخزن بتنی در پایین دست به مخزنی فلزی در ابتدای کانال که آرام کننده جریان نیز هست، هدایت می‌شود.

هر آزمایش با داشتن یکی از دو نوع مصالح I و II و شیب مشخص (شیب دو، سه و پنج درصد) و با برقراری دبی در بالادست اجرا شد. در شروع هر

¹ Geometric standard deviation

همزن‌های برقی به‌خوبی با آب مخلوط شد. در حین آزمایش، دبی سیال ورودی به‌صورت ثابت تنظیم شد. ضمناً با گردش سیال به مخزن بتنی از ته‌نشینی ذرات معلق کائولن جلوگیری به‌عمل آمد. همچنین، در خلال آزمایش، مخلوط سیال چگال در داخل مخزن ذخیره، با استفاده از همزن برقی هم‌زده شده تا احتمال ته‌نشینی ذرات و کاهش غلظت جریان چگال در مدت زمان آزمایش به کمینه ممکن برسد. ضمن این‌که غلظت در ورودی کانال و با نمونه‌برداری در هر آزمایش کنترل شده است.

در شکل ۲، تصاویری از جریان دائمی و یکنواخت عبوری از مقطع بستر فرسایش‌پذیر در خلال آزمایش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲- حرکت سیال به حالت دائمی و یکنواخت در کانال

خشک شدن در خشک‌کن، با تراز وزن شده و نرخ انتقال رسوب تعیین شد.

در هر مرحله، تنش بی‌بعد θ و دبی بی‌بعد ϕ با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه شده است.

$$\theta = \frac{\rho_m g R S}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1) g D_{50}^3}} \quad (5)$$

که در آن‌ها، S شیب، g شتاب ثقل (ms^{-2})، R شعاع هیدرولیکی (m)، ρ وزن مخصوص ذرات رسوب، ρ_m وزن مخصوص سیال (kgm^{-3}) و چگالی نسبی $m = \rho_s / \rho_s$ و $q_b [m^3 s^{-1} m^{-1}]$ حجم بار بستر انتقال یافته بر واحد عرض است. ρ_m وزن مخصوص سیال حاوی رسوب (kgm^{-3}) از رابطه (۶) تعیین می‌شود.

انتهای آزمایش ادامه یافت.

ابتدا، آزمایش‌ها با جریان آب زلال انجام شد. هر آزمایش در یک شیب و دبی مشخص بر روی یک بستر فرسایش‌پذیر با دانه‌بندی یکنواخت انجام گرفته و پس از اتمام هر آزمایش، شیب کانال تغییر کرده است. این آزمایش‌ها ادامه یافته تا سه نوع شیب مورد آزمایش قرار گیرند. سپس، کلیه مراحل فوق مجدداً برای دانه‌بندی II انجام شد. آزمایش‌ها برای جریان‌های حاوی ذرات معلق با افزودن کائولن در مخزن بتنی در غلظت ۱۰ گرم در لیتر، مشابه با شرایط جریان آب زلال تکرار شد. در آزمایش‌های مربوط به جریان حاوی رسوبات معلق، قبل از شروع هر آزمایش کائولن وارد مخزن بتنی شده و به‌وسیله

در حین آزمایش‌ها، ارتفاع آب روی بستر فرسایشی نسبتاً یکنواخت حفظ شد. عمق متوسط جریان در مدت زمان اجرای آزمایش در نقاط کنترل مشخص (حدود ۱۵ نقطه) با اشل‌های نقطه‌ای^۱ با دقت اندازه‌گیری ± 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. با به‌کار بردن روش میانگین‌گیری، عمق متوسط جریان در هر آزمایش به‌دست می‌آید و سرعت متوسط جریان، تنش بی‌بعد و ضریب اصطکاک بار بستر، با توجه به دبی جریان محاسبه می‌شوند. در انتهای هر آزمایش و در فاصله دو متری انتهای کانال، میزان ذرات بستر انتقال یافته به‌دست می‌آید. نمونه‌های جمع‌آوری شده در انتهای فلوم پس از شستشو و

¹ Point gage

عدد رینولدز ذرات از رابطه $R_e^* = (u^* D_{50} / \nu_m)$ به دست می‌آید. u^* سرعت برشی جریان (ms^{-1}) است که با توجه به رابطه (۸) حاصل می‌شود.

$$u^* = \sqrt{gRS} \quad (8)$$

که در آن، R شعاع هیدرولیکی (m)، g شتاب ثقل (ms^{-2}) و S شیب (mm^{-1}) است.

نتایج و بحث

۴۳ آزمایش برای سه شیب دو، سه و پنج درصد اجرا و شرایط اولیه آزمایش‌ها و اعداد بدون بعد مهم در جدول ۱ ارائه شده است.

$$\rho_m = \rho_s C_v + \rho(1 - C_v) \quad (6)$$

که در آن، ρ_s وزن مخصوص ذرات رسوب (kgm^{-3})، ρ وزن مخصوص آب زلال (kgm^{-3}) و C_v غلظت حجمی رسوبات است. ν_m لزجت سینماتیکی سیال (ms^{-2}) است که به وسیله رابطه (۷) محاسبه می‌شود. این رابطه به وسیله Yang و همکاران (۱۹۹۶) ارائه شده است. در این رابطه، ν لزجت سینماتیکی جریان آب زلال است که با توجه به وابستگی به دمای آب، ν^{-1} $9/63 \times 10$ متر مربع بر ثانیه است.

$$\nu_m = \nu \frac{\rho}{\rho_m} e^{5.06 C_v} \quad (7)$$

جدول ۱- شرایط اولیه آزمایش‌ها و اعداد بدون بعد مرتبط

محدوده	پارامتر
۲، ۳ و ۵ درصد	شیب (mm^{-1})
۱/۷-۳/۲۹	قطر میانگین ذرات بستر (mm)
۰/۹۰-۴/۷۵	دبی جریان (ls^{-1})
۰-۱۰	غلظت وزنی ذرات معلق (gl^{-1})
۰/۹۳-۱/۵۱	عدد فرود (F_r)
۸۲-۳۴۳	عدد رینولدز ذرات (R_e^*)
۰/۰۶-۰/۳۰	عدد شیلدز (تنش برشی بدون بعد) (θ)
۰/۰۰۴-۰/۳۱۱	پارامتر اینشتین (دبی بی بعد بار بستر) (ϕ)

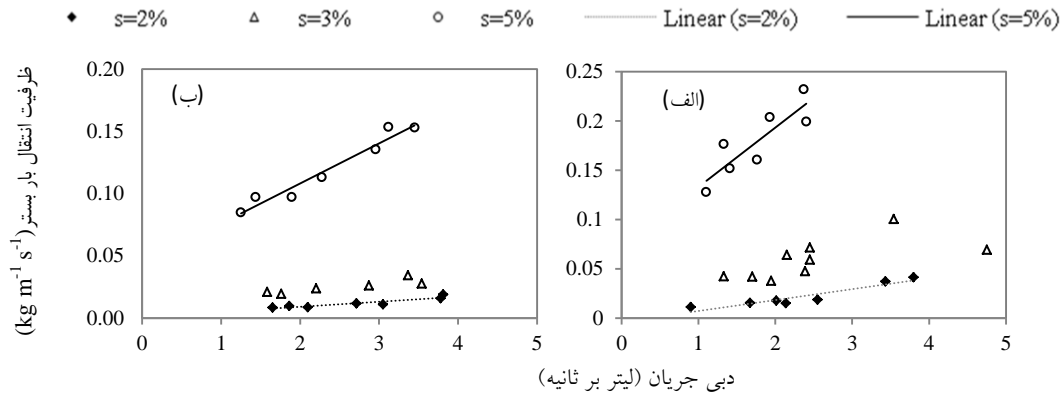
ازای دبی‌های مختلف (ls^{-1}) نشان داده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دبی انتقال بار بستر در شیب‌های پنج درصد نسبت به شیب‌های سه درصد به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در صورتی که دبی انتقال بار بستر در شیب‌های سه درصد نسبت به شیب‌های دو درصد بسیار کمتر است. در شکل ۴، نحوه تاثیر دانه‌بندی (میلی‌متر) بر ظرفیت انتقال بار بستر ($kgm^{-1}s^{-1}$) به ازای دبی‌های مختلف (ls^{-1}) در شیب‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، در شکل ۴ نیز با افزایش دبی، افزایش خطی ظرفیت انتقال بار بستر قابل مشاهده است. همچنین، مشاهده می‌شود که در شیب و دبی یکسان، ذرات بستر درشت‌تر ظرفیت انتقال بار بستر کمتری نسبت به ذرات ریزتر دارند.

با توجه به نتایج به دست آمده عدد رینولدز ذرات در آزمایش‌ها در محدوده $R_e^* > 82$ است و در نتیجه، کلیه نتایج در لایه‌بندی بستر از نوع زبر هستند. در جدول ۲، نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است.

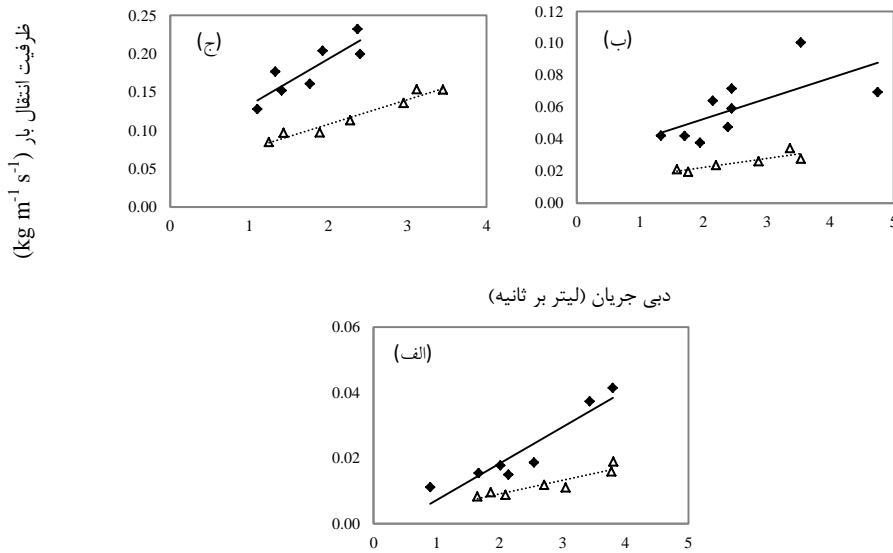
تاثیر شیب بر ظرفیت انتقال بار بستر: در این پژوهش، آزمایش‌ها در سه شیب دو، سه و پنج درصد و با جریان آب زلال و جریان حاوی ذرات معلق (کائولن) با غلظت ورودی ۱۰ گرم در لیتر برای بسترهای فرسایش‌پذیر و با دانه‌بندی یکنواخت با قطرهای متوسط ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی‌متر انجام شده است. شیب، رابطه مستقیمی با تنش برشی دارد. با افزایش شیب و مولفه نیروی ثقل در راستای شیب، تنش برشی افزایش یافته و در نتیجه ظرفیت انتقال بار بستر بیشتری مشاهده می‌شود. در شکل ۳، نحوه تاثیر شیب بر ظرفیت انتقال بار بستر ($kgm^{-1}s^{-1}$) به

جدول ۲- مجموعه داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی انتقال بار بستر

ϕ	θ	R_c^*	ρ_m (kgm^{-3})	F_r	H ($10^2 m$)	U (ms^{-1})	Q (ls^{-1})	c (gl^{-1})	S (mm^{-1})	D_{50} (m)	ردیف
۰/۰۵۰	۰/۱۶۸	۱۲۰	۱۰۰۰	۱/۱۱	۲/۵	۰/۵۴۵	۳/۴۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۱۷	۱
۰/۰۲۰	۰/۱۳۶	۱۰۸	۱۰۰۰	۰/۹۶	۲/۰	۰/۴۲۴	۲/۱۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۱۷	۲
۰/۰۶۳	۰/۱۸۹	۱۲۸	۱۰۰۰	۱/۲۱	۱/۸	۰/۵۱۳	۲/۳۴	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۳
۰/۰۹۲	۰/۳۰۱	۱۶۱	۱۰۰۰	۱/۱۸	۲/۹	۰/۶۳۳	۴/۸۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۴
۰/۰۵۶	۰/۱۳۰	۱۰۶	۱۰۰۰	۱/۱۹	۱/۳	۰/۴۱۷	۱/۳۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۵
۰/۰۵۶	۰/۱۵۵	۱۱۶	۱۰۰۰	۱/۱۷	۱/۵	۰/۴۴۷	۱/۷۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۶
۰/۲۰۲	۰/۳۱۹	۱۳۷	۱۰۰۰	۱/۲۶	۱/۳	۰/۴۴۱	۱/۴۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۱۷	۷
۰/۲۱۴	۰/۲۴۱	۱۴۴	۱۰۰۰	۱/۳۶	۱/۴	۰/۵۰	۱/۸۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۱۷	۸
۰/۱۷۰	۰/۲۰۰	۱۳۱	۱۰۰۰	۱/۱۳	۱/۱	۰/۳۷۸	۱/۱۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۱۷	۹
۰/۰۱۵	۰/۰۷۷	۸۲	۱۰۰۰	۰/۹۶	۱/۱	۰/۳۱۸	۰/۹۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۱۷	۱۰
۰/۰۲۴	۰/۱۲۸	۱۰۵	۱۰۰۰	۰/۹۹	۱/۹	۰/۴۲۴	۲/۰۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۱۷	۱۱
۰/۰۵۰	۰/۱۷۷	۱۲۴	۱۰۰۰	۱/۰۹	۱/۷	۰/۴۴۷	۱/۹۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۱۲
۰/۰۷۹	۰/۱۹۶	۱۳۰	۱۰۰۰	۱/۱۷	۱/۹	۰/۵۰۷	۲/۵۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۱۳
۰/۲۶۵	۰/۲۷۴	۱۵۴	۱۰۰۰	۱/۵۱	۱/۶	۰/۵۹۶	۲/۴۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۱۷	۱۴
۰/۰۵۵	۰/۱۹۳	۱۲۷	۱۰۰۶	۱/۰۱	۲/۸	۰/۵۲۸	۳/۸۰	۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۱۷	۱۵
۰/۰۲۵	۰/۱۴۳	۱۰۹	۱۰۰۶	۱/۰۷	۲/۱	۰/۴۸۱	۲/۵۵	۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۱۷	۱۶
۰/۰۲۱	۰/۱۰۳	۹۲	۱۰۰۶	۱/۱۶	۱/۵	۰/۴۴۱	۱/۷۰	۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۱۷	۱۷
۰/۱۳۴	۰/۲۴۱	۱۴۱	۱۰۰۶	۱/۲۵	۲/۳	۰/۵۹۵	۳/۵۰	۱۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۱۸
۰/۰۸۶	۰/۱۹۳	۱۲۷	۱۰۰۶	۱/۰۷	۱/۸	۰/۴۵۵	۲/۲۰	۱۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۱۹
۰/۰۹۶	۰/۲۰۵	۱۳۰	۱۰۰۶	۱/۱۱	۲/۰	۰/۴۸۸	۲/۵۰	۱۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱۷	۲۰
۰/۲۳۶	۰/۲۲۹	۱۳۸	۱۰۰۶	۱/۱۲	۱/۳	۰/۴	۱/۳۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰۱۷	۲۱
۰/۳۱۱	۰/۲۸۵	۱۵۴	۱۰۰۶	۱/۴۲	۱/۶	۰/۵۶۸	۲/۴۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰۱۷	۲۲
۰/۲۷۳	۰/۲۵۸	۱۴۶	۱۰۰۶	۱/۳۵	۱/۵	۰/۵۱۲	۱/۹۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰۱۷	۲۳
۰/۰۰۴	۰/۰۶۷	۲۰۳	۱۰۰۰	۱/۰۳	۱/۹	۰/۴۴۲	۲/۱۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳۲۹	۲۴
۰/۰۱۰	۰/۰۸۴	۲۲۸	۱۰۰۰	۱/۰۴	۱/۵	۰/۴۰۳	۱/۶۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۳۲۹	۲۵
۰/۰۴۸	۰/۱۳۵	۲۸۹	۱۰۰۰	۱/۳۰	۱/۵	۰/۴۹۹	۱/۸۹	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۳۲۹	۲۶
۰/۰۷۶	۰/۱۹۰	۳۴۳	۱۰۰۰	۱/۴۱	۲/۱	۰/۶۴۲	۳/۵۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۳۲۹	۲۷
۰/۰۶۸	۰/۱۶۸	۳۲۳	۱۰۰۰	۱/۴۵	۱/۹	۰/۶۲۱	۲/۹۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۳۲۹	۲۸
۰/۰۰۴	۰/۰۶۱	۱۹۵	۱۰۰۰	۰/۹۳	۱/۷	۰/۳۸۱	۱/۷۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳۲۹	۲۹
۰/۰۰۵	۰/۰۷۴	۲۱۴	۱۰۰۰	۱/۲۵	۲/۱	۰/۵۶۹	۳/۱۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳۲۹	۳۰
۰/۰۰۸	۰/۰۸۲	۲۲۶	۱۰۰۰	۱/۳۱	۲/۴	۰/۶۳	۳/۷۸	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳۲۹	۳۱
۰/۰۱۲	۰/۰۹۵	۲۴۲	۱۰۰۰	۱/۱۹	۱/۸	۰/۴۹۲	۲/۲۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۳۲۹	۳۲
۰/۰۱۴	۰/۱۱۳	۲۶۵	۱۰۰۰	۱/۴۳	۲/۱	۰/۶۵۳	۳/۵۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۳۲۹	۳۳
۰/۰۴۲	۰/۱۱۹	۲۷۲	۱۰۰۰	۱/۰۵	۱/۳	۰/۳۷۵	۱/۳۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۰۳۲۹	۳۴
۰/۰۰۶	۰/۰۷۵	۲۱۲	۱۰۰۶	۱/۱۱	۲/۱	۰/۵۰۵	۲/۷۰	۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳۲۹	۳۵
۰/۰۰۹	۰/۰۸۸	۲۲۹	۱۰۰۶	۱/۲۲	۲/۵	۰/۶۰۲	۳/۸۰	۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳۲۹	۳۶
۰/۰۰۵	۰/۰۶۱	۱۹۰	۱۰۰۶	۱/۰۷	۱/۷	۰/۴۳۳	۱/۹۰	۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۳۲۹	۳۷
۰/۰۱۳	۰/۱۰۷	۲۵۳	۱۰۰۶	۱/۲۸	۲/۰	۰/۵۶۴	۲/۹۰	۱۰	۰/۰۳	۰/۰۰۳۲۹	۳۸
۰/۰۱۰	۰/۰۸۸	۲۲۹	۱۰۰۶	۱/۰۸	۱/۶	۰/۴۲۸	۱/۸۰	۱۰	۰/۰۳	۰/۰۰۳۲۹	۳۹
۰/۰۱۷	۰/۱۱۷	۲۶۴	۱۰۰۶	۱/۳۱	۲/۲	۰/۶۰۵	۳/۴۰	۱۰	۰/۰۳	۰/۰۰۳۲۹	۴۰
۰/۰۵۷	۰/۱۵۶	۳۰۵	۱۰۰۶	۱/۲۷	۱/۷	۰/۵۲	۲/۳۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰۳۲۹	۴۱
۰/۰۷۷	۰/۱۷۷	۳۲۶	۱۰۰۶	۱/۴۳	۱/۹	۰/۶۲۴	۳/۱۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰۳۲۹	۴۲
۰/۰۴۹	۰/۱۳۷	۲۸۶	۱۰۰۶	۰/۹۹	۱/۵	۰/۳۷۶	۱/۴۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰۳۲۹	۴۳



شکل ۳- نحوه تاثیر شیب بر ظرفیت انتقال بار بستر به ازای دبی‌های مختلف، الف) قطر متوسط ذرات ۱/۷ میلی‌متر و ب) قطر متوسط ذرات ۳/۲۹ میلی‌متر



شکل ۴- مقایسه تاثیر دانه‌بندی ذرات بستر بر ظرفیت انتقال بار بستر به ازای دبی‌های مختلف، الف) شیب دو درصد، ب) شیب سه درصد و ج) شیب پنج درصد

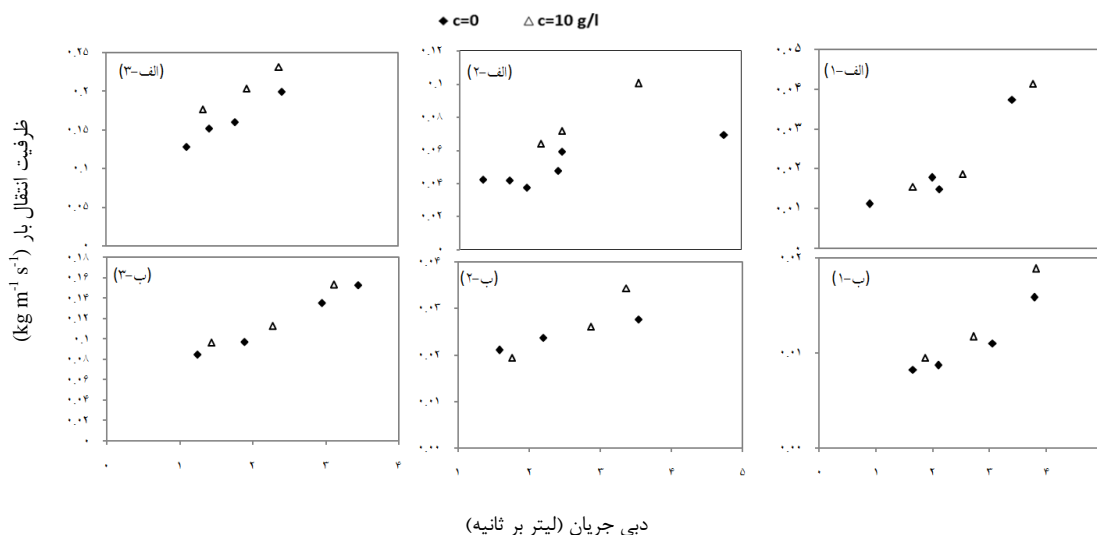
تشکیل شده است (Powell, ۲۰۱۴). مطابق تحقیقات پیشین، از جمله Kikkawa و Fukuoka (۱۹۶۹)، وجود ذرات معلق صرفاً در غلظت‌های بالا می‌تواند باعث تغییر در نوسانات سرعت و تنش‌های رینولدزی در نزدیک بستر شود. از طرف دیگر، تاثیر غلظت‌های کم ذرات معلق (۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر تغییرات ناشی از لزجت مطابق رابطه (۷) در بالاترین حد یک درصد است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت‌های کم (۱۰ میلی‌گرم در لیتر و یا کمتر) اثر وجود ذرات معلق بر تنش برشی کف ناچیز بوده، لذا، ظرفیت انتقال بار بستر بدون

تاثیر غلظت ذرات معلق بر ظرفیت انتقال بار بستر: در شکل ۵ نتایج حاصل از مقایسه اثر غلظت ذرات معلق ۱۰ گرم بر لیتر را بر ظرفیت انتقال بار بستر ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) به ازای دبی‌های مختلف (l s^{-1}) با جریان آب زلال نشان داده شده است. با توجه به این شکل جریان حاوی ذرات معلق با غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، در مقایسه با جریان آب زلال، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ظرفیت انتقال بار بستر ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) نداشته است.

تنش برشی بستر از دو مولفه تنش ناشی از لزجت و تنش ناشی از نوسانات سرعت در نزدیکی بستر

و همچنین، محققانی از جمله Khullar و همکاران (۲۰۰۷) و Nord و همکاران (۲۰۰۹) که تاثیر غلظت ذرات معلق را بر میزان بار بستر مطالعه کردند.

تغییر باقی می ماند. این موضوع در تطابق با نتایج محققانی است که تاثیر ذرات معلق به صورت بار شسته، به میزان کمتر از ۱۰۰۰۰ ppm یا معادل $glit^{-1}$ را بر مکانیسم جریان و تنش برشی جریان در نزدیک بستر ناچیز برشمرده اند (Simons و همکاران،



شکل ۵- مقایسه تاثیر غلظت بر ظرفیت انتقال بار بستر به ازای دبی های جریان، الف) قطر ذرات ۱/۷ میلی متر و ب) قطر ذرات ۳/۲۹ میلی متر، الف-۱) و ب-۱) با شیب دو درصد، الف-۲) و ب-۲) با شیب سه درصد و الف-۳) و ب-۳) با شیب پنج درصد

واحد جریان به جای شعاع هیدرولیکی است. لذا، در رابطه (۹) از شعاع هیدرولیکی و در رابطه (۱۰) از دبی واحد جریان به عنوان شاخص جریان استفاده شده است. از آنجایی که همواره پارامتر مناسب در روابط انتقال بار بستر مورد بحث بین محققین پیشین بوده است، لذا، در این پژوهش تلاش شده است تا این موضوع مورد بررسی قرار گیرد.

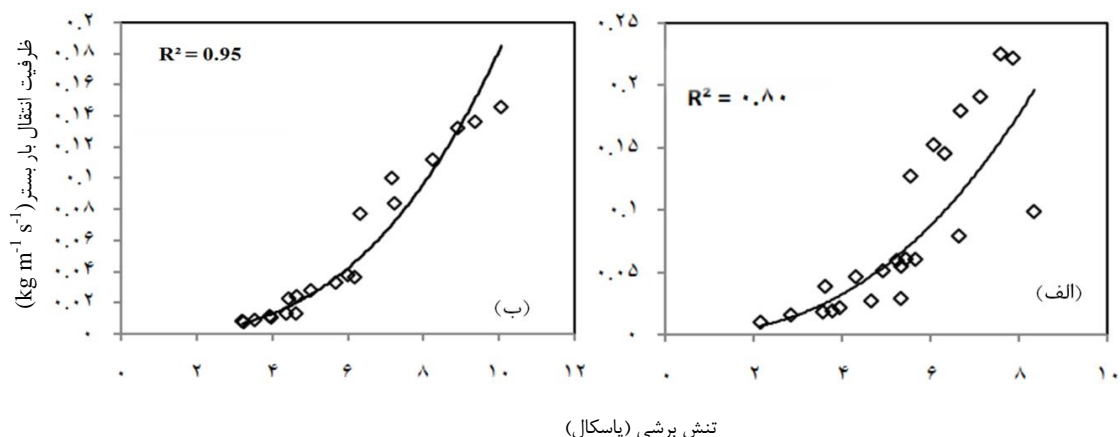
در شکل ۶، نحوه افزایش ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) نسبت به افزایش تنش برشی (τ) در دو دانه بندی ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی متر ترسیم شده است. در شکل ۶- الف مشاهده می شود که در دانه بندی ۱/۷ میلی متر، میزان بار بستر بیشتری منتقل می شود. ضمن این که داده های این دانه بندی روند نامنظم تری نسبت به دانه بندی ۳/۲۹ میلی متر که در شکل ۶- ب نشان داده شده است، دارند. این موضوع با برازش یک منحنی غیر خطی بین داده ها مشخص می شود.

بررسی تاثیر پارامترهای فرسایشی بر ظرفیت انتقال بار بستر: مطالعه و مقایسه تاثیر تنش برشی (τ) قدرت جریان (ω) ، به عنوان یک شاخص مناسب جریان در پیش بینی نرخ فرسایش همواره مورد توجه محققین بوده است. در این قسمت سعی شده است با کمک رگرسیون هایی با نرم افزار SPSS در دو دانه بندی ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی متر، ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) (پاسکال) و تنش برشی (ω) (kgm⁻³) مورد مقایسه قرار گیرد. تنش برشی (τ) و قدرت جریان (ω) به ترتیب از رابطه های (۹) و (۱۰) به دست می آیند.

$$\tau = \rho_m gRS \quad (9)$$

$$\omega = \tau U = \rho_m g S q \quad (10)$$

که در آن ها، S شیب، R شعاع هیدرولیکی (m)، ρ_m چگالی سیال (kgm⁻³)، g شتاب ثقل (ms⁻²)، U سرعت جریان (ms⁻¹) و q دبی واحد جریان (m³m⁻¹s⁻¹) است. تفاوت رابطه (۱۰) با رابطه (۹)، به کار بردن دبی



شکل ۶- ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) نسبت به تنش برشی (τ)، الف) قطر ذرات ۱/۷ میلی‌متر و ب) قطر ذرات ۳/۲۹ میلی‌متر

پراکندگی بین داده‌ها در دانه‌بندی ۱/۷ میلی‌متر، عمدتاً مربوط به دبی‌های انتقال بار بستر بالا در شیب‌های پنج درصد است. به نظر می‌رسد، این مقایسه در شیب‌های تند موجب به‌وجود آمدن پراکندگی بین داده‌ها شده است. لذا، لزوم بازنگری تاثیر شیب در روابط ظرفیت انتقال بار بستر در شیب‌های تند احساس می‌شود.

با توجه به شکل ۶، در جدول ۳ ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) بر اساس تنش برشی (τ)، در دو دانه‌بندی مختلف به‌دست آمده است. با توجه به روابط به‌دست آمده، با افزایش دانه‌بندی، توان تنش برشی از ۲/۴۴ به ۲/۸۳ افزایش و ضریب ثابت کاهش می‌یابد. در دانه بندی ۳/۲۹ میلی‌متر، همبستگی بهتری بین T_c و τ نسبت به دانه‌بندی ۱/۷ میلی‌متر ملاحظه می‌شود.

جدول ۳- ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) نسبت به تنش برشی (τ) در دانه‌بندی‌ها و غلظت‌های مختلف

هاتعداد داده	R^2 (ضریب تعیین)	رابطه به‌دست آمده	اندازه متوسط قطرذرات (mm)
۲۳	۰/۸۰	$T_c = 0.001\tau^{2.44}$	۱/۷
۲۰	۰/۹۵	$T_c = 0.0003\tau^{2.83}$	۳/۲۹

یکی از مشخصه‌های هندسی مهم در میزان انتقال بار بستر است. این پارامتر در شیب‌های تند از اهمیت بیشتری برخوردار است. محققین با روش‌های مختلفی از جمله اصلاح تنش برشی بحرانی، اصلاح تنش برشی موثر و اصلاح دبی انتقال بار بستر، تاثیر شیب را در حرکت بار بستر را منظور کرده‌اند. در این پژوهش، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده و به‌کار بردن رابطه (۱۱) که به‌وسیله محققین قبلی از جمله Dey و همکاران (۲۰۰۱) برای تنش برشی بحرانی در شیب‌های تند به‌کار رفته، تاثیر شیب در حرکت بار بستر لحاظ شده است.

$$\theta_c(\alpha) = \theta_c \cos \alpha \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \Phi}\right) \quad (11)$$

که در آن، $\theta_c(\alpha)$ تنش برشی بحرانی با در نظر گرفتن تاثیر شیب بستر، α زاویه شیب بستر و Φ زاویه اصطکاک داخلی رسوبات است. θ_c تنش برشی بحرانی

در شکل ۷ ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) نسبت به قدرت جریان برای دو دانه‌بندی با قطر متوسط ذرات ۱/۷ و ۳/۲۹ ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در هر شکل، پراکندگی عمیقی بین داده‌ها وجود دارد. این پراکندگی، در داده‌هایی با قطر متوسط ذرات ۱/۷ میلی‌متر که ظرفیت انتقال بار بستر بیشتری در آن اتفاق می‌افتد، بیشتر است. در جدول ۴ روابط به‌دست آمده برای ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) نسبت به قدرت جریان (ω) برای دو دانه‌بندی با قطر متوسط ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی‌متر به‌دست آمده است. با مقایسه نتایج به‌دست آمده ملاحظه می‌شود، ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) همبستگی بهتری با تنش برشی (τ) نسبت به قدرت جریان (ω) دارد.

ارائه رابطه پیشنهادی برای تعیین دبی بی‌بعد بار بستر (ϕ): همان‌طور که پیش از این بیان شد، شیب

بوده، تطابق خوبی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی ملاحظه نمی‌شود. در رابطه (۱۳)، با اصلاح تنش برشی در شیب‌های تند، نرخ انتقال بار بستر تعیین شده است. با مروری بر تحقیقات قبلی ملاحظه می‌شود، این روش اصلاح شیب عمدتاً بر روی بسترهای غیر فرسایشی انجام شده است. این موضوع نشان می‌دهد که نرخ انتقال بار بستر در شیب‌های تند در بسترهای فرسایشی رفتار متفاوتی با بسترهای غیر فرسایشی داشته، یکی از موضوعات ناشناخته برای محققین است. بنابراین، در بستر فرسایشی، ضرورت اصلاح شیب به صورت پارامتر مستقل به نظر می‌رسد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

بوده که به صورت تابعی از D^* قطر بی‌بعد ذرات با استفاده از تئوری Yalin (۱۹۷۲) محاسبه شده است. در رابطه (۱۲)، T پارامتر مرحله جابه‌جایی بوده که با تقسیم تفاضل تنش برشی بر تنش برشی بحرانی حاصل شده است.

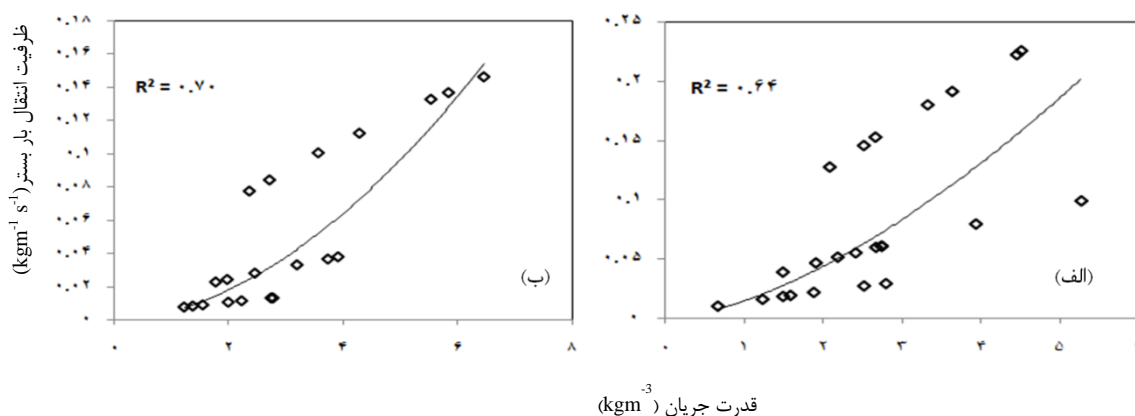
$$T = \left(\frac{\theta}{\theta_c(\alpha)} - 1 \right) \quad (12)$$

به کمک رگرسیون، رابطه (۱۳) برای محاسبه ϕ

دبی بی‌بعد انتقال بار بستر نسبت به پارامتر T به دست می‌آید.

$$\phi = 0.012T^{1.41} \quad (13)$$

در شکل ۸، نرخ انتقال بار بستر مشاهداتی با رابطه (۱۳) مقایسه شده است. در نرخ انتقال بار بستر بالا که عمدتاً مربوط به آزمایش‌ها با شیب‌های پنج درصد



شکل ۷- ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) نسبت به قدرت جریان (ω)، الف) قطر متوسط ذرات ۱/۷ میلی‌متر و ب) قطر متوسط ذرات ۳/۲۹ میلی‌متر

جدول ۴- ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) نسبت به قدرت جریان (ω) در دانه‌بندی‌ها و غلظت‌های مختلف

تعداد داده‌ها	R^2 (ضریب تعیین)	رابطه به دست آمده	اندازه متوسط قطر ذرات (mm)
۲۳	۰/۶۴	$T_c = 0.014\omega^{1.57}$	۱/۷
۲۰	۰/۷۰	$T_c = 0.005\omega^{1.83}$	۳/۲۹

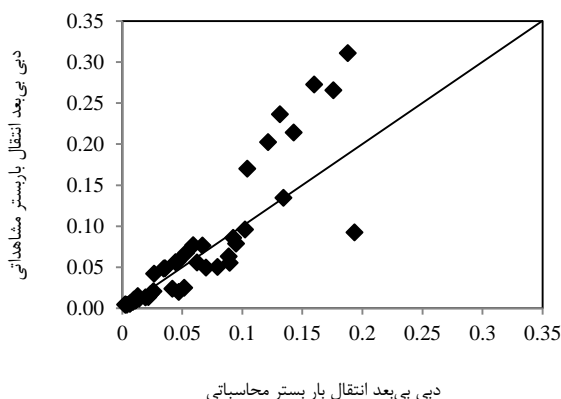
محدوده شیب دو تا پنج درصد به دست می‌آید.

$$\phi = 3/13\theta^{3/1}S^{5/1}D^{*-25/1} \quad (14)$$

که در آن، ϕ دبی بی‌بعد انتقال بار بستر، θ تنش بی‌بعد، D^* اندازه بی‌بعد ذرات و S شیب است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت و در رابطه (۱۴) ملاحظه می‌شود، نرخ بی‌بعد بار بستر با شیب و تنش برشی نسبت مستقیم و با اندازه بی‌بعد ذرات نسبت

همان‌گونه که در تحلیل ابعادی (رابطه ۳) ملاحظه شد، برای تعیین ϕ پارامترهای شیب، تنش برشی و اندازه بی‌بعد ذرات به کار برده و از ۴۳ داده آزمایشگاهی این پژوهش برای رابطه پیشنهادی استفاده می‌شوند. به کمک رگرسیون با نرم‌افزار SPSS، رابطه (۱۴) برای تعیین دبی بی‌بعد بار بستر ϕ برای نتایج حاصل از آزمایش‌های این پژوهش در

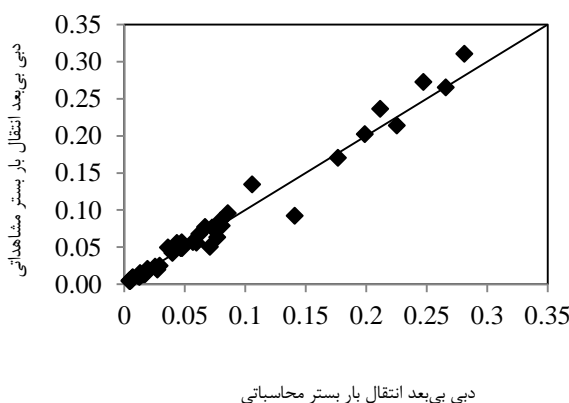
معکوس دارد. توان شیب از پارامترهای دیگر بیشتر بوده، به نظر می‌رسد، تاثیر بیشتری نسبت به حساسیت پارامترهای دیگر داشته باشد که در ادامه به تحلیل حساسیت پارامترهای رابطه (۱۴) پرداخته خواهد شد.



شکل ۸- مقایسه دبی محاسباتی در رابطه (۱۳) با دبی مشاهداتی

تند، با در نظر گرفتن شیب و اندازه بی بعد ذرات به- صورت یک پارامتر مستقل در تعیین نرخ انتقال بار بستر نتیجه بهتری به دست می‌آید.

در شکل ۹، رابطه به دست آمده با داده‌های مشاهداتی مقایسه و تطابق نسبتاً خوبی حاصل شده است. بنابراین، در بسترهای فرسایشی در شیب‌های



شکل ۹- مقایسه دبی محاسباتی در رابطه (۱۴) با دبی مشاهداتی

شامل ضریب همبستگی^۱ (R)، درصد خطای نسبی^۲ (MARE) و شاخص نش^۳ (NSE) مورد بررسی قرار می‌گیرند. مقادیر خطاها بیانگر نسبت حساسیت پارامتر حذف شده در رابطه پیشنهادی است. نتایج مقادیر خطاها و رابطه‌های به دست آمده از حذف پارامترهای مختلف از رابطه پیشنهادی در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در ردیف ۳ با حذف شیب (S)، ضریب همبستگی و

در جدول ۵، نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر ϕ که در رابطه (۱۴) به دست آمده، ارائه شده است. در ردیف یک جدول ۵، رابطه (۱۴) مورد بررسی آماری قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده رابطه پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی تطابق نسبتاً خوبی دارند. در ردیف‌های بعدی و در هر مرحله از تحلیل حساسیت یکی از پارامترها حذف و رابطه به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. در سه حالت مختلف حذف پارامترها بر مقادیر خطاها

¹ Correlation coefficients

² Mean absolute relative error

³ Nash-Sutcliffe efficiency

شاخص نش به شدت کاهش و درصد خطای نسبی به میزان قابل توجهی افزایش یافته که بیشترین تغییرات را نسبت به ردیف‌های ۲ و ۴ جدول دارد. بنابراین، شیب بیشترین تاثیر را در رابطه پیشنهادی دارد.

جدول ۵- تحلیل حساسیت پارامترهای رابطه پیشنهادی نرخ بی‌بعد انتقال بار بستر (رابطه ۱۴)

پارامتر حذف شده	رابطه	تعداد داده‌ها	میانگین معیار	انحراف معیار	درصد خطای نسبی (MARE)	ضریب همبستگی (R)	شاخص نش (NSE)
-	$\phi = 13.3\theta^{1.3}S^{1.5}D^{*-1.25}$	۴۳	۰/۰۷۱	۰/۰۷۸	۱۳/۵	۰/۹۹	۰/۹۸
θ	$\phi = 3172.4S^{2.45}D^{*-1.39}$	۴۳	۰/۰۷۲	۰/۰۸۴	۲۵/۷۰	۰/۹۵	۰/۹۲
S	$\phi = 2.64\theta^{0.57}D^{*-0.06}$	۴۳	۰/۰۶۸	۰/۰۷۰	۳۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۷۲
D*	$\phi = 45.47\theta^{2.28}S^{0.75}$	۴۳	۰/۰۶۹	۰/۰۷۱	۲۱/۹۴	۰/۹۴	۰/۸۸

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل آزمایشگاهی در یک فلوم دو بعدی به طول هشت متر و عرض ۲۵/۵ سانتی‌متر تهیه شده و برای شیب‌های دو، سه و پنج درصد، با آب زلال و جریان حاوی ذرات معلق با غلظت ۱۰ گرم در لیتر و دانه‌بندی‌های بار بستر با قطرهای متوسط ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی‌متر، برای ۴۳ آزمایش، میزان انتقال بار بستر اندازه‌گیری شد.

تاثیر پارامترهای هندسی و مشخصات رسوب بر ظرفیت انتقال بستر مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که محققین پیشین از جمله Recking و همکاران (۲۰۰۸)، Zhang و همکاران (۲۰۱۱)، Ali و همکاران (۲۰۱۲) و Wu و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه‌گیری کردند، در یک دبی ثابت، افزایش شیب موجب افزایش ظرفیت انتقال بار بستر می‌شود که این موضوع در نتایج آزمایش‌های این پژوهش مشاهده شد. در نتایج آزمایشگاهی نحوه تغییرات میزان انتقال بار بستر نسبت به دبی جریان در شیب‌ها و دانه‌بندی‌های مختلف نشان داده شد. همچنین، با افزایش غلظت ذرات معلق به میزان ۱۰ گرم بر لیتر تاثیر قابل توجهی در ظرفیت انتقال بار بستر مشاهده نشد.

به کمک رگرسیون مقایسه‌ای بین ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) با مشخصه‌های جریان شامل تنش برشی (τ)، قدرت جریان (ω) در غلظت‌ها و دانه‌بندی‌های

مختلف انجام گرفت. نتایج نشان داد، ظرفیت انتقال بار بستر (T_c) همبستگی بهتری با تنش برشی (τ) دارد. لذا، در رابطه ارائه شده برای تعیین دبی بی‌بعد بار بستر از تنش بی‌بعد استفاده شد.

پارامترهای تاثیرگذار بر ظرفیت انتقال بار بستر با تحلیل ابعادی بررسی شد و به کمک رگرسیون رابطه ای برای تعیین دبی بی‌بعد بار بستر (ϕ) نسبت به تنش برشی بی‌بعد (θ)، اندازه بی‌بعد ذرات (D^*) و شیب (S) برای محدوده انجام آزمایش‌های این پژوهش ارائه شد و در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نتایج نسبتاً خوبی به دست آمد. این موضوع نشان داد که در بسترهای فرسایشی در شیب‌های تند، در نظر گرفتن شیب و اندازه بی‌بعد ذرات به صورت پارامترهای مستقل در تعیین نرخ انتقال بار بستر نتیجه بهتری نسبت به اصلاح تنش برشی دارد. با تحلیل حساسیت صورت گرفته مشخص شد، شیب بیشترین تاثیر را در رابطه پیشنهادی دارد.

بر این اساس، زمینه‌های تحقیقاتی بیشتر برای انجام مطالعات تکمیلی در شیب‌ها دانه‌بندی‌های بیشتر پیشنهاد می‌شود. همچنین، تکرار آزمایش‌ها در غلظت‌های بالاتر از ۱۰ گرم بر لیتر برای بررسی اثر غلظت ذرات معلق بر ظرفیت انتقال بار بستر در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Ali, M., G. Sterk, M. Seeger, M.P. Boersema and P. Peters. 2012. Effect of hydraulic parameter on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 591-601.
2. Cao, H.H. 1985. Resistance hydraulique d'un lit à gravier mobile à pente raide; étude expérimentale. PhD Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 135 pages.
3. Dey, S. and K. Debnath. 2001. Sediment pickup on stream wise sloping beds. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127: 39-43.
4. Ghilardi, T., M.J. Franca and A.J. Schleiss. 2014. Bed load fluctuations in a steep channel. *Water Resources Research*, 50: 6557-6576.
5. Graf, W.H. and L. Suszka. 1987. Sediment transport in steep channels. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 5: 11-26.
6. Khullar, N.K., U.C. Kothiyari and K.G. Ranga Raju. 2007. Bed load transport in the presence of wash load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 13: 106-122.
7. Kikkawa, H. and S. Fukuoka. 1969. The characteristics of flow with wash load. *International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)*, 2: 233-240.
8. Nord, G., M. Esteves, J.M. Lapetite and A. Hauet. 2009. Effect of particle density and inflow concentration of suspended sediment on bed load transport in rill flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 253-263.
9. Powell, D.M. 2014. Flow resistance in gravel-bed rivers. *Progress in Research, Earth-Science Reviews*, 136: 301-338.
10. Recking, A., P. Frey, A. Paquier, P. Belleudy and J.Y. Champagne. 2008. Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. *Water Resources Research*, 44: W05412.
11. Rickenmann, D. 1990. Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 256 pages.
12. Simons, D.B., E.V. Richardson and W.L. Haushid. 1963. Some effects of fine sediments on flow phenomenon. *Water Supply Paper No. 1498G*, United States Geological Survey, Washington DC.
13. Wan, Z. 1985. Bed material movement in hyperconcentrated flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111: 987-1002.
14. Wang, Z., X. Yang, J. Liu and Y. Yang. 2015. Sediment transport capacity and its response to hydraulic parameters in experimental rill flow on steep slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70: 1-36.
15. Wu, B., Z. Wang, N. Shen and S. Wang. 2016. Modelling sediment transport capacity of rill flow for loess sediments on steep slopes. *Journal of Catena*, 147: 453-462.
16. Yang, C.T., M. Albert and W. Baosheng. 1996. Sediment transport in Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122: 237-244.
17. Yalin, M.S. 1972. *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press, 913 pages.
18. Zhang, G., L.L. Wang, K. Tang, R. Luo and X. Zhang. 2011. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes. *Hydrological Sciences Journal*, 56: 2011.