

بررسی آزمایشگاهی اثر پارامترهای هیدرولیکی بر ظرفیت انتقال رسوب در کانال مرکب با شیب جانبی سیلاب‌دشت

فاطمه عرب^۱، حسنا شفائی^۲ و کاظم اسماعیلی^{۳*}

۱، ۲ و ۳ به ترتیب: کارشناسی ارشد؛ دانشجوی دکترا؛ و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
تاریخ دریافت: ۹۹/۹/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۵

نوع مقاله: علمی پژوهشی

چکیده

در این تحقیق، اثر دانه‌بندی و تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در مقطع سیلابی مرکب بررسی شد. دو مدل آزمایشگاهی مقطع مرکب با مدل اول شیب دیواره جانبی سیلاب‌دشت صفر و در مدل دوم مقدار برابر با ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. همچنین با هدف بررسی تاثیر شیب طولی بر شستن رسوبات بستر رودخانه، شیب طولی در سه گام ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ تغییر داده شد. با هدف بررسی تاثیر قطر متوسط رسوبات بر روند آبشستگی، در خلال آزمایش‌ها از رسوبات ماسه‌ای با قطرهای ۰/۹ و ۳ میلی‌متر استفاده شد. با بررسی تغییرات ظرفیت انتقال رسوب با تغییر دانه‌بندی رسوب و شیب‌های طولی و عرضی، نتایج بررسی‌ها نشان داد با کاهش اندازه ذرات رسوب و در شیب عرضی ۰/۵، میزان رسوب خروجی و در نتیجه ظرفیت انتقال رسوب افزایش یافته است. نتایج پژوهش همچنین نشان داد با افزایش شیب طولی از ۰/۰۰۲ به ۰/۰۰۶ و عرضی از صفر به ۰/۵، میزان حجم انتقال رسوبات بیشتر می‌شود و بیشترین میزان رسوب خروجی در دبی ۱۱/۸ لیتر بر ثانیه و با اندازه ذرات رسوب ۰/۹ میلی‌متر به دست می‌آید. میزان تغییر وزن رسوب خروجی از شیب طولی ۰/۰۰۲ به ۰/۰۰۶ در دبی مشخص ۶/۱ لیتر بر ثانیه حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. با بررسی تغییرات تنش برشی و توان جریان واحد در مقابل ظرفیت انتقال رسوب نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش شیب طولی و در شیب عرضی ۰/۵ ظرفیت انتقال رسوب افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

تنش برشی، توان جریان، دانه‌بندی، سیلاب‌دشت، عدد فرود، ظرفیت انتقال رسوب

مقدمه

در سال‌های اخیر محققان با بررسی ظرفیت انتقال رسوب در شرایط آزمایشگاهی مختلف نشان دادند که پارامترهای هیدرودینامیکی، به‌ویژه تنش برشی و توان واحد جریان، اثر قابل توجه روی ظرفیت انتقال رسوب دارند. روش‌های زیادی برای تحلیل هیدرولیک جریان در کانال‌های باز وجود دارد.

فرسایش خاک یکی از مسائل محیط زیستی جهانی و از نگرانی‌های محققان جهان است (Lal, 1998; Vigiak et al., 2005). برای مطالعه فرآیند فرسایش خاک، ظرفیت انتقال رسوب نقش حیاتی در تشریح فیزیکی فرآیندهای فرسایش خاک دارد.

در مطالعات قبلی، محققان با بررسی تاثیر پوشش گیاهی بر مشخصات جریان در مدل سیلاب‌دشت نشان دادند که با افزایش پوشش گیاهی، ارتفاع آب در سیلاب‌دشت و کانال اصلی به صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. افزایش پوشش گیاهی می‌تواند باعث افزایش افت انرژی شود ولی این امر موجب افزایش عمق آب به ازای دبی سیلابی یکسان می‌شود (Nehal *et al.*, 2012). محققان دیگر نیز روابطی بین عمق جریان و ارتفاع پوشش گیاهی به ازای اعداد فرود مختلف ارائه دادند (Hamidifar & Omid, 2013). همچنین، با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و میزان تراکم پوشش گیاهی، رابطه‌ای بر پایه آنالیز ابعادی برای برآورد میزان ارتفاع آب در سیلاب‌دشت ارائه شد (Hin *et al.*, 2008). کسری با عنوان نسبت تراکم برای بررسی این مورد ارائه شد که در مطالعات بعدی توسط محققان مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. برای بررسی عرض سیلاب‌دشت و تاثیر دیواره کناری آن، در مطالعه‌ای با بررسی مدل آزمایشگاهی سیلاب‌دشت با شیب صفر، این مورد را بررسی کردند (Mulahasan *et al.*, 2017). با بررسی نیمرخ طولی سطح آب در این تحقیق، نیروی درگ در طول کانال اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزایش اعداد رینولدز جریان ضریب درگ پوشش گیاهی به صورت فزاینده‌ای کاهش پیدا می‌کند. این مطلب بیانگر این نکته است که با افزایش سرعت در مقطع مرکب، اتلاف انرژی در طول کانال کاهش پیدا می‌کند. بسیاری از مطالعات به بررسی منحنی دبی-اشل در سیلاب‌دشت و کانال اصلی پرداختند (Zahiri *et al.*, 2012). این موضوع اهمیت فراوانی دارد زیرا این عمق به صورت مستقیم بر ارتفاع دبی سیلاب تاثیرگذار است. در صورتی که می‌توان با

بسیاری از این روش‌ها مانند روابط داریسی-ویسباخ، شزی و مانینگ برای مقاطع ساده مناسب‌اند اما برای مقاطع مرکب مستقیم و پیچانرود محدودیت دارند. بنابراین، مدل‌های ریاضی یک بعدی معمول در مهندسی هیدرولیک جریان و رسوب (HEC-1، MIKE11، RAS و ISIS) که مبتنی بر روابط مانینگ یا شزی هستند، برای تحلیل جریان در رودخانه‌های با مقطع مرکب قابل اعتماد نیستند (Zhao *et al.*, 2020). در این مدل‌ها از روش تجزیه قائم مقطع مرکب برای محاسبه دبی جریان سیل استفاده می‌شود که محدودیت اصلی این روش، در نظر نگرفتن تنش برشی ایجاد شده در مرز تماس مقطع اصلی و دشت‌سیلابی است. با صرف نظر کردن از این تنش، خطای زیادی در محاسبه دبی جریان به ویژه در رودخانه‌های طبیعی به وجود می‌آید (Martin *et al.*, 1991). یکی از روش‌های مرسوم مطالعه مقاطع مرکب، استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی است. در آنالیز ابعادی، با ارائه تشابه هندسی، سینماتیک، و دینامیکی بین مدل اصلی و نمونه می‌توان اعداد بی‌بعدی را برای بررسی پارامترهای مختلف هیدرولیکی و فیزیکی حاکم بر جریان ارائه داد (Tinoco *et al.*, 2013). در روابط گذشته، تاثیر تنش برشی بین جریان کانال اصلی و سیلاب‌دشت صفر در نظر گرفته می‌شد (Ackers, 1992). در این روش فرض می‌شود تنش برشی بین بخش‌های مختلف صفر است و هیچ گونه تبادل مومنتم بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی وجود ندارد. نتایج مطالعات پژوهشگران نشان می‌دهد که این فرض صحیح نیست و به همین دلیل روش‌های فوق دارای خطا هستند (Martin *et al.*, 1991). افزایش شیب عرضی سیلاب‌دشت باعث تغییر تنش انتقالی بین جریان عبور از کانال اصلی و سیلاب‌دشت است.

نهایت الگوی کشت گیاهی برای به حداقل رساندن مقدار فرسایش و شسته شدن رسوبات ارائه شد. آگاروال (Agarwal, 1989) نشان داد که ارتباطی معکوس بین اندازه ذره و انتقال رسوب وجود دارد. شفائی و همکاران (Shafaei *et al.*, 2019) تله‌اندازی رسوب را در یک کانال آزمایشگاهی با وجود پوشش گیاهی بررسی کردند و نشان دادند با افزایش شیب، عدد فرود و دبی جریان میزان رسوب خروجی از کانال افزایش می‌یابد. با وجود مطالعات انجام شده اما هنوز اثر اندازه رسوب روی انتقال رسوب به خوبی درک نشده است و با توجه به اینکه مطالعات قبلی در کانال مستقیم بوده است، اثر شیب طولی و تغییر شیب عرضی با تغییر اندازه ذره رسوب در کانال مرکب به خوبی درک نشده است. بررسی وضعیت جریان در رودخانه‌های واقعی با مقیاس واقعی یکی از مسایل مورد مطالعه در زمینه سیلابدشت است (Chen *et al.*, 2020). در این پژوهش، رودخانه‌ای به عنوان مورد پژوهشی بررسی میدانی شد. این محققان می‌گویند به ازای تغییرات ناگهانی در مقطع جریان در امتداد رودخانه شرایط ویژه‌ای برای رسوبشویی جریان به وجود خواهد آمد. آنها اضافه می‌کنند یکی از عوامل افزایش رسوبشویی در مقاطع، وجود دیواره‌ای با شیب تند در مقطع رودخانه بوده است. در نظر گرفتن این پارامتر می‌تواند اهمیت ویژه‌ای در برآورد میزان رسوبات داشته باشد. در این پژوهش، دیگر پارامترهای تاثیرگذار از جمله دبی سیلاب با استفاده از مدل‌های عددی بررسی شده است. بررسی عوامل موثر بر خرابی در دیواره سیلابدشت در یکی از رودخانه‌های قاره آمریکا بررسی (Gourevitch *et al.*, 2020) و در مقطعی از رودخانه شرایط مورفولوژی

داشتن دبی و روند افزایش منحنی دبی-اشل عمق آب را در زمان سیلاب تخمین زد. مطالعات زیادی در این زمینه یافت می‌شود (Wormleaton *et al.*, 1982). در این تحقیق تاثیر طول دیواره‌های سیلابدشت به عنوان فاکتور اصلی مد تحقیق قرار گرفته است. آکرز (Ackers, 1993) با در نظر گرفتن دو دیواره سیلابدشت در طول‌های مختلف به بررسی تابع دبی-اشل پرداخت. این آزمایش‌ها با مدل واقعی سیلابدستی واسنجی و روابطی تجربی بر پایه مقایسه‌های بین مدل آزمایشگاهی و مدل واقعی ارائه شد.

بررسی میزان رسوبات شسته شده در زمان سیلاب موضوعی است که همواره بااهمیت بوده است. روشی برای تخمین وزن رسوبات خارج شده از کانال بررسی شد (Karamisheva *et al.*, 2005, 2006). در این روش بر خلاف روش‌های گذشته تاثیر اجزای سرعت در جهت‌های مختلف منحنی مختصات در نظر گرفته شد. این روش با دیگر روش‌های گذشته CES و روش لامبرت و مایرز (Lambert & Myers, 1998) مقایسه و نشان داده شد که نسبت به روش‌های پیشین نتایج بهتری دارد. این روش برای برآورد سرعت در کانال اصلی و سیلابدشت توسعه داده شد و میزان رسوبات با واسنجی سیلابی تجزیه و تحلیل گردید. روش ارائه شده می‌تواند با دقت قابل قبولی پارامترهای سیلاب را در سیلابدشت و کانال اصلی تخمین بزند (Wormleaton *et al.*, 1982).

بایلی (Bayley, 1995) به بررسی تاثیر پوشش گیاهی در سیلابدشت پرداخت و به ازای تغییرات پوشش گیاهی در سال‌های مختلف، میزان آبستگي و رسوبگذاری در سیلابدشت را بررسی کرد. در

مطالعاتی در این زمینه، تاثیر پارامترهای سرعت و حضور رسوبات در کانال اصلی از داده‌های سرعت‌سنجی دستگاه سرعت‌سنج صورت ADV استفاده شد. با در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای سرعت در جهت‌های سه‌گانه منحنی مختصات، تاثیر سرعت افقی بر میزان رسوبات شسته شده در جدول آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

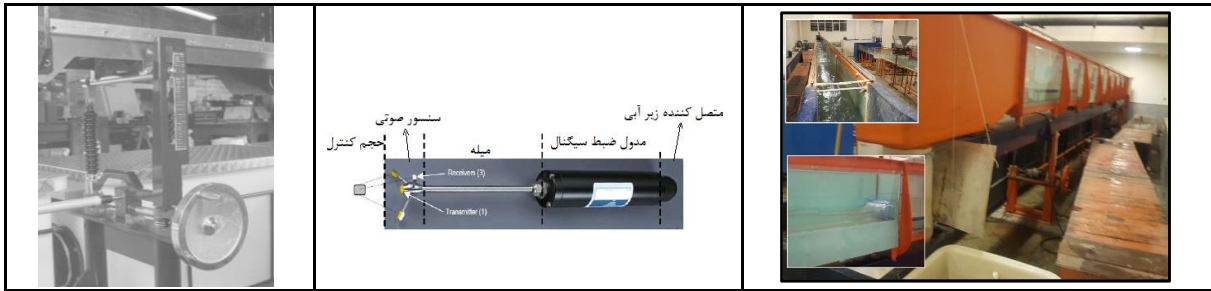
مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۰/۵ متر اجرا شد. ساختمان فلوم متشکل از فولاد و پلاکسی‌گلاس است. کف فلوم و دیواره پشت فلوم از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر و دیواره‌های دیگر فلوم از جنس پلاکسی‌گلاس با ضخامت ۱۵ میلی‌متر ساخته شده است. از چسب‌های خارجی آکواریوم برای آب‌بندی استفاده شد. لازم است گفته شود فلوم آزمایشگاهی در استاندارد S6MK11 شرکت Armfield طبقه بندی می‌شود شکل ۱. برای تحلیل میدان جریان و بردارهای سرعت در بالادست سرریز از داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت‌سنج سه بعدی ADV استفاده شد. در این تحقیق برای نشان دادن شرایط جریان سرریز بر وضعیت رسوب‌گذاری در پشت دیواره سرریز، از سرعت افقی در شبکه رسم شده در مقطعی از کانال استفاده شد (شکل ۲). در خلال آزمایش‌ها از ابزار تعبیه شده در انتهای کانال (شکل ۳) برای تغییر شیب طولی کانال (۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶) استفاده شد.

رودخانه به ازای بازه زمانی خاصی مطالعه شد. نتایج این تحقیقات نشان داد در شرایطی که در شیب سیلاب‌دشت پوشش گیاهی وجود داشته باشد، شرایط جریان تغییر می‌کند و وجود این مقاطع باعث کاهش موضعی آبشستگی می‌شود. این محققان با توجه به این اطلاعات هیدرولیکی خسارت سیلاب را در سیلاب‌دشت‌ها برآورد و به ازای دبی سیلاب‌های مختلف، میزان خسارات را محاسبه کردند.

پارامترهای مختلفی بر شرایط هیدرودینامیکی سیلاب‌دشت‌های رودخانه‌ها تاثیرگذار هستند. از این رو شناخت و بررسی عوامل موثر بر این مورد در علم هیدرولیکی اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از عوامل تأثیرگذار در شرایط هیدرولیکی و هیدرودینامیکی سیلاب‌دشت‌ها، شیب جانبی سیلاب‌دشت است. با این اوصاف، بررسی کیفی و کمی پارامتر نیازمند ارائه روش تحقیق مناسب آزمایشگاهی است. در این پژوهش، با هدف قراردادن تاثیر شیب جانبی سیلاب‌دشت بر شرایط هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان، همچنین اثر دانه‌بندی و پارامترهای هیدرولیکی بر میزان رسوب خروجی طرح آزمایش‌هایی برای بررسی این پارامتر ارائه شد. هدف دیگر این مطالعه ارزیابی ارتباط بین ظرفیت انتقال رسوب و تنش برشی در شیب‌های طولی و عرضی متفاوت است. در مطالعه حاضر با در نظر گرفتن مدل آزمایشگاهی و همچنین استفاده کردن از روش آنالیز ابعادی استفاده شده در مطالعات یاد شده، طرح آزمایش‌هایی هیدرولیکی برای بررسی پارامتر شیب جانبی (شیب سیلاب‌دشت) و شیب طولی کانال اصلی طرح‌ریزی شد. همچنین، با در نظر گرفتن



شکل ۳- تغییر شیب طولی
Fig.3- Change the Longitudinal Slope

شکل ۲- سرعت سنج صوتی انعکاسی
۲۵ مگا هرتز
Fig.2-Reflective audio speedometer

شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی
Fig.1-Experimental flume

می‌توان از نیروهای کشش سطحی صرف‌نظر کرد یا به دلیل بی بعد بودن پارامترهای شیب عرضی و شیب طولی، می‌توان آنها را از محاسبات خارج و به عنوان عدد بی‌بعدی معرفی کرد. برای ساده‌سازی آنالیز ابعادی، بهتر است این پارامتر نیز در نظر گرفته نشوند. می‌توان به دو صورت پارامترهای تکرار شونده را در نظر گرفت. در صورت اول اگر ρ ، μ و V در نظر گرفته شوند در اعداد بی‌بعد، عدد رینولدز پدیدار خواهد شد. از آنجایی که مطالعات در کانال باز صورت می‌گیرد و نیروی لزوجت تاثیر کمتری نسبت به نیروی وزن خواهد داشت، به همین دلیل از پارامترهای تکرار شونده باید استفاده شود که نیروی وزن (عدد فرود) تاثیر خود را نشان دهند. با در نظر گرفتن پارامترهای تکرار شونده g ، V و h_0 اعداد بی‌بعدی صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\pi_1 = S_0, \pi_2 = S_c, \pi_3 =, \pi_4 =, \pi_5 =, \pi_6 =, \pi_7 =, \pi_8 = \frac{W_{out}V}{\gamma_s \sqrt{gh_0^{3.5}}} \quad (2)$$

$$\pi_1 = S_0, \pi_2 = S_c, \pi_3 =, \pi_4 =, \pi_5 =, \pi_6 =, \pi_7 =, \pi_8 = \frac{W_{out}V}{\gamma_s \sqrt{gh_0^{3.5}}} \quad (3)$$

$$Vs = f(h_0, h_s, hf, b, w, V, \gamma, \mu, \rho, g, B, d_{50}, \gamma_s)$$

آنالیز ابعادی: پارامترهای فیزیکی حاکم بر جریان مقاطع مرکب در رابطه ۱ ارائه شده است.

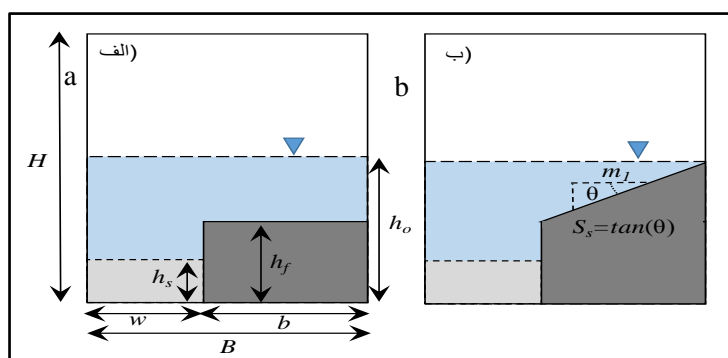
$$V_{out} = f(Q_f, h_o, h_s, hf, S_o, S_y, b, w, V, \gamma, \mu, \sigma, \rho, g, B, d_{50}, \gamma_s) \quad (1)$$

که در آن،

Q = دبی جریان (لیتر بر ثانیه)؛ h_o = عمق آب در کانال (متر)؛ h_s = ارتفاع رسوبات (متر)؛ h_f = ارتفاع سیلاب‌دشت؛ b = عرض سیلاب‌دشت (متر)؛ S_o = شیب طولی کانال (بدون بعد)؛ S_c = شیب عرضی کانال (بدون بعد)؛ w = عرض کانال اصلی (متر)؛ V = سرعت جریان (متر بر ثانیه)؛ γ = جرم وزنی سیال (نیوتن بر مترمکعب)؛ μ = لزوجت دینامیک آب (پاسکال-ثانیه)؛ σ = کشش سطحی سیال (نیوتن بر متر)؛ ρ = چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ g = شتاب ثقل زمین (متر بر مجذور ثانیه)؛ B = عرض کل کانال (متر)؛ Vs = حجم رسوبی از کانال (متر مکعب)؛ و d_{50} = قطر متوسط ذرات (میلی‌متر) است. در پارامترهای بالا در ارتباط با آنالیز ابعادی و قضیه پی باکینگهام می‌توان پارامترهایی را از پارامترهای بالا حذف کرد. برای مثال، به علت اینکه ضخامت آب در روی سیلاب‌دشت به اندازه کافی زیاد است

وزنی عدد πg است. در شکل ۴، طرح مدل‌های آزمایشگاهی همراه با پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی نمایش داده شده است. در جدول ۱ پارامترهای طول بر حسب میلی‌متر است. دبی بر حسب لیتر بر ثانیه تعریف می‌شود.

که در آن، W_{out} = وزن رسوبات شسته شده در کانال اصلی سیلاب‌دشت. این پارامتر با جمع آوری رسوبات در انتهای کانال محاسبه می‌شود. همچنین، منظور از عدد فرود



شکل ۴- مدل‌های آزمایشگاهی کانال مرکب، الف) شیب جانبی صفر، ب) شیب جانبی ۰/۵

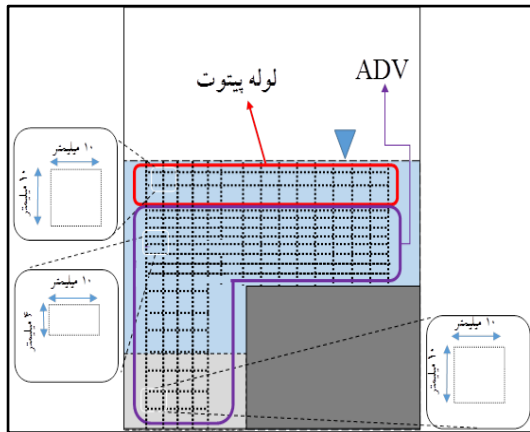
Fig.4-combined channel laboratory models, a)zero lateral slope, b)lateral slope of 0.5

استفاده از دستگاه سرعت سنج سه بعدی صوتی داپلر (ADV) و پویینت گیج در ۳۰ مقطع طولی و با فاصله ۱۰ سانتی‌متری از هم و در عرض مقطع کانال در ۳۰ مقطع با فاصله نقاط یک سانتی‌متری از هم و در فاصله یک متری بالادست خروجی کانال اندازه‌گیری شد. شکل ۶ اندازه‌گیری سرعت در یک مقطع از کانال را نشان می‌دهد.

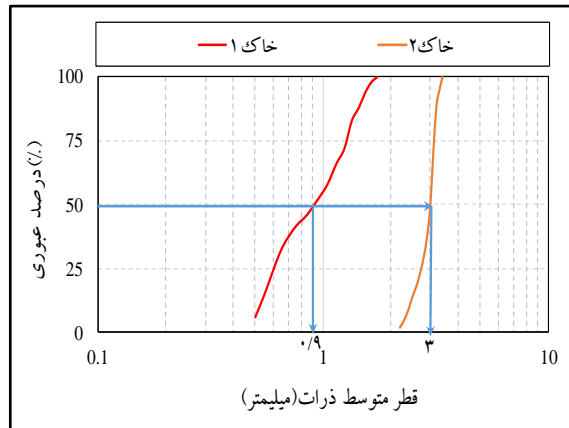
همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای اندازه‌گیری سرعت جریان در سطح آب از لوله پیتوت استفاده شد. داده‌های خام برداشت شده با دستگاه ADV در آغاز با استفاده از نرم افزار WinADV، که توسط دفتر عمران ایالات متحده (USBR) توسعه داده شده است، پالایش شدند و داده‌های سرعت میانگین نقطه‌ای به دست آمد (Wahl, 2000).

به منظور تعیین محدوده دانه‌بندی به کار رفته در ساخت مدل، از آزمایش دانه‌بندی با الک‌های استاندارد استفاده شد. در شکل ۵ منحنی دانه‌بندی رسوبات استفاده شده ارائه شده است. متوسط دانه-بندی رسوبات ۰/۹ و ۳ میلی‌متر و جنس خاکدانه‌ها ماسه‌ای است.

سرعت در شبکه‌بندی شکل ۶ با دستگاه ADV و همچنین لوله پیتوت اندازه‌گیری شد. از آنجایی که دستگاه ADV قادر به اندازه‌گیری سرعت در بیشتر از ۴/۵ سانتی‌متری سطح آب نبود، نقاط بالاتر از عمق ۴/۵ سانتی‌متری با لوله پیتوت اندازه‌گیری شد. طول کانال ۱۰ متر بود که به دلیل برقراری جریان آرام و بدون آشفتگی طول مؤثر فلوم ۸ متر در نظر گرفته شد. عمق و سرعت جریان در ۴ متر دوم کانال اندازه‌گیری شد. سرعت و عمق جریان به ترتیب با



شکل ۶- شبکه بندی کانال برای اندازه گیری سرعت
Fig.6-Channel networking to measure velocity



شکل ۵- دانه بندی خاک های استفاده شده در مدل ها
Fig.5-Soil granulation used in models

S = شیب بستر (متر بر متر)؛ R = شعاع هیدرولیکی (متر)؛ و u^* = سرعت برشی.

ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2012) با بررسی اثر اندازه ذره بر انتقال رسوب و سرعت آستانه نشان دادند که حداقل سرعت یا انرژی مورد نیاز برای انتقال رسوب مستقل از اندازه ذره است و ذرات بزرگ تر به انرژی بیشتری برای حرکت نیاز دارند. در جدول ۱ محدوده پارامترهای هیدرولیکی ارائه شده است.

متوسط مقادیر سرعت و عمق جریان برای برآورد تنش برشی همانند رابطه ۴ به کار رفت:

$$\tau = \rho g H S \quad (4)$$

$$u^* = (g R S)^{0.5} \quad (5)$$

که در آن،

τ = تنش برشی بر حسب پاسکال؛ ρ = چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ g = شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)؛ H = عمق متوسط جریان (متر)؛

جدول ۱- محدوده پارامترهای هیدرولیکی در این تحقیق

Table 1- The range of hydraulic parameters in this study

محدوده		مقدار Value	نشانه Sign	پارامتر Parameter
تا To	از From			
11.8	6.1	متغیر	Q	دبی (لیتر بر ثانیه)
18.7	11.95	متغیر	h_0	عمق آب (سانتی متر)
0.006	0.002	متغیر	S_0	شیب (-)

محققان نشان دادند که پارامترهای هیدرودینامیک، به ویژه تنش برشی، اثر قابل توجهی روی ظرفیت انتقال رسوب دارد. گاورز (Govers, 1990) می گوید

ظرفیت انتقال رسوب

در دهه های اخیر، برای محاسبه ظرفیت انتقال رسوب بر اثر جریان بررسی های زیادی شده است.

(دبی جریان، زبری، شیب، بار رسوب و عمق جریان) و شرایط سطحی (پوشش گیاهی و شرایط زهکشی) انتقال رسوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هنگامی که سرعت از سرعت آستانه حرکت بیشتر می‌شود، ذرات رسوب حرکت خواهند کرد (Zhang *et al.*, 2009). اثر بار رسوب بر ضریب اصطکاک به دبی جریان بستگی دارد. با افزایش دبی جریان، تأثیر بار رسوب بر ضریب اصطکاک به دلیل افزایش عمق جریان و کاهش زبری نسبی، کاهش می‌یابد. کاهش تلاطم جریان و سرعت جریان ناشی از افزایش گرانروی جریان و اصطکاک قطعاً بر ظرفیت انتقال اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارد. اثر مرکب بار رسوب بر هیدرولیک جریان ممکن است تغییرپذیری را در اندازه‌گیری ظرفیت انتقال رسوب افزایش دهد. میانگین سرعت جریان، به عنوان مرجعی اساسی برای تبدیل انرژی بدنه آب در فرآیند جریان، به‌طور جامع تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند شیب انرژی، دبی جریان واحد، شرایط مرزی و زبری سطح زیرین قرار دارد. از این رو می‌توان سرعت متوسط جریان را نیز یک پارامتر جامع هیدرولیکی در نظر گرفت. روابط بین سرعت جریان متوسط و ظرفیت انتقال رسوب برای اندازه‌های مختلف دانه‌های رسوب در شیب‌های طولی و عرضی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. ظرفیت انتقال رسوب با میانگین نسبت سرعت به سرعت برشی جریان افزایش یافته است. با مشاهده نمودار شکل ۷ می‌توان دریافت که با افزایش سرعت، میزان ظرفیت انتقال رسوب در شیب‌های طولی و عرضی متفاوت افزایش یافته اما افزایش بیشتر ظرفیت انتقال رسوب در شرایطی که شیب عرضی ۰/۵۷ بوده رخ داده است. با در نظر گرفتن تغییرات سرعت در محدوده ۰/۱۹ تا ۰/۲۲ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود که در شیب طولی

تنش برشی می‌تواند برای پیش‌بینی ظرفیت انتقال رسوب در شرایط فرسایش‌پذیر به کار برده شود. تنش برشی پیش‌بینی‌کننده خوب ظرفیت انتقال رسوب برای شیب‌های مختلف است. ظرفیت انتقال رسوب مفهومی کلیدی در تخمین میزان رسوب ته‌نشین شده در مدل‌های مبتنی بر فرسایش است. در این مطالعه، اثر اندازه ذرات رسوب روی ظرفیت انتقال جریان در فلوم بررسی شد. ظرفیت انتقال رسوب در وهله اول وابسته به پارامترهای هیدرولیکی از جمله سرعت جریان است. ظرفیت انتقال رسوب بسیار به خصوصیات رسوب (اندازه، شکل، زبری و ...) وابسته است (Guy *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2000).

ظرفیت انتقال رسوب و توان جریان واحد مطابق

رابطه ۷ و ۸ محاسبه می‌شود:

$$T_c = 0.054\tau^{1.982} \quad (6)$$

$$P = VS \quad (7)$$

که در آن،

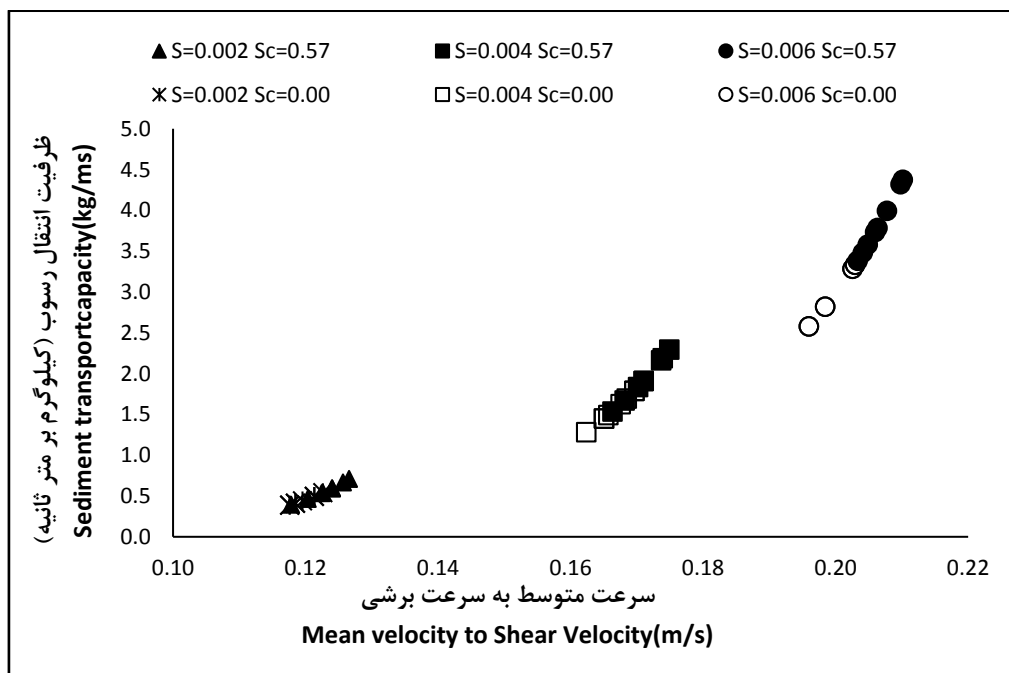
T_c = ظرفیت انتقال رسوب (کیلوگرم بر متر در ثانیه)؛ و τ = تنش برشی (Pa) است. رابطه ۸ نشان دهنده توان واحد جریان است (Yang *et al.*, 1972). P = توان واحد جریان (وات بر نیوتن)؛ V = سرعت متوسط (متر بر ثانیه)؛ و S = شیب بستر (متر بر متر) است.

نتایج و بحث

میزان انتقال رسوب به مقدار زیادی تحت تأثیر خصوصیات رسوب از جمله اندازه، زبری، چگالی و شکل ذرات است (Guy *et al.*, 2009). سرعت متوسط جریان از جمله متغیرهای مهمی است که به دلیل اثرپذیری از هر دو شرایط هیدرولیکی جریان

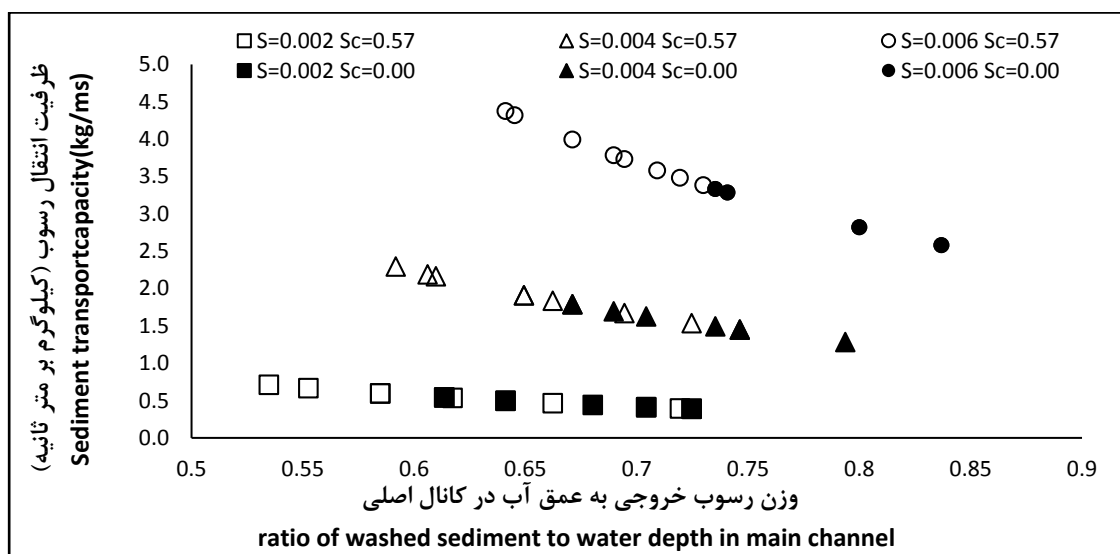
رسوب نشان داده شده است. بیشترین مقدار ظرفیت انتقال رسوب در محدوده $0/6 < w/h < 0/65$ است. شیب کاهش ظرفیت انتقال رسوب با افزایش مقدار وزن رسوب خروجی به عمق آب در کانال اصلی در شیب‌های طولی $0/006$ و عرضی $0/57$ و صفر به ترتیب تندتر است و این نشان دهنده تأثیر شیب عرضی در ظرفیت انتقال رسوب است. تغییرات ظرفیت انتقال رسوب در شیب‌های طولی $0/004$ و $0/002$ با شیب‌های عرضی صفر و $0/57$ در دامنه گسترده‌تری از مقادیر نسبت وزن رسوب خروجی به عمق آب در کانال اصلی رخ داده است.

$0/006$ و شیب عرضی صفر، کمترین مقدار ظرفیت انتقال رسوب برابر با $2/5$ کیلوگرم بر مترثانیه و در همان شیب طولی اما با شیب عرضی $0/57$ این میزان به $4/5$ کیلوگرم بر مترثانیه افزایش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که گرادیان انرژی در تغییرات ظرفیت انتقال رسوب تأثیر بیشتری از تغییرات سرعت دارد که تأثیرپذیری بیشتر ظرفیت انتقال رسوب با تغییرات شیب در مقایسه با تغییرات سرعت در تحقیق (Wang *et al.*, 2015) نشان داده شده است. در شکل (۸)، تغییرات وزن رسوب خروجی به عمق آب در کانال اصلی و ظرفیت انتقال



شکل ۷- تغییرات سرعت جریان و وزن رسوبات شسته‌شده، مدل کانال مرکب با شیب جانبی صفر و $0/5$

Fig. 7-Changes in flow velocity and weight of leached sediments, combined channel model with zero & 0.5 lateral slopes

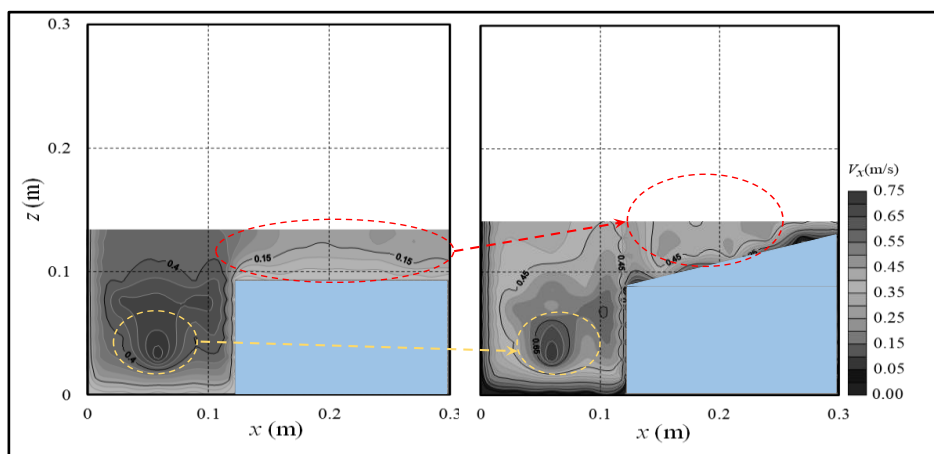


شکل ۸- تغییرات نسبت وزن رسوب خروجی به عمق آب در کانال اصلی و ظرفیت انتقال رسوب، مدل کانال مرکب با شیب جانبی صفر و ۰/۵

Fig. 8-Changes of the ratio of the weight of output sediment to depth of water in main channel, combined channel model with zero & 0.5 lateral slopes

است که این امر باعث انتقال مومنتم بیشتر آب به ذرات رسوبات کف می‌گردد و این امر آبشستگی در طول کانال را افزایش می‌دهد. افزایش شیب، مقدار عددی حداکثر سرعت افقی را در مقطع مورد بررسی به صورت افزایشی تغییر می‌دهد که در شکل ۹، همان‌طور که قابل مشاهده است، این افزایش در سیلاب‌دشت تا ۳۰۰ درصد و در کانال اصلی تا ۴۳ درصد برآورد می‌شود.

با مقایسه پروفیل‌های سرعت به‌زای بحرانی‌ترین حالت آزمایش‌ها (حداکثر دبی و شیب طولی)، با توجه به شکل ۹، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شیب جانبی و طولی حداکثر پروفیل سرعت به سمت کف کانال تغییر وضعیت می‌دهد. به نظر می‌رسد یکی از عوامل تاثیر گذار در افزایش آبشستگی با افزایش شیب طولی و عرضی این تغییر وضعیت حداکثر سرعت باشد. دلیل این وضعیت آن



شکل ۹- مقایسه پروفیل سرعت طولی کانال در مقطع عرضی مدل مقطع مرکب

Fig. 9-Comparison of the longitudinal velocity profiles of channel in transverse section

فرآیند مصرف انرژی و تبدیل آن است، بنابراین توان جریان، توان جریان واحد و توان جریان موثر همه شاخص‌های شدت جریان حیاتی هستند که باید برای پیش‌بینی ظرفیت انتقال رسوب استفاده شود. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال اندازه‌گیری شده (T_c) با توان واحد جریان در شیب‌های متفاوت تغییر کرده است. به‌طور مشخص توان واحد جریان بسیار تحت تأثیر ظرفیت انتقال اندازه‌گیری شده است. این نتایج با نتایج به دست‌آمده از تحقیقات پیشین (Zhang *et al.*, 2009; Ali *et al.*, 2011) تطابق دارد. همچنین در تطابق با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، نتایج تحقیقات وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2015) نشان داده که با افزایش گرادیان شیب، ظرفیت انتقال رسوب افزایش یافته است. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2015) می‌گویند که T_c نسبت به دبی جریان حساس‌تر است تا نسبت به گرادیان شیب، و نتایج تحقیقات آنها ارتباطی ضعیف بین ظرفیت انتقال رسوب و توان واحد جریان نشان داد که دلیل آن شرایط آزمایشگاهی متفاوت و تابع نمایی به‌دست آمده براساس ظرفیت انتقال رسوب و توان جریان واحد در تحقیق وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2015) است. روابط رگرسیون بین تنش برشی و ظرفیت انتقال رسوب برای اندازه‌های مختلف رسوب در جدول ۲ آورده شده است. ظرفیت انتقال رسوب با تنش برشی افزایش یافته است. ضریب‌های رگرسیون با افزایش شیب طولی و شیب عرضی افزایش یافت. ذرات رسوب تحت عمل جریان با سرعت مطلق به جلو حرکت می‌کنند. این فرآیند شامل تبدیل انرژی است و جریان برای حرکت باید مقداری انرژی مصرف کند، بنابراین تعیین انرژی مصرفی بر اثر جریان در واحد زمان با ظرفیت انتقال

پاسخ بین تنش برشی و توان جریان واحد با ظرفیت انتقال رسوب

از دیدگاه انرژی، انتقال رسوب فرآیندی است که در آن تنش برشی انرژی مصرف می‌کند. تنها هنگامی که نیروی جریان از مقاومت اصطکاکی رسوب فراتر رود، ذرات خاک پایداری خود را از دست می‌دهند و شروع به حرکت می‌کنند. با این حال، اثر کشش جریان قابل توجه است. رابطه بین ظرفیت انتقال رسوب و تنش برشی در شکل ۱۰ ارائه شده است، یک رابطه نمایی بین دو پارامتر مشاهده می‌شود. تنش برشی عمدتاً برای محاسبه ظرفیت انتقال رسوب به‌کار می‌رود (Finkner *et al.*, 1989). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در شیب‌های طولی و عرضی، ظرفیت انتقال رسوب مربوطه با افزایش اندازه ذرات خاک متوسط، که ممکن است به شرایط بحرانی شروع مرتبط باشد، افزایش یافته است. هنگامی که اندازه ذرات رسوب بزرگ‌تر از اندازه ذرات بحرانی است، به دلیل افزایش جاذبه ذرات، ذره برای شروع حرکت به مقاومت جریان بسیار زیاد نیاز خواهد داشت. برعکس، هنگامی که اندازه ذرات رسوب از اندازه ذرات بحرانی کوچک‌تر است، به دلیل نیروی منسجم بین ذرات رسوب، شروع حرکت برای ذرات دشوار خواهد بود. شکل (۱۰) نشان می‌دهد با افزایش تنش برشی در شیب‌های طولی و عرضی مختلف، ظرفیت انتقال رسوب افزایش می‌یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که شیب اثری مثبت روی تنش برشی دارد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که شیب عرضی تأثیر بسزایی در افزایش و تغییرات تنش برشی با ظرفیت انتقال رسوب دارد و در شیب عرضی ۰/۵ و در شیب‌های طولی مختلف این تغییرات و افزایش در ظرفیت انتقال رسوب بیشتر است. انتقال رسوب

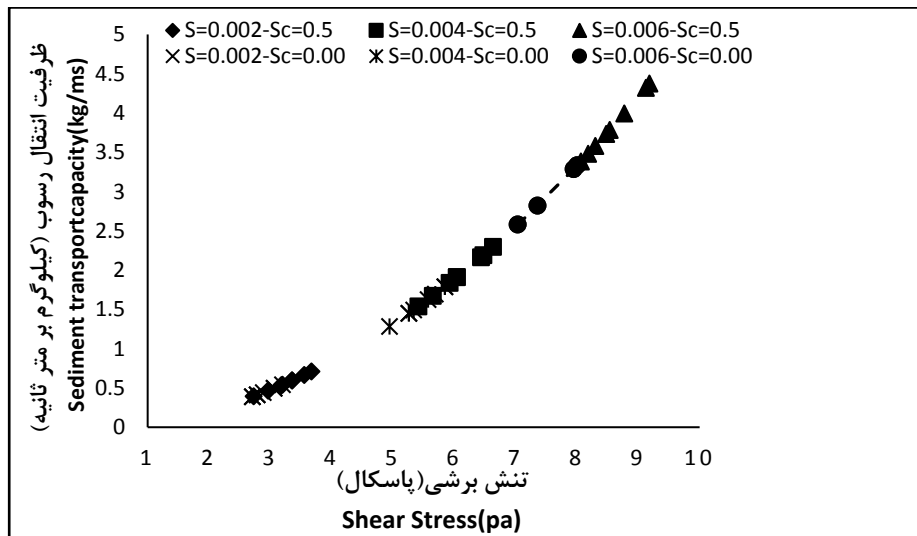
تنش برشی برای اندازه‌های رسوب ۰/۹ و ۳ میلی‌متر در مطالعه حاضر و برای دو اندازه رسوب ۱/۱۶ و ۰/۶۹ میلی‌متر در مطالعه ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2011) ارائه شده است. ضریب‌های همبستگی به‌دست آمده در این معادله‌ها به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۷، ۰/۹۷، برآورد شده است. تعداد زیادی از مطالعات نشان دادند که تغییرات ظرفیت انتقال رسوب می‌تواند بوسیله تغییرات تنش برشی به خوبی شبیه‌سازی شود (Finkner *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 2011) معادله‌ها نشان می‌دهند که برای همه اندازه ذرات رسوب ظرفیت انتقال رسوب به عنوان تابعی از تنش برشی افزایش یافته است. همچنین نشان داده شده که با افزایش اندازه ذره رسوب، ضریب رگرسیون کاهش یافته است.

رسوب بسیار مهم است. رابطه بین ظرفیت انتقال رسوب و توان جریان واحد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که بین توان جریان و ظرفیت انتقال رسوب، رابطه‌ای نمایی وجود دارد. کمترین توان جریان واحد برای انتقال رسوب برای شیب طولی ۰/۰۰۲ و شیب عرضی صفر به‌دست آمده است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش گرادیان انرژی میزان ظرفیت انتقال رسوب افزایش یافته است و با افزایش شیب عرضی ظرفیت انتقال رسوب افزایش بیشتری خواهد داشت. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش شیب طولی، در مقایسه با افزایش شیب عرضی، تأثیر بیشتری بر ظرفیت انتقال رسوب داشته است. در جدول ۳، معادله‌های ظرفیت انتقال رسوب به عنوان تابعی از تغییرات

جدول ۲- معادله‌های آماری ظرفیت انتقال رسوب (y) با تغییر تنش برشی (x) تحت شیب‌های مختلف طولی و عرضی

Table 2- Statistical equations of sediment transport capacity(y) by changing shear stress(x) under different longitudinal and transverse slopes

دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge(l/s)	شیب عرضی (Sc) Transverse slope	شیب طولی (S) Longitudinal slope	معادله آماری Statistic Equation	ضریب همبستگی (R ²)
۱۱/۸، ۱۰/۷، ۹/۲، ۶/۱	۰/۵۷	۰/۰۰۶	$y = 0.5329e^{0.2295x}$	R ² = 0.9997
۱۱/۸، ۱۰/۷، ۹/۲، ۶/۱	۰/۰۰	۰/۰۰۶	$y = 0.4058e^{0.2632x}$	R ² = 0.9998
۱۱/۸، ۱۰/۷، ۹/۲، ۶/۱	۰/۵۷	۰/۰۰۴	$y = 0.2603e^{0.329x}$	R ² = 0.9991
۱۱/۸، ۱۰/۷، ۹/۲، ۶/۱	۰/۰۰	۰/۰۰۴	$y = 0.1315e^{1.636.9x}$	R ² = 0.9993
۱۱/۸، ۱۰/۷، ۹/۲، ۶/۱	۰/۵۷	۰/۰۰۲	$y = 0.0732e^{0.6228x}$	R ² = 0.9977
۱۱/۸، ۱۰/۷، ۹/۲، ۶/۱	۰/۰۰	۰/۰۰۲	$y = 0.0625e^{0.6761x}$	R ² = 0.9996



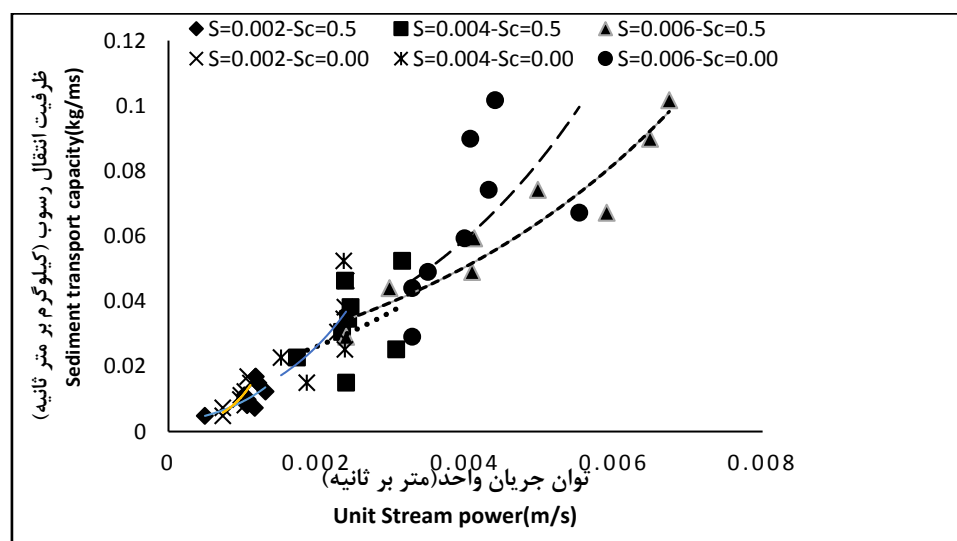
شکل ۱۰- ارتباط ظرفیت انتقال رسوب (T_c) با تنش برشی (τ) در شیب های طولی و عرضی متفاوت

Fig.10-relationship of sediment transport capacity (T_c) with shear stress (τ) in different longitudinal and transverse slopes

جدول ۳- مقایسه توابع ظرفیت انتقال رسوب به عنوان تابعی از تنش برشی (τ) برای اندازه های مختلف ذره رسوب

Table 3- Comparison of Transport capacity as a power function of shear stress (τ) for different sediment sizes

تابع Function	محقق researcher	اندازه ذره (میلی متر) Size(mm)	ضریب همبستگی R^2
$T_c = 0.01211\tau^{2.320}$	Zhang et al(2011)	$d_{50} = 1.16$	۰/۹۷
$T_c = 0.01511\tau^{2.314}$	Zhang et al(2011)	$d_{50} = 0.69$	۰/۹۷
$T_c = 0.054\tau^{1.982}$	مطالعه حاضر	$d_{50} = 0.9 - 3$	۰/۹۹



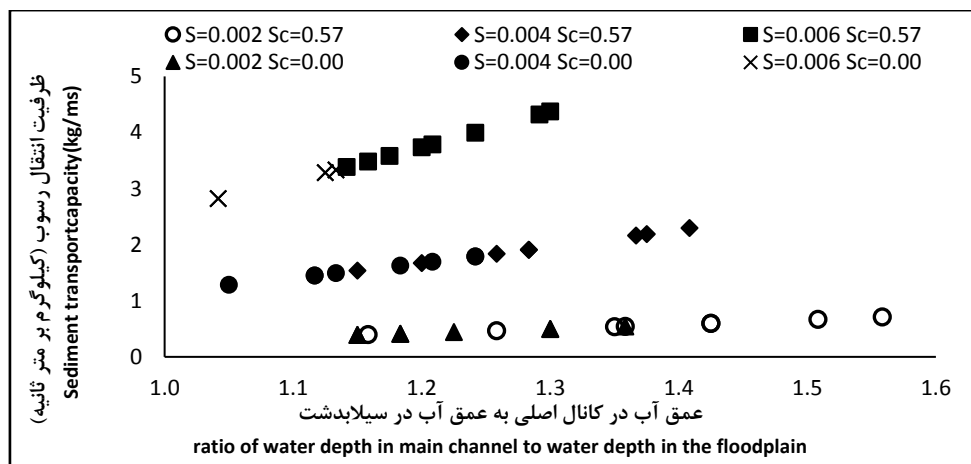
شکل ۱۱- ارتباط ظرفیت انتقال رسوب (T_c) با توان جریان واحد (P) در شیب های طولی و عرضی متفاوت

Fig.11-relationship of sediment transport capacity (T_c) with unit flow power (P) in different longitudinal and transverse slopes

در دبی ۱۱/۸ لیتر بر ثانیه رخ داد. با افزایش عمق آب در کانال به عمق آب در سیلاب‌دشت و وجود زبری در بستر کانال میزان مقاومت در برابر جریان افزایش می‌یابد و هر اندازه ذرات رسوب کوچک‌تر باشد میزان ته‌نشینی بیشتر و درصد رسوب خروجی کمتر می‌شود.

در نتیجه، با افزایش دبی و عمق جریان ظرفیت انتقال رسوب افزایش می‌یابد و با در نظر گرفتن تغییرات شیب طولی از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۶ و شیب عرضی از صفر به ۰/۵ مطابق با نمودار شکل ۱۲ در شیب طولی ۰/۰۰۶ و شیب عرضی ۰/۵۷ ظرفیت انتقال رسوب افزایش بیشتری نشان می‌دهد. کمترین شیب تغییرات ظرفیت انتقال رسوب در شرایط شیب طولی ۰/۰۰۲ و شیب عرضی صفر و ۰/۵ است.

شکل ۱۲ تغییرات ظرفیت انتقال رسوب به‌ازای نسبت عمق آب در کانال اصلی به عمق آب در سیلاب‌دشت را نشان می‌دهد. این تغییرات در دو مدل با شیب طولی مختلف و شیب عرضی صفر و ۰/۵ ارائه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش عمق نسبی میزان رسوب بیشتری از فلوم خارج می‌شود و با این تغییرات مقایسه در دو اندازه ذرات ۳ و ۰/۹ میلی‌متر نشان می‌دهد که کمترین مقدار رسوب شسته شده در این مدل در زمانی در دبی ۶/۱ لیتر بر ثانیه رخ می‌دهد که شیب طولی کانال مقداری برابر با ۰/۰۰۲، شیب عرضی صفر و قطر متوسط ذراتی برابر با ۳ میلی‌متر است. در همین حال، حداکثر مقادیر رسوبات شسته‌شده در مدل آزمایشگاهی با شیب طولی ۰/۰۰۶، شیب عرضی ۰/۵۷ و قطر متوسط ذراتی برابر با ۳ میلی‌متر

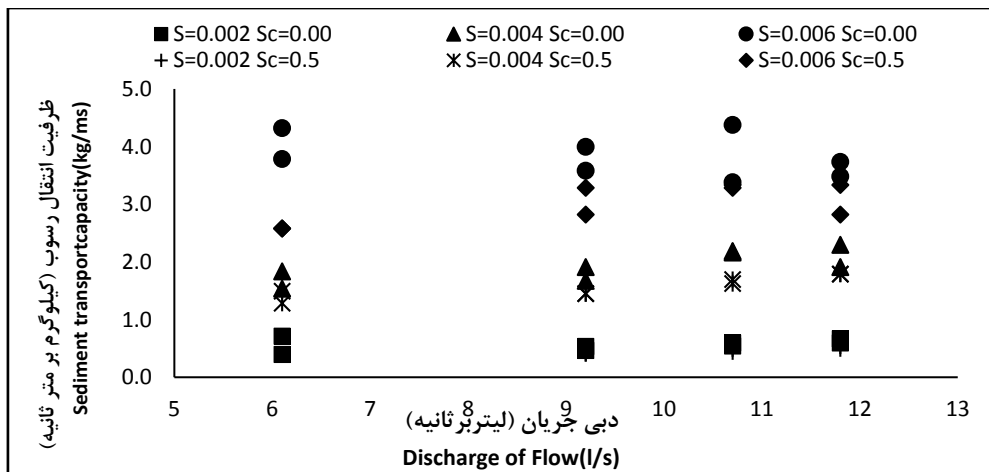


شکل ۱۲- تغییرات نسبت عمق آب در کانال اصلی به عمق آب در سیلاب‌دشت و وزن رسوبات شسته‌شده، مدل کانال مرکب با شیب جانبی صفر و ۰/۵ و دانه‌بندی مختلف

Fig.12-Changes in the ratio of water depth in main channel to water depth in the floodplain and weight of leached sediments, combined channel model with zero & 0.5 lateral slopes and different granulation

در حقیقت، با افزایش اندازه ذره رسوب میزان زبری در کانال افزایش می‌یابد و باعث ایجاد مقاومت بیشتر در برابر جریان و کاهش ظرفیت انتقال رسوب می‌شود. با افزایش مقاومت در برابر جریان، میزان سرعت کاهش می‌یابد و در شیب‌های کم (۰/۰۰۲) تغییرات افزایش ظرفیت انتقال رسوب با افزایش دبی، کم و با افزایش شیب تغییرات ظرفیت انتقال رسوب بیشتر است. با مقایسه این روند در حالت شیب جانبی صفر سیلاب‌دشت با روند شیب جانبی ۰/۵، می‌توان گفت تغییرات وزن رسوبات شسته شده نسبت به دبی جریان روندی با شیب صعودی بیشتری پیدا خواهد کرد. با افزایش دبی جریان، میزان رسوب خروجی با کاهش اندازه ذرات رسوب افزایش بیشتری خواهد داشت.

در شکل ۱۳، مقادیر ظرفیت انتقال رسوب و دبی جریان برای شیب‌های طولی و شیب عرضی مختلف و همچنین در دو دانه‌بندی ۳ و ۰/۹ میلی‌متر رسم شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان و بحرانی شدن جریان، وزن رسوبات اندازه‌گیری شده در انتهای کانال افزایش پیدا می‌کند که با نتایج تحقیقات شفائی و همکاران (Shafaei *et al.*, 2019) همخوانی دارد. افزایش دبی جریان از ۶/۱ به ۱۱/۸ لیتر بر ثانیه و افزایش سرعت جریان باعث افزایش رسوب خروجی می‌شود. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری رسوب خروجی مشاهده می‌شود که تغییرات ظرفیت انتقال رسوب در شرایط وجود ذرات رسوب با اندازه ۰/۹ میلی‌متر بیشتر است و در شرایط انتقال رسوب با اندازه ۳ میلی‌متر تغییرات عدد فرود کم است. در



شکل ۱۳- تغییرات دبی جریان و ظرفیت انتقال رسوب در مدل کانال مرکب با شیب جانبی صفر و ۰/۵ و دانه‌بندی مختلف

Fig. 13-Changes discharge and sediment transport capacity, in combined channel model with zero & 0.5 lateral slopes and different granulation

سرعت جریان، دبی، نسبت عمق جریان در کانال اصلی به عمق جریان در سیلاب‌دشت) در دبی‌های مختلف (۶/۱، ۱۰/۹، ۷/۲، ۱۱/۸ لیتر بر ثانیه) و شیب طولی و عرضی متفاوت بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش شیب طولی و در شیب عرضی صفر و با کاهش اندازه ذره میزان

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی اثر دانه‌بندی ذرات رسوب و پارامترهای هیدرولیکی بر انتقال رسوب در دو مدل هیدرولیکی با شیب‌های طولی ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ و شیب عرضی صفر و ۰/۵ پرداخته شد. تغییرات پارامترهای هیدرولیکی (تنش برشی،

رسوب خروجی بیشتر خواهد شد. همچنین با افزایش تنش برشی در یک دبی مشخص و با شیب عرضی صفر، بیشترین میزان رسوب خروجی برای شیب طولی ۰/۰۰۶ رخ می‌دهد. با مطالعه ظرفیت انتقال رسوب نشان داده شد که ظرفیت انتقال رسوب با افزایش تنش برشی، تحت شیب‌های مختلف طولی و عرضی، افزایش می‌یابد. مطالعات برای بررسی اثر دانه‌بندی بر انتقال رسوب بیشتر متمرکز بر اندازه ذرات و چگالی آنها بوده است و مطالعات بیشتر برای بررسی اثر شکل و زبری ذرات لازم است. با در نظر گرفتن ذرات با دانه‌بندی مختلف و بررسی اثر اندازه آنها بر انتقال رسوب، نیاز خواهد بود مطالعات بیشتری بشود.

مراجع

- Ackers, P. (1992). Hydraulic design of two-stage channels. *J. Water Mar Eng.* 96: 247-257.
- Ackers, P. (1993). Flow formulae for straight two-stage channels. *J. Hydraul. Res.*, 31(4): 509–531.
- Agarwal, A., (1989). Interdependence of transport capacity and sediment textural characteristics. Thesis (MSc), University of Guelph, Guelph, Ontario.
- Ali, M, Sterk G, Seeger M et al .(2011). Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 8(4):6939–6965.
- Bayley, P. B. (1995). Understanding large river: floodplain ecosystems. *Bio–Science*, 45(3): 153-158.
- Chen, Y. H., Mossa, J., & Singh, K. K. (2020). Floodplain response to varied flows in a large coastal plain river. *Geomorphology*, 354, 107035.
- Finkner, S.C., Nearing, M.A., Foster, G.R. and Gilley, J.E. (1989). A simplified equation for modeling sediment transport capacity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32 (5): 1545–1550.
- Gourevitch, J. D., Singh, N. K., Minot, J., Raub, K. B., Rizzo, D. M., Wemple, B. C., & Ricketts, T. H. (2020). Spatial targeting of floodplain restoration to equitably mitigate flood risk. *Global Environmental Change*, 61, 102050.
- Govers, G. (1990). Empirical relationships for the transport formulae of overland flow. In: D.E. Walling, A. Yair and S. Berkowicz, eds. *Erosion, transport and deposition processes*. Wallingford: IAHS Press, IAHS Publ. 189, 45–63. Available at: <http://www.iahs.info/redbooks/189.htm>.
- Guy, B.T., Rudra, R.P., Dickenson, W.T. and Sohrabi, T.M. (2009). Empirical model for calculating sediment-transport capacity in shallow overland flow: model development. *Biosystem Engineering*, 103: 105–115.
- Hamidifar. H., and Omid, M. (2013). Floodplain vegetation contribution to velocity distribution in compound channels. *J. Civil Eng. Urbanism*, 3(6): 357–361.
- Hin. L. S., Bessaih. N., Ling. L. P., Ghani, A. A., Zakaria. N. A., and Seng. M. (2008). A study of hydraulic characteristics for flow in equatorial rivers. *Int. J. River Basin Manage*, 6(3): 213–223.
- Karamisheva. R., Lyness. J. F., Myers. W. R. C., and Cassells. J. B.(2005). Improving sediment discharge prediction for overbank flows. *Proc ICE–Water Manage*, 158(1): 17–24.

- Karamisheva. R. D., Lyness. J. F., Myers. W. R. C., Cassells. J. B. C., and O'Sullivan. J.(2006). Overbank flow depth prediction in alluvial compound channels. *Proc. ICE-Water Manage*, 159(3): 195-205.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Crit Rev Plant Sci*,17(4):319-464.
- Lambert M. F. and MYERS W. R. C. (1998). Estimating the discharge capacity in straight compound channels. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Water, Maritime & Energy*,130(2):84-94.
- Liu, B.Y., Nearing, M.A., Shi, P.J. and Jia, Z.S. (2000). Slope length relationships for soil erosion loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 64 (5):1759-1763.
- Martin, L.A., and Myers, R.C. (1991). Measurement of overbank flow in a compound river channel. *J. Ins. Water Environ. Manage*, 3(4): 645-657.
- Mulahasan. S., Stoesser. T., and McSherry. R. (2017). Effect of floodplain obstructions on the discharge conveyance capacity of compound channels. *J.Irrig. Drain Eng*,143(11): 1-11.
- Nehal. L., Yan. Z. M., Xia. J. H., and Khaldi. A.(2012). Flow through non-submerged vegetation. 16th Int. Water Technology Conf., IWTC 16, IWTA, Alexandria, Egypt.
- Shafaei, H., Amini, A., Shideli, A.(2019). Assessing Submerged Vegetation Roughness in Streambed under Clear Water Condition Using Physical Modeling. *Water Resources*,46(3): 377-383.
- Tinoco. R. O., and Cowen. E. A.(2013). The direct and indirect measurement of boundary stress and drag on individual and complex arrays of elements. *Exp. Fluids*, 54(1509): 1-16.
- Vigiak, O., Okoba, B.O., Sterk, G., Stroosnijder, L. (2005). Water erosion assessment using farmers' indicators in the West Usambara Mountains, Tanzania. *Catena* 64, 307 - 320.
- Wahl, T.L. (2000). Analyzing ADV data using WinADV, *ASCE Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Wang Z, Yang X, Liu J, Yuan Y. (2015). Sediment transport capacity and its response to hydraulic parameters in experimental rill flow on steep slope. *J Soil Water Conserv* 70(1):36-44
- Wormleaton. P. R., Allen. J., and Hadjipanos. P. (1982). Discharge assessment in compound channel flow. *J. Hydraul. Div*,108(10): 975-993.
- Yang, C.T.(1972). Unit stream power and sediment transport. *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 98: 1805-1825.
- Zahiri. A., Dehghani. A.A., and Hezarjeribi. A. (2012). Determination of stage discharge curve for laboratory and river compound channels applying genetic algorithm. *J. Water and Soil Conservation*, 19(2): 179-192. (In Persian).
- Zhang, G.H., Liu, Y.M., Han, Y.F. and Zhang, X.C.(2009). Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 73 (4): 1291-1297.
- Zhang, G.H., Wang, L.L., Tang, K.M., Luo, R.O. and Zhang, X.C.(2012). Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(7): 23-40.
- Zhao, L., Zhang, K., Wu, S., Feng, D., Shang, H. and Wang, J.(2020). Comparative study on different sediment transport capacity based on dimensionless flow intensity index. *Journal of Soils and Sediments*.20: 2289-2305.

Laboratory Study of Effect of Hydraulic Parameters on Sediment Transport Capacity in a Compound Channel with Lateral Floodplain Slope

A. Arab, H. Shafaei and K. Esmaili*

* Corresponding Author: Associated professor, Department of Science and Water engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi of university Mashhad, Mashhad, Iran. Email: esmaili@um.ac.ir
Received: 4 December 2020, Accepted: 5 March 2021

Extended Abstract

Introduction

Study the soil erosion process, sediment transport capacity plays a vital role in the physical description of soil erosion processes. In recent years, researchers examining the sediment transport capacity under different laboratory conditions have shown that hydrodynamic parameters, especially shear stress and unit stream power have a significant effect on sediment transport capacity. The results of researchers' studies show that this assumption is not correct (Martin et al., 1991). Increasing the transverse slope of the plain flood changes the transition stress between the flow through the main channel and the floodplain. The presentation of a method for estimating the weight of sediments discharged from the channel was investigated (Karamisheva et al., 2005). Despite the studies, the effects of sediment size on sediment transport are still not well understood and considering that previous studies have been done in direct channel, the effect of longitudinal slope and transverse slope change by changing sediment particle size in composite channel is investigated and not well understood. It should be noted that various parameters affect the hydrodynamic conditions of river floodplains. Therefore, recognizing and investigating the factors affecting this case is of special importance in hydraulic science. One of the influential factors in the hydraulic and hydrodynamic conditions of floodplains is the lateral slope of floodplains. However, qualitative and quantitative study of the parameter requires the presentation of appropriate laboratory research methods. In this study, by aiming at the effect of lateral slope of floodplain on hydraulic and hydrodynamic conditions of flow, as well as the effect of granulation and hydraulic parameters on the amount of sediment output, an experimental design was presented to investigate this parameter. Shear stress varies in longitudinal and transverse slopes.

Methodology

The experiments were performed in a laboratory compound channel 12 meters long, 30 centimeters wide and 0.5 meters high. Flow field analysis and velocity vectors upstream of the overflow were performed using measured ADV 3D speedometer data. In this study, to show the overflow flow conditions on the deposition status behind the overflow wall, the horizontal velocity in the grid drawn in a section of the channel was used. During the experiments, tools embedded at the end of the channel were used to change the longitudinal slope of the channel. It should be noted that slopes of 0.002, 0.004 and 0.006 were used to change the slope.

Dimensional analysis: The physical parameters governing the flow of composite sections are presented in Equation of (1):

$$V_{out} = f(Q_f, h_o, h_s, hf, S_o, S_y, b, w, V, \gamma, \mu, \sigma, \rho, g, B, d_{50}, \gamma_s) \quad (1)$$

Q = flow rate (liters per second); h_o = water depth in the canal (meters), h_s = sediment height (meters); hf = height of plain flood; b = plain flood width (meters), S_o = longitudinal slope of the canal (no dimension); S_c = transverse slope of the channel (without dimension), w =

width of the main channel (meters); V = flow rate (meters per second); γ = weight mass of fluid (Newton per cubic meter); μ = water dynamic viscosity (Pascal-s); σ = fluid surface tension (Newtons per meter); ρ = fluid density (kg / m³); g = acceleration of the earth's gravity (meters per square second); B = total channel width (meters); V_s = sediment volume of the channel (cubic meters) and d_{50} = average particle diameter (mm). In the above parameters in relation to dimensional analysis and Buckingham theorem, some parameters can be omitted from the above parameters. For example, because the water thickness on the floodplain is large enough, surface tensile forces can be avoided. Also considering that the transverse slope and the length slope are dimensionless parameters. They can be taken out of calculations and introduced as a dimensionless number. To simplify dimensional analysis, it is better not to consider this parameter. With these interpretations it can be stated that:

$$\pi_1 = S_0, \pi_2 = S_c, \pi_3 =, \pi_4 =, \pi_5 =, \pi_6 =, \pi_7 =, \pi_8 = \frac{W_{out}V}{\gamma_s \sqrt{g} h_0^{3.5}} \quad (2)$$

$$Vs = f(h_0, h_s, hf, b, w, V, \gamma, \mu, \rho, g, B, d_{50}, \gamma_s)$$

(3)

Results and Discussion

As the shear stress increases at different longitudinal and transverse slopes, the sediment transport capacity increases. These findings indicate that the slope has a positive effect on shear stress. The results show that the transverse slope has a significant effect on the increase and change of shear stress with sediment transfer capacity and in the transverse slope of 0.5 and in different longitudinal slopes, increase in sediment transfer capacity is more and washed sediment increased (Fig.1). Sediment transport capacity measured with the unit stream power has changed in different slopes (Fig.2). With increasing depth of flow in main channel to depth of flow in floodplain, more sediment is removed from the flume and the least amount of sediment washed is when the longitudinal slope is equal to 0.002, transverse slope zero, and median particle diameter is 3mm, occurring in discharge of 1.6 l/s (Fig.3). As the Froude number increases, the amount of sediment output will increase more when the size of the sediment particle decreases.

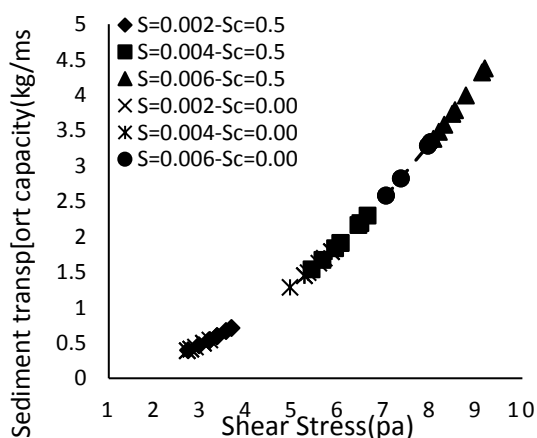


Fig. 1--relationship of sediment transport capacity (T_c) with shear stress (τ) in different longitudinal and transverse slopes

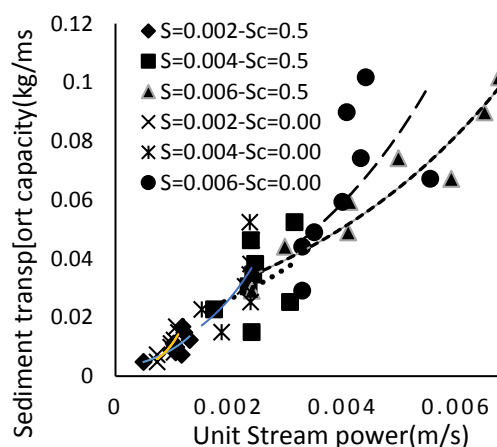


Fig.2-relationship of sediment transport capacity (T_c) with unit flow power (P) in different longitudinal and transverse slopes

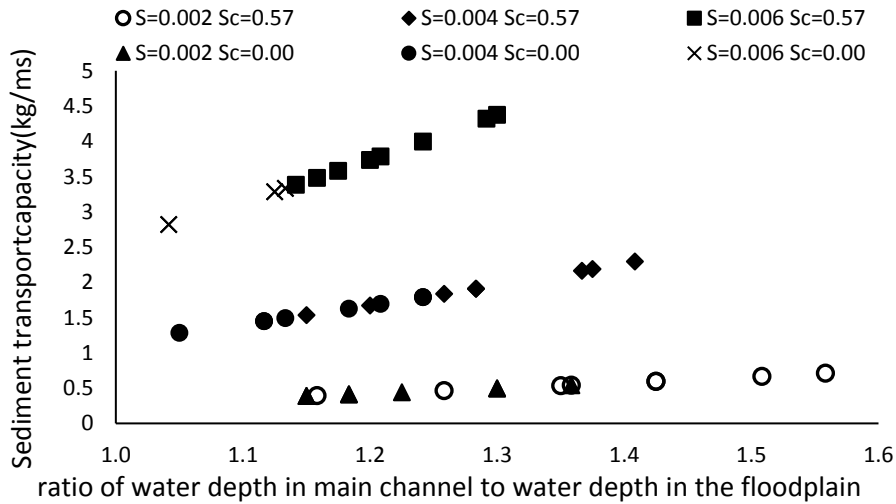


Fig.3-Change the ratio of water depth in main channel to water depth in the floodplain and weight of leached sediments, combined channel model with zero & 0.5 lateral slopes and different granulation

Conclusions

In this study, the effect of grain size and hydraulic parameters on sediment transport in two hydraulic models with longitudinal slopes of 2,4 and 6 per thousand and transvers slopes of zero and 0.5 were investigated. The results showed that with increasing the longitudinal slope, at zero transverse slope, with decreasing particle size, the amount of output sediment would increase. Most leached sediment in zero transverse slope and longitudinal slope 0.006 has occurred. Further studies are needed considering the large particle size range and transverse slopes with greater range of variation.

Keywords: Froude number, Floodplain, Granulation, Shear stress, Stream power