

مطالعه آزمایشگاهی هیدرولیک جریان و انتقال رسوب در مقاطع مرکب غیر منشوری

حجت الله یونسی^{۱*}، محمدحسین امید^۲ و سیدعلی ایوب زاده^۳

- ۱- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان
- ۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
- ۳- استاد گروه مهندسی آبیاری دانشگاه تربیت مدرس

* yonesi.h@lu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۲۶؛ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۶)

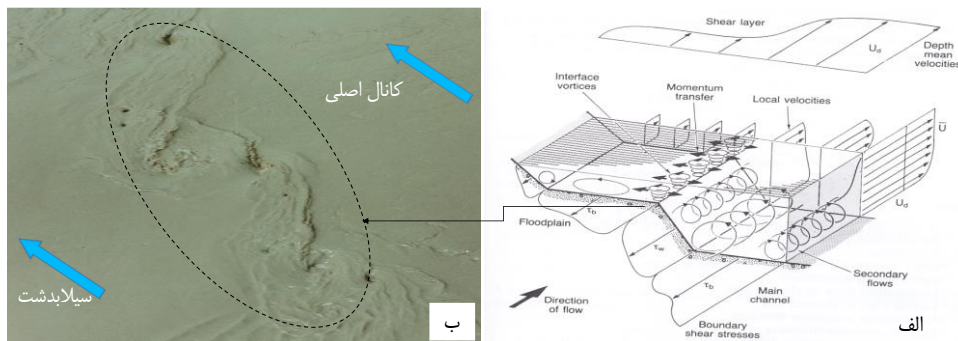
چکیده- در رودخانه‌هایی با مقطع مرکب معمولاً وجود زبری نسبتاً زیاد سیلاب‌دشت‌ها در مقایسه با کانال اصلی، باعث اختلاف سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. اختلاف سرعت نیز لایه‌های برشی در محل اتصال جریان کانال اصلی و سیلاب‌دشت را تولید می‌کند و تشکیل لایه‌های برشی نیز باعث تولید آشفتگی‌هایی در صفحه مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌شود. در چنین شرایطی نمی‌توان از متوسط سرعت جریان برای محاسبه پارامترهای نظیر تنش برشی و دبی بار بستر استفاده نمود. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر زوایای مختلف واگرایی سیلاب‌دشت‌ها با زبری‌های متفاوت بر هیدرولیک جریان و میزان انتقال رسوبات باربستر پرداخته شده است. آزمایش‌های این تحقیق در یک کانال بتنی با مقطع مرکب مستطیلی متقارن انجام شده است. در مجموع ۳۶ آزمایش (۹ آزمایش در حالت منشوری و ۲۷ آزمایش در حالت غیرمنشوری) انجام شده است. برای اندازه‌گیری سرعت در مقاطع مختلف طولی برای آزمایش‌هایی که با اعماق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ بودند از میکرومولینه و برای آزمایش‌های با عمق نسبی ۰/۳۵ از سرعت‌سنج سه‌بعدی (ADV) با فرکانس ۲۰۰ هرتز و مدت‌زمان یک دقیقه برای هر ۲۰ میلی‌متر از عمق جریان و در فواصل عرضی مشخص استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش هر سه عامل نسبت زبری، زاویه واگرایی و عمق نسبی باعث تغییرات چشم‌گیری در هیدرولیک جریان و میزان انتقال رسوب خواهد شد.

کلید واژگان: انتقال رسوب، سیلاب‌دشت، کانال مرکب، مقطع غیرمنشوری.

۱- مقدمه

به وجود می‌آید و پیامد آن انتقال جرم و ممنتوم است که در شکل ۱ نشان داده شده است. برای نخستین بار، Sellin (1964) پدیده اثر متقابل بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و کاهش دبی کل مقطع در اثر ایجاد آشفتگی ناشی از وجود گردابه‌ها در بین مقاطع جزئی را بیان کرد. از آن زمان به بعد، مطالعات زیادی درباره اصلاح روش‌های معمول محاسبه دبی با توجه به انتقال ممنتوم صورت گرفته است. به‌طور مثال می‌توان به تحقیقات Shiono & Knight (1991), Myers (1987), Tominaga

زمان بروز سیل در رودخانه‌ها، سطح آب در مقطع اصلی رودخانه افزایش می‌یابد و جریان به سیلاب‌دشت‌های اطراف آن وارد می‌شود. در این حالت، مقطع جریان عبوری به‌صورت مرکب درمی‌آید. مقاطع مرکب ترکیبی از یک مقطع عمیق اصلی و یک یا دو سیلاب‌دشت عریض هستند. به دلیل متفاوت بودن سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، گردابه‌هایی در فصل مشترک جریان این دو



شکل ۱ الف: شمای مکانیزم‌های مختلف هیدرودینامیکی جریان در کانال مرکب، ب: تشکیل لایه‌های برشی در صفحه عمودی بین کانال اصلی و سیلابدشت (Knight and Hamed, 1984)

$$\rho g H S_f + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \lambda \sqrt{\frac{g n^2}{H^{1/3}}} H^2 U \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\rho g n^2}{H^{1/3}} \sqrt{1+s^2} U^2 \quad (2)$$

$$= \Gamma + \rho K_r H U \frac{\partial U}{\partial y}$$

که در آن S_f , λ , n , K_r به ترتیب شیب خط انرژی، ضریب بدون بُعد لزوجت گردابه‌ای، ضریب زبری مانینگ، نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی جریان (V/U) است.

Rezaei and Knight (2009) قابلیت کاربرد روش Shiono and Knight را برای کانال‌های مرکب با سیلابدشت غیرمنشوری آزمودند و نشان دادند که این روش نمی‌تواند درک درستی از هیدرولیک جریان را در مقاطع مرکب غیر منشوری ارائه دهد. از این رو با نوشتن معادله ممتنم در جریان دائمی غیریکنواخت برای کانال غیرمنشوری همگرا این مدل را به منظور برآورد متوسط سرعت عمقی، تنش برشی مرزی و تعیین روابط دبی-اشل توسعه دادند. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق آن است که مقدار تنش برشی رینولدز در حد فاصل بین کانال اصلی و سیلابدشت با افزایش فاصله جانبی کاسته می‌شود، اختلاف شیب خط انرژی و شیب کف کانال معنی‌دار است و با افزایش عمق نسبی و زاویه همگرایی این اختلاف بیشتر می‌شود. در بحث انتقال رسوب در مقاطع مرکب منشوری نیز می‌توان به تحقیقات (Knight and Brown (2001), Tang and Knight (2006), Ayyoubzadeh (1997), اشاره کرد.

Tang and Knight (2006) با بررسی اثر زبری سیلابدشت بر ظرفیت انتقال، هندسه فرم بستر، مقاومت جریان و سرعت انتقال رسوب در کانال اصلی نشان دادند که در

& Nezu (1991), Prinos et al. (1985), Knight and Hamed (1984) و دیگر محققان درباره تسهیل روابط هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب منشوری و مستقیم اشاره کرد. یکی از معروف‌ترین معادلات موجود در این زمینه معادله Shiono and Knight (1991) است که به صورت رابطه (۱) ارائه شده است:

$$\tau_b = \left[1 / \left(1 + \frac{1}{s^2} \right) \right]^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho g H S_0 - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ H \left[(\rho \overline{UV})_d - \bar{\tau}_{yx} \right] \right\}}{\right)} \quad (1)$$

$$U_d = 1/H \int_0^H u \cdot dz, \quad V_d = 1/H \int_0^H v \cdot dz$$

$$\bar{\tau}_{yx} = 1/H \int_0^H (-\rho \overline{u'v'}) dz, \quad \Gamma = \frac{\partial}{\partial y} \left[H (\rho \overline{UV})_d \right]$$

که در آن τ_b تنش برشی، s شیب دیواره جانبی کانال، ρ چگالی سیال، g شتاب ثقل، H عمق جریان، S_0 شیب کف کانال، V_d و U_d سرعت متوسط‌گیری شده طولی و عرضی در عمق، Γ ترم جریان ثانویه متوسط‌گیری شده در عمق، τ_{yx} تنش برشی رینولدز و x, y, z به ترتیب راستای طولی، عرضی و عمقی جریان است. این معادله نشان می‌دهد که علاوه بر عمق جریان و شیب خط انرژی، دو پارامتر جریان ثانویه و تنش برشی رینولدز نیز در تعیین مقدار تنش برشی بستر کانال نقش دارند. پیچیدگی جریان غیریکنواخت، زمانی که مقطع کانال مرکب به صورت غیرمنشوری (تغییر سطح مقطع عبوری) است، به مراتب بیشتر از زمانی است که مقاطع منشوری باشد.

Bousmar and Zech (2004) پارامتر انتقال جرم در اثر واگرایی یا همگرایی سیلابدشت را به ترم جریان ثانویه برای حالت غیریکنواخت، مطابق رابطه ۲، اضافه کردند:

و کمتر است تا در کانال ساده. همچنین، پروفیل عمقی سرعت جریان در تمامی مقاطع عرضی کانال، به جز در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت، از رابطه لگاریتمی سرعت تبعیت می‌کند.

Jumain *et al.* (2013) با بررسی اثر فرم بستر بر هیدرولیک جریان در کانال مرکب نامتقارن نشان دادند که با افزایش عمق نسبی، ارتفاع تلماسه بزرگ‌تر خواهد شد.

بر اساس مطالب گفته‌شده، اکثر تحقیقات در زمینه مقاطع مرکب با بستر صلب صورت گرفته و در تحقیقاتی هم که بستر متحرک بوده است، جریان به صورت دائمی و یکنواخت در نظر گرفته شده است. لذا در این تحقیق به بررسی هیدرولیک جریان و رسوب در مقاطع مرکب غیر منشوری با زاویه‌های مختلف واگرایی و نسبت زبری‌های مختلف سیلاب‌دشت به کانال اصلی پرداخته می‌شود.

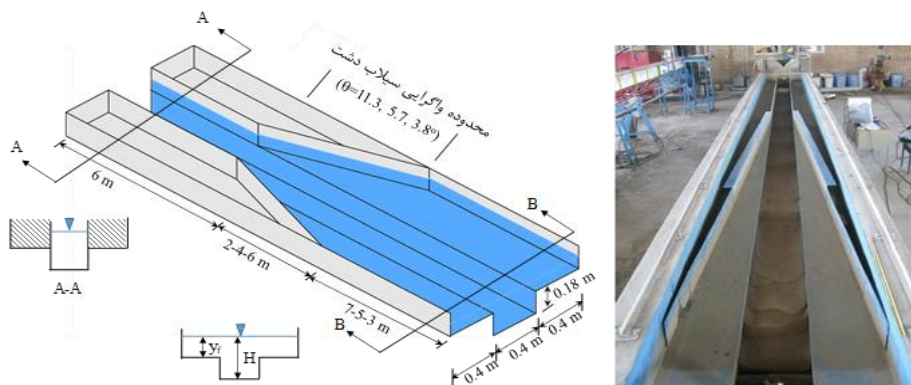
۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در یک کانال بتنی با مقطع مرکب مستطیلی متقارن به طول ۱۵ و عرض ۱/۲ متر با شیب طولی ۰/۰۰۸۸ (شکل ۲) در مرکز تحقیقات هیدرولیک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران اجرا شده است؛ عمق کانال اصلی تا لبه سیلاب‌دشت برابر ۰/۱۸ متر و عرض کانال اصلی و هر یک از سیلاب‌دشت‌ها برابر ۰/۴ متر است.

سیلاب‌دشت هموار، بین ارتفاع تلماسه‌ها و عدد رینولدز ذره، رابطه‌ای خطی وجود دارد؛ اما با ایجاد عوامل زبری، ارتفاع تلماسه‌ها در مقایسه با بستر هموار زیادتر می‌شود و تغییرات به صورت غیرخطی درمی‌آید. با افزودن عوامل زبری (مانند پوشش گیاهی) در سیلاب‌دشت، ارتفاع جریان نیز بیشتر می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که غلظت کل اندازه‌گیری شده بار بستر، نخست با افزایش عمق تا حالت لبریز سریع افزایش پیدامی‌کند و پس از آن با افزایش ارتفاع آب و پخش آن به سیلاب‌دشت، غلظت رسوب بار بستر در داخل کانال اصلی کاهش می‌یابد و با افزایش زبری سیلاب‌دشت و کاهش تنش برشی کف در کانال اصلی، میزان انتقال رسوب بستر به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

Karamisheva *et al.* (2006) کارآیی نه فرمول برآورد بار بستر را برای مقاطع مرکب مستقیم و پیچان‌رودی بررسی کردند و یکی از مهم‌ترین نتایجی که به دست آوردند آن بود که: اکثر رابطه‌ها در محاسبه دبی رسوب در عمق‌های بالاتر از عمق لبریزی در کانال مئاندری، نسبت به کانال مستقیم، بسیار ضعیف عمل می‌کنند به دلیل وجود ترم‌های تنش برشی ذره و بهره‌گیری از سرعت برشی موثر بر حرکت رسوبات بستر، روش Yang (1996) برتری خوبی نسبت به سایر روش‌ها دارد.

Hu and Ji (2010) با بررسی نحوه انتقال بار معلق در مقاطع مرکب غیرمنشوری و متقارن و مقایسه آن با مقطع منشوری نشان دادند که ظرفیت انتقال جریان در کانال مرکب مستقیم بیشتر است تا در کانال با مقطع غیرمنشوری



شکل ۲ نمای کلی کانال مرکب غیرمنشوری (واگرا) با زاویه‌های ۳/۸، ۷/۵ و ۳/۱۱ درجه

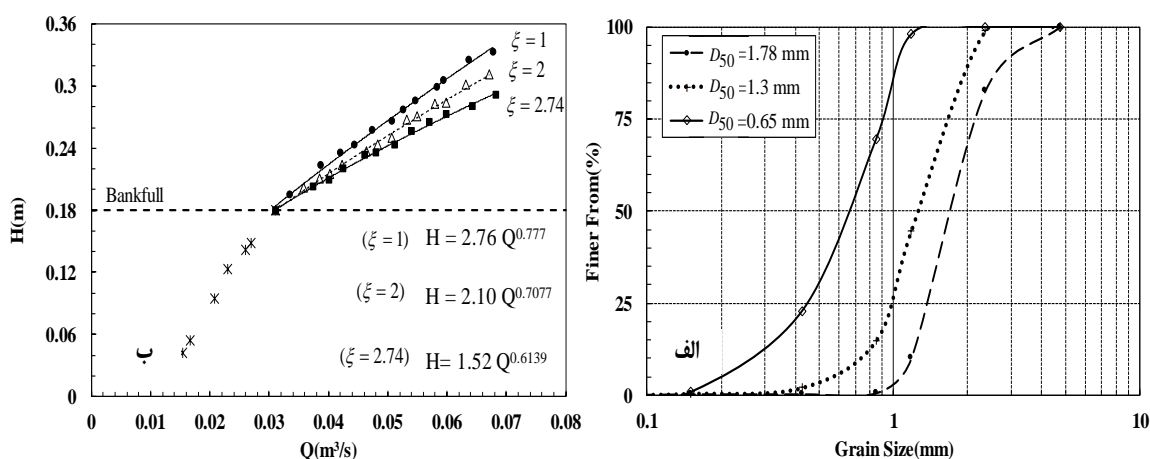
در کانال اصلی (D_{50mc})، و Dr عمق نسبی جریان برابر y_f/H است (y_f عمق جریان روی سیلابدشت است). یادآوری می‌شود در این تحقیق از سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ در وسط زاویه واگرایی استفاده شده است. در شکل ۳، منحنی دانه بندی مصالح بستر و ذرات رسوبی به کارگرفته شده به عنوان زبری در آزمایش‌ها نشان داده شده است.

در این تحقیق، در مجموع ۳۶ آزمایش (۹ آزمایش در حالت منشوری و ۲۷ آزمایش در حالت غیرمنشوری) اجرا و خلاصه نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. برای نامگذاری آزمایش‌ها از حروف اختصاری $Dr - \xi - \eta - NP$ استفاده شده است: NP معرف آزمایش غیرمنشوری، زاویه واگرایی سیلابدشت‌ها، ξ نسبت قطر متوسط ذرات زبری چسبانده شده به کف و دیواره سیلابدشت (D_{50fp}) به قطر متوسط رسوبات موجود

جدول ۱ مشخصات کلی آزمایش‌های اجرا شده در بستر متحرک با عمق‌های نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵

Re*	Fr	η	ξ	نوع آزمایش
15.85-17.47	0.314-0.352	-	1	منشوری
17.44-21.80	0.245-0.310	-	2	
15.84-19.60	0.207-0.222	-	2.74	
15.54-18.07	0.298-0.438	3.8	1	* غیرمنشوری
14.02-18.42	0.484-0.490	5.7		
15.76-17.00	0.428-0.632	11.3		
15.45-17.20	0.294-0.493	3.8	2	* غیر منشوری
14.70-18.47	0.401-0.435	5.7		
16.64-19.21	0.346-0.631	11.3		
15.38-16.20	0.292-0.545	3.8	2.74	* غیر منشوری
15.36-18.49	0.322-0.373	5.7		
17.47-21.23	0.256-0.631	11.3		

* این مقادیر در وسط محدوده واگرایی به دست آمده‌اند.



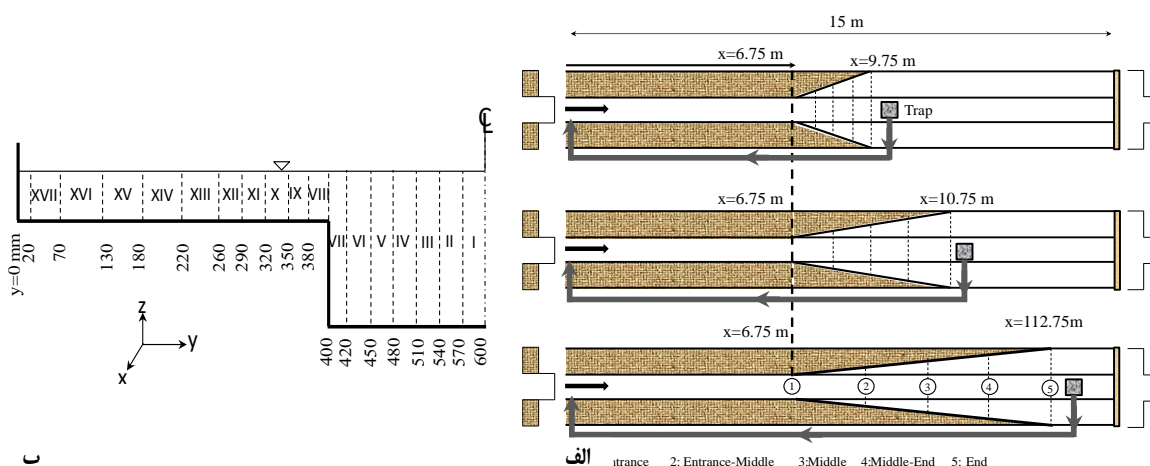
شکل ۳ الف: منحنی دانه‌بندی ذرات زبری مورد استفاده در آزمایش‌ها، ب: منحنی دبی-اشل

توسط دریچه پایاب، اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری سرعت در مقاطع مختلف طولی، طبق شکل

جریان به کمک یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه، و تنظیم عمق نسبی جریان در محدوده وسط زاویه واگرایی

شده است. برای اندازه‌گیری رقوم سطح آب در کانال با مقطع غیرمنشوری، از یک عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای برداشت پروفیل بستر نیز از یک متر لیزری با دقت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. گفتنی است با توجه به تقارن جریان در مقطع عرضی کانال، اندازه‌گیری‌ها فقط برای یک‌نیمه از مقطع عرضی کانال انجام شده است.

۴- الف برای آزمایش‌هایی که با عمق‌های نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ بودند، از میکرومولینه با قطر ۱۴ میلی‌متر در مدت زمان ۱۰ ثانیه و سه بار تکرار در هر نقطه، استفاده شده است. برای آزمایش‌ها با عمق نسبی ۰/۳۵ نیز از سرعت‌سنج سه‌بعدی (ADV) با فرکانس ۲۰۰ هرتز و مدت‌زمان یک دقیقه (۱۲۰۰۰ رکورد) برای هر ۲۰ میلی‌متر از عمق جریان و در فاصله‌های عرضی مشخص طبق شکل ۴-ب استفاده



شکل ۴ الف- مقاطع طولی، ب- مقاطع عرضی برداشت سرعت در یک‌نیمه از کانال مرکب غیرمنشوری

رسوب، رسوبات انتقال‌یافته به درون گودال بار دیگر به بالادست جریان انتقال داده می‌شود. در خروجی لوله انتقال رسوب و به کمک دو عدد شیرفلکه، می‌توان جریان را به درون سبد جمع‌آوری رسوبات منحرف کرد. پس از جمع‌آوری رسوبات در زمان مشخص و توزین آن، میزان انتقال رسوب محاسبه می‌شود (رابطه ۳). در بررسی میزان انتقال بار بستر، در کلیه آزمایش‌ها سعی شده است تا میزان انتقال رسوب پس از عبور حداقل سه تلماسه اندازه‌گیری شود. میانگین میزان انتقال همه تلماسه‌ها به‌عنوان میزان نهایی انتقال رسوب در آزمایش‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

$$G_s = \frac{m_{sed}(gT)}{t(sec)} \quad (3)$$

که در آن t و m_{sed} به ترتیب جرم نمونه اندازه‌گیری شده و زمان برحسب ثانیه است. سرانجام با انحراف دوباره جریان

پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان شروع آزمایش‌ها، شرایط شبه تعادل برقرار و در آزمایش‌ها با عمق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ سرعت و میزان انتقال رسوب اندازه‌گیری و تعیین می‌شود؛ (منظور از شرایط شبه تعادل که در بالا بدان اشاره شد شرایطی است که در آن تغییرات زمانی متوسط میزان انتقال رسوب ناچیز است در این صورت متوسط تغییرات تراز بستر در کلیه مقاطع با زمان نیز ناچیز خواهد بود). در آزمایش‌ها با عمق نسبی ۰/۳۵ که از سرعت‌سنج سه‌بعدی استفاده می‌شود، جریان ابتدا به آرامی قطع می‌شود و پس از زهکشی کامل رسوبات، بستر با پودر سیمان و پخش یک‌لایه رسوب روی سیمان به‌منظور برقراری زبری ناشی از ذرات، اصطلاحاً فریز می‌گردد. پس از خشک شدن لایه فریز شده، جریان دوباره برقرار و سرعت اندازه‌گیری می‌شود.

برای تعیین میزان انتقال رسوب نیز در انتهای هر زاویه واگرایی یک گودال تله اندازه‌گیری رسوبات تعبیه و با پمپ

میزان انتقال رسوب در مقاطع مرکب غیرمنشوری تابعی از پارامترهای اصلی به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{G_s}{\rho UH^2} = f(\eta, Dr, \xi, Fr, \theta) \quad (8)$$

۳- نتایج و بحث

الف) تأثیر نسبت زبری و زاویه واگرایی سیلابدشت بر پروفیل طولی بستر مقاطع مرکب غیرمنشوری

در شکل ۵، فرم بستر تشکیل شده پس از گذشت ۲۴ ساعت از شروع آزمایش با شرایط $NP-3.8-2.74-0.35$ و در شکل ۶ تغییرات تراز بستر در آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، ارتفاع و طول موج تلماسه‌های تشکیل شده به محض ورود به ابتدای محدوده واگرایی افزایش می‌یابد. این افزایش ابعاد هندسی تلماسه‌ها تحت تأثیر سه عامل مهم نسبت زبری سیلابدشت، زاویه واگرایی و عمق نسبی است.

در شروع آزمایش‌هایی که نسبت زبری سیلابدشت در مقایسه با کانال اصلی زیاد است، سرعت جریان در کانال اصلی، در مقایسه با سیلابدشت‌ها، بیشتر و در نتیجه میزان اولیه انتقال رسوب در کانال اصلی زیاد است. به همین دلیل، ارتفاع و طول موج تلماسه‌ها رشد می‌کند. با گذشت زمان، پروفیل بستر به توسعه نهایی خود و تقریباً به حالت تعادل می‌رسد. در این زمان و در انتهای محدوده واگرایی، ارتفاع تلماسه تا جایی رشد می‌کند که تا لبه عمق لبریزی نیز بالا می‌آید. در این حالت، سرعت جریان عبوری در انتهای واگرایی کاملاً یکنواخت می‌شود و سیلابدشت‌ها مشارکت بیشتری در انتقال دبی عبوری خواهند داشت. با افزایش عمق نسبی جریان نیز یکنواختی بیشتری در سرعت جریان به وجود می‌آید و این خود باعث افزایش ابعاد هندسی تلماسه خواهد شد. در شکل ۷، مقایسه بین ابعاد تلماسه‌های به وجود آمده در مقطع منشوری و غیرمنشوری و همچنین مقایسه اثر زاویه واگرایی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد تلماسه در زاویه‌های واگرایی بیشتر، بزرگ‌تر خواهد شد.

به داخل کانال مرکب، رسوبات انتقال داده شده با پمپ، دوباره به سیستم جریان در بالادست اضافه می‌شود.

سرعت متوسط عمقی در تمامی آزمایش‌ها پس از برداشت مقادیر سرعت نقطه‌ای از رابطه (۱) استفاده شده است. با توجه به رابطه ۴، زبری معادل ماسه برای هر سه نوع رسوب به کار برده شده به عنوان زبری بستر و دیواره سیلابدشت‌ها (۰/۶۵، ۱/۳ و ۱/۷۸ میلی‌متر) به ترتیب برابر ۲/۱۵۴، ۴/۲۹ و ۵/۸۷ میلی‌متر به دست آمد (Strickler, 1923).

$$k_s = 3.3d_m = 3.3d_{50} \quad (4)$$

بر اساس نتایج زبری معادل ماسه، بستر و دیواره‌ها از نوع زبر هستند و می‌توان از معادله لگاریتمی سرعت (رابطه ۵) در محدوده $\frac{z}{H} < 0.2$ برای تعیین مقدار سرعت برشی بستر و تنش برشی استفاده کرد (Graf and Altinakar, 1998).

$$\frac{u_z}{u_*} = 5.75 \log\left(\frac{30.2z}{k_s}\right) \quad (5)$$

که در آن u_z مقدار سرعت و z ارتفاع نسبت به کف کانال است.

تحلیل ابعادی

در تعیین عوامل مؤثر در انتقال رسوب در مقاطع مرکب غیرمنشوری، پارامترهای زیر در نظر گرفته شده‌اند:

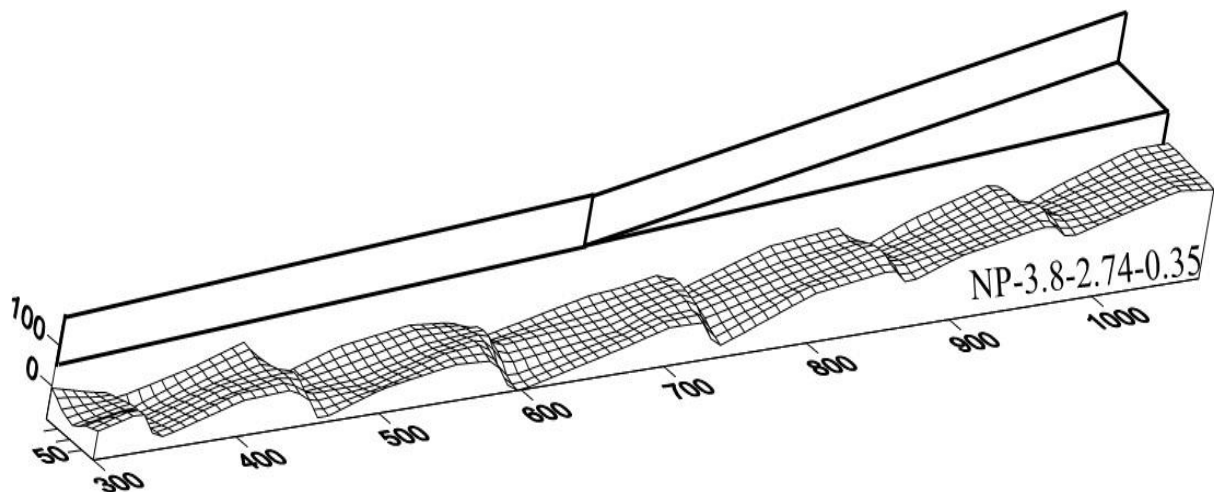
$$F = (G_s, \rho, \rho_s, H, y_f, S_0, \phi, \theta, D_{50mc}, D_{50fp}, U, u_*, n_{mc}, n_{fp}, \eta, \mu, \sigma, g, \Gamma) = 0 \quad (6)$$

که در آن G_s میزان انتقال باریستر، ϕ زاویه ایستایی رسوبات، ρ_s چگالی ذرات رسوب، θ پارامتر بدون بُعد تنش برشی، μ لزوجت سیال و σ کشش سطحی است. با در نظر گرفتن سه متغیر تکراری می‌توان نوشت:

$$G_s = \rho UH^2 \times f\left(\theta, \phi, S_b, \frac{\rho_s}{\rho}, Dr, \xi, \eta, \frac{Un_{fp}}{H^3}, \frac{Un_{mc}}{H^3}\right), \quad (7)$$

$$R_e, \frac{\sigma}{\rho U^2 H}, Fr, \frac{\varepsilon}{UH}, \frac{U_*}{U}, \frac{\Gamma}{\rho U^2}$$

با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده در این تحقیق،



شکل ۵ تغییرات تراز بستر پروفیل در آزمایش NP-3.8-2.74-0.35

مقدار پارامتر نسبت سرعت‌ها به واحد نزدیک‌تر خواهد شد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که افزایش ارتفاع تلماسه در انتهای محدوده واگرایی و در نتیجه یکنواختی جریان، مؤثرتر از تأثیرات زبری سیلاب‌دشت است.

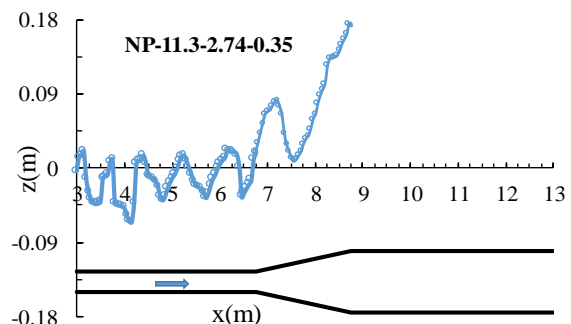
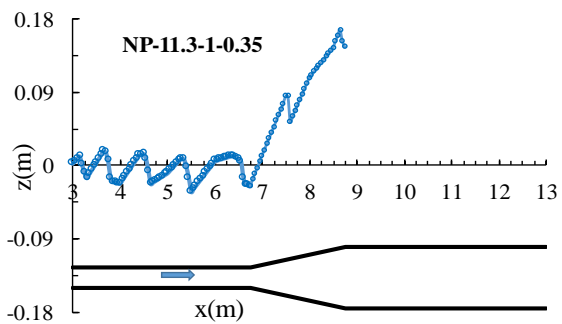
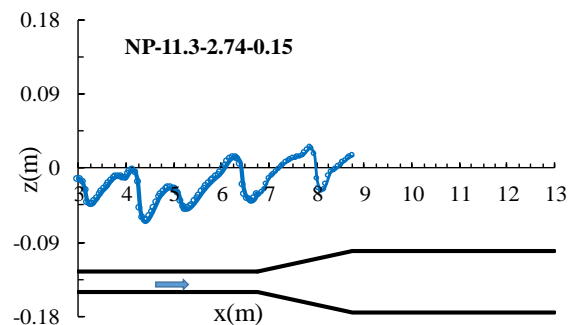
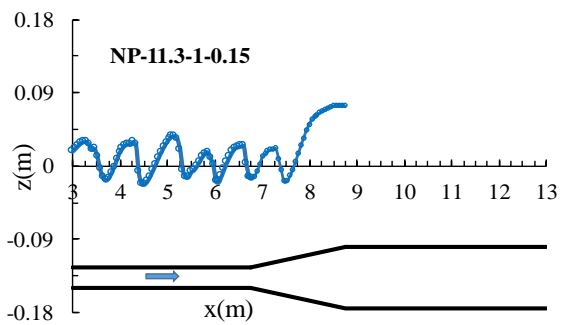
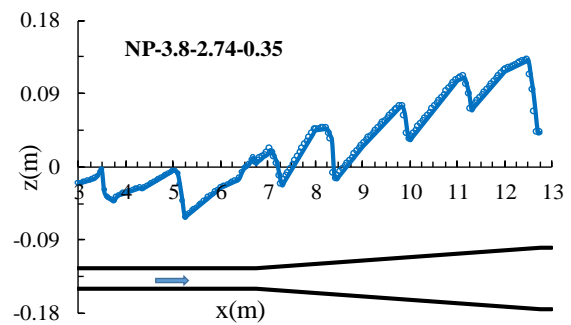
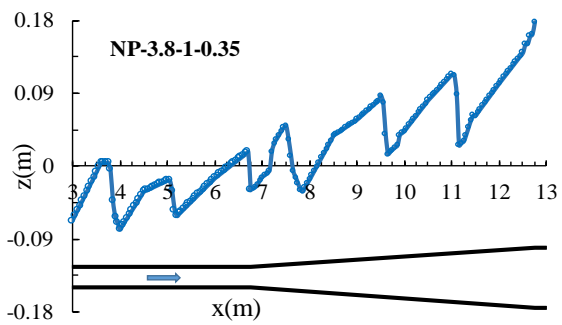
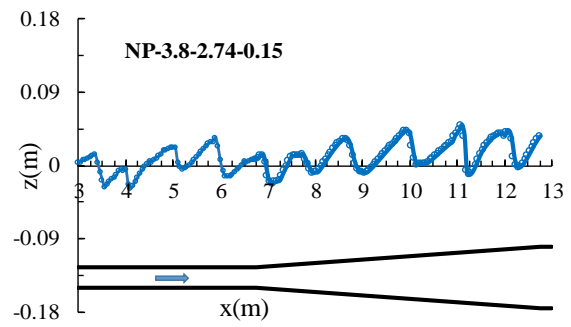
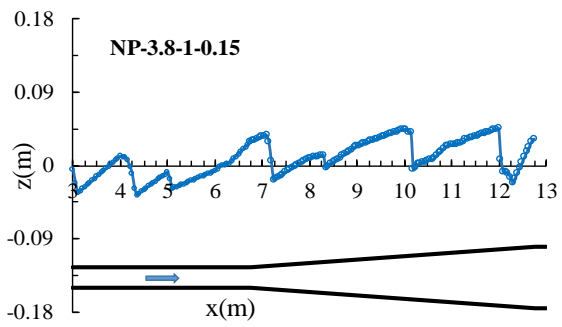
در شکل ۱۰ نیز خطوط هم‌سرعت جریان برای دو زاویه واگرایی $3/8$ و $11/3$ درجه نشان داده شده است. این شکل مؤید آن است که افزایش زاویه واگرایی باعث یکنواختی سرعت در این محدوده در مقایسه با وسط واگرایی خواهد شد.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ضریب‌های تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت در وسط واگرایی و انتهای آن، در مقایسه با نتایج آزمایش‌های بستر ثابت به عدد یک نزدیک‌تر هستند. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش تراز بستر کانال اصلی، یکنواختی مقادیر سرعت بیشتر شده است. در شکل ۱۱، ارتباط بین دو ضریب تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت در وسط مقطع واگرایی و در انتهای آن نشان داده شده است. نسبت این دو عامل در وسط و انتهای مقطع واگرا، به ترتیب $2/598$ و $2/407$ و کمتر از محدوده پیشنهادی (Chow, 1959) است. به دلیل یکنواختی توزیع سرعت جریان در انتهای محدوده واگرایی، از مقدار عددی این دو پارامتر کاسته شده است.

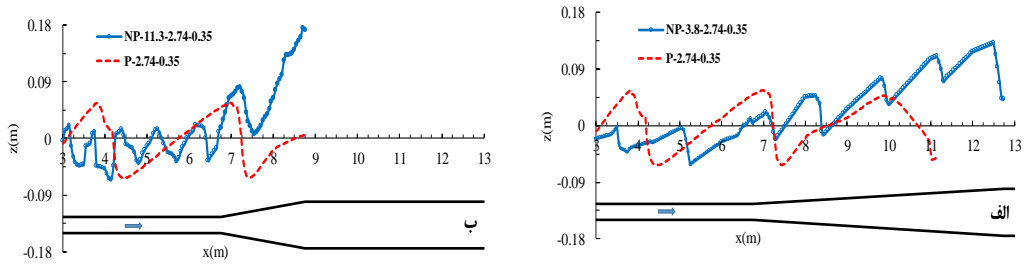
ب) تأثیر نسبت زبری و زاویه واگرایی سیلاب‌دشت بر توزیع سرعت متوسط گیری شده در عمق

بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی و زاویه واگرایی سیلاب‌دشت و افزایش زبری نسبی، یکنواختی قابل‌تأملی در توزیع عرضی سرعت جریان به وجود می‌آید. دلیل این امر آن است که در زاویه واگرایی بزرگ‌تر و نسبت زبری بالا، میزان مشارکت سیلاب‌دشت‌ها در انتقال دبی عبوری کاهش می‌یابد و درصد بالایی از جریان از کانال اصلی منتقل می‌شود. این امر میزان انتقال رسوب را بالا می‌برد و سرانجام این مقادیر بالای رسوبات در حال حرکت، در مقطع انتهایی واگرایی رسوبگذاری می‌شود. بدین ترتیب، ارتفاع تلماسه بلافاصله به حداکثر رشد خود می‌رسد و در نتیجه شکل مقطع مرکب با کانال اصلی به یک کانال مستطیلی ساده تغییر پیدا می‌کند و در نتیجه توزیع سرعت عرضی جریان یکنواخت خواهد شد.

در شکل ۹، نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت به سرعت متوسط جریان در کانال اصلی در اعماق نسبی مختلف و در زاویه‌های واگرایی نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زاویه واگرایی، این نسبت به واحد ۱ نزدیک‌تر خواهد شد. همچنین، با افزایش عمق نسبی و نسبت زبری سیلاب‌دشت به کانال اصلی نیز

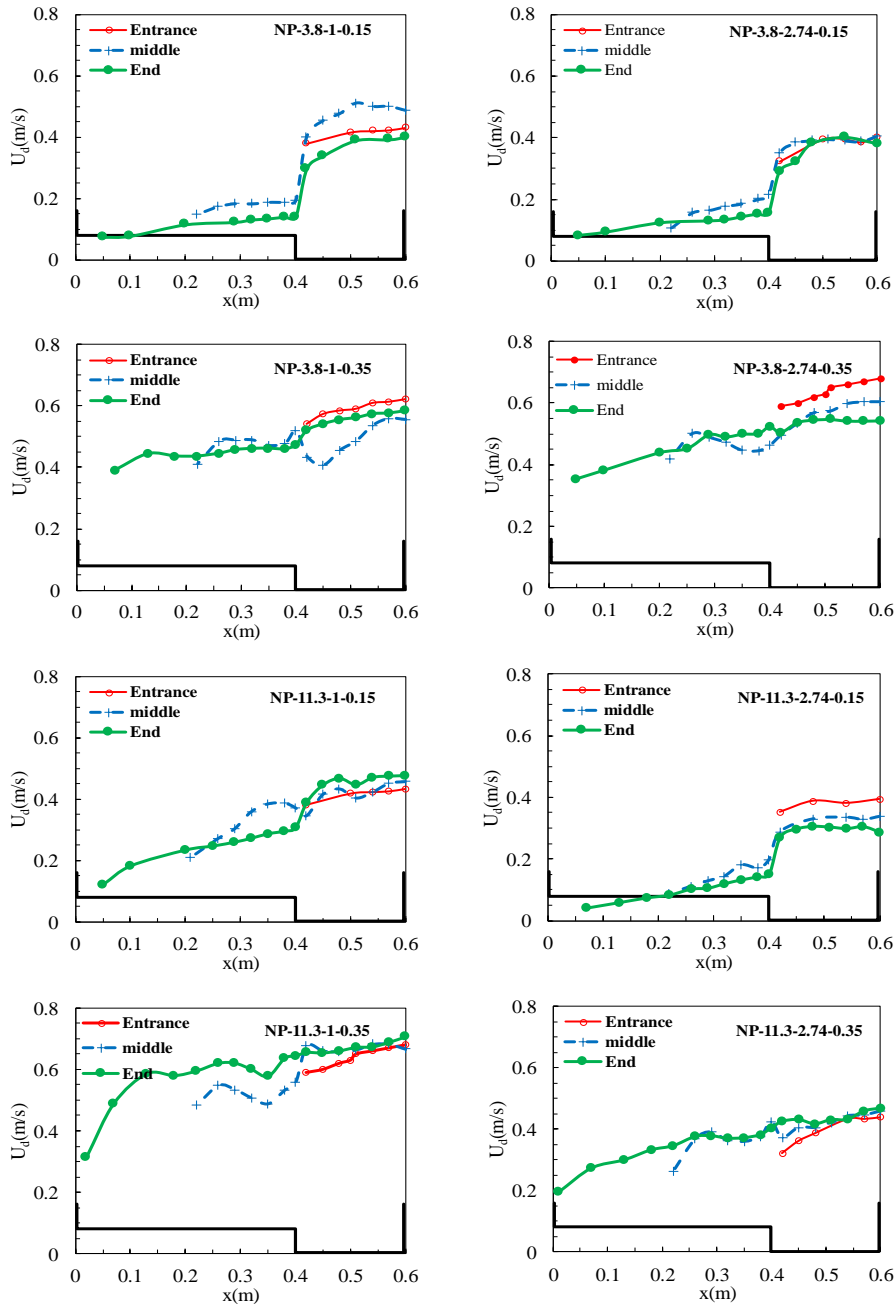


شکل ۶ تغییرات تراز بستر پروفیل با دو زاویه واگرایی $3/8$ و $11/3$ درجه (سمت چپ: $\xi = 1$ ، سمت راست: $\xi = 2.74$)



شکل ۷ مقایسه تغییرات تراز بستر در کانال اصلی در حالت $\xi=2.74$

الف: زاویه واگرایی ۳/۸ ب: زاویه واگرایی ۱۱/۳ درجه



شکل ۸ توزیع عرضی سرعت جریان با دو زاویه واگرایی ۳/۸ و ۱۱/۳ درجه و دو عمق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۳۵ (سمت چپ: $\xi=1$ ، سمت راست: $\xi=2.74$)

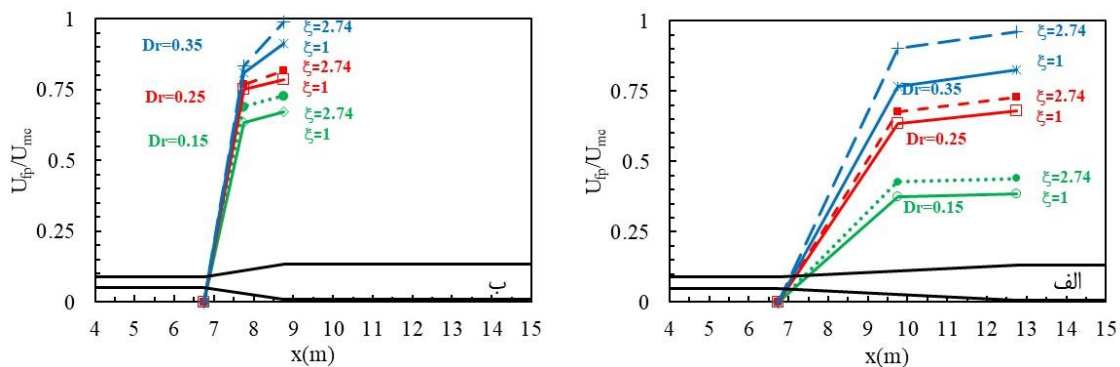
نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش زاویه واگرایی و نسبت زبری سیلاب دشت، این ترم کاهش پیدا می کند. همچنین، تغییرات ترم جریان ثانویه در وسط محدوده واگرایی همواره بیشتر است تا در انتهای آن. دلیل این امر را می توان در بالا آمدگی تراز بستر در انتهای محدوده واگرایی و سرانجام یکنواختی سرعت جریان در محدوده انتهایی، در مقایسه با وسط زاویه واگرایی، دانست.

ج) ترم جریان ثانویه

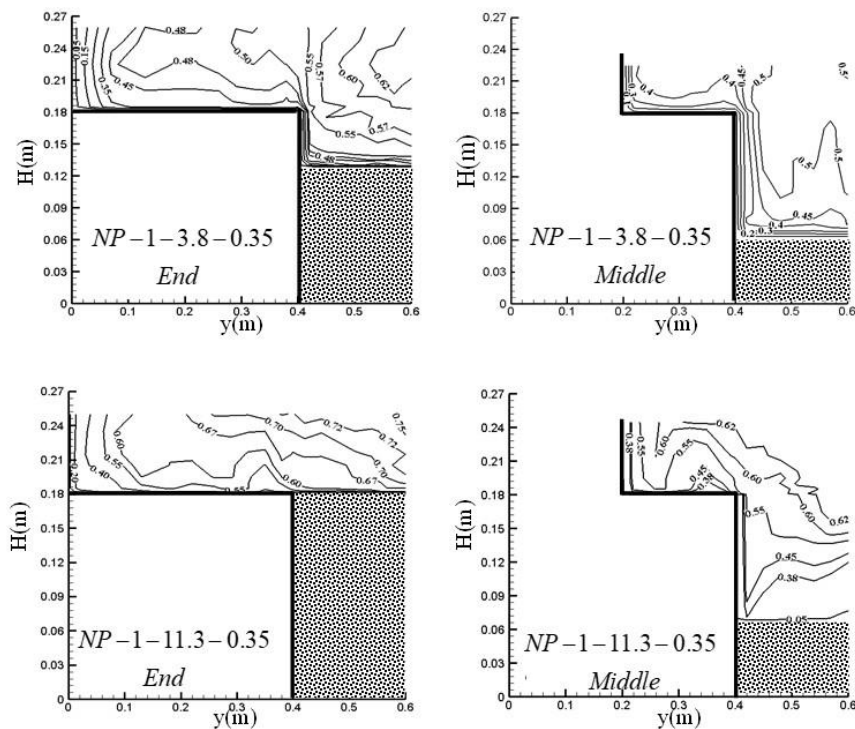
بر اساس رابطه (۹)، در آزمایش ها با عمق نسبی ۰/۳۵، با استفاده از مقادیر سرعت طولی و عرضی جریان برداشت شده توسط ADV، این ترم جریان ثانویه شده است.

$$\Gamma = \frac{\partial}{\partial y} [H(\rho \overline{UV})_d] \quad (9)$$

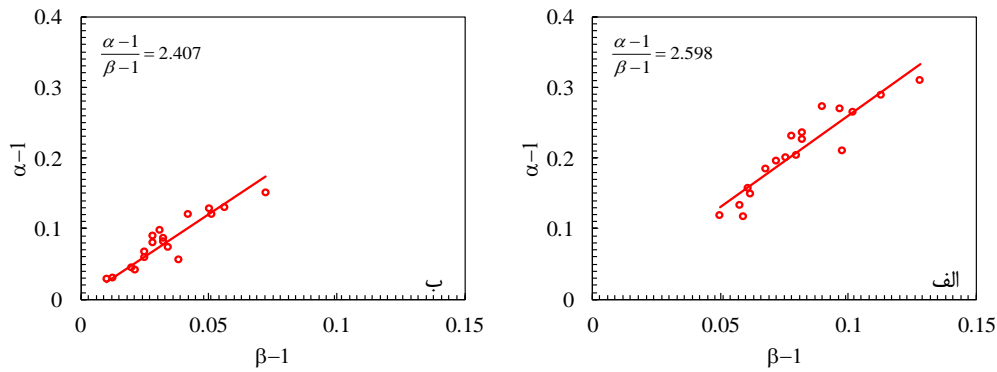
در شکل ۱۲، تغییرات ترم جریان ثانویه در دو نسبت زبری مورد آزمایش نشان داده شده است.



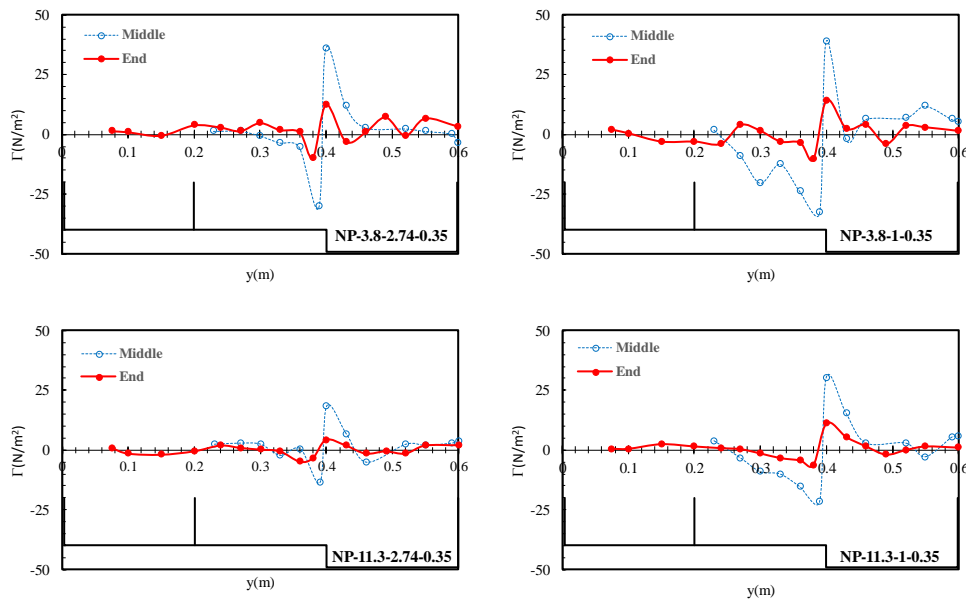
شکل ۹ نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب دشت به سرعت متوسط جریان در کانال اصلی الف: $\eta = 3.8^\circ$ ب: $\eta = 11.3^\circ$



شکل ۱۰ خطوط هم سرعت جریان به ترتیب از راست به چپ: وسط و انتهای واگرایی



شکل ۱۱ ارتباط ضریب‌های تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت. الف: وسط مقطع واگرایی ب: انتهای مقطع واگرایی



شکل ۱۲ تغییرات عرضی ترم جریان ثانویه

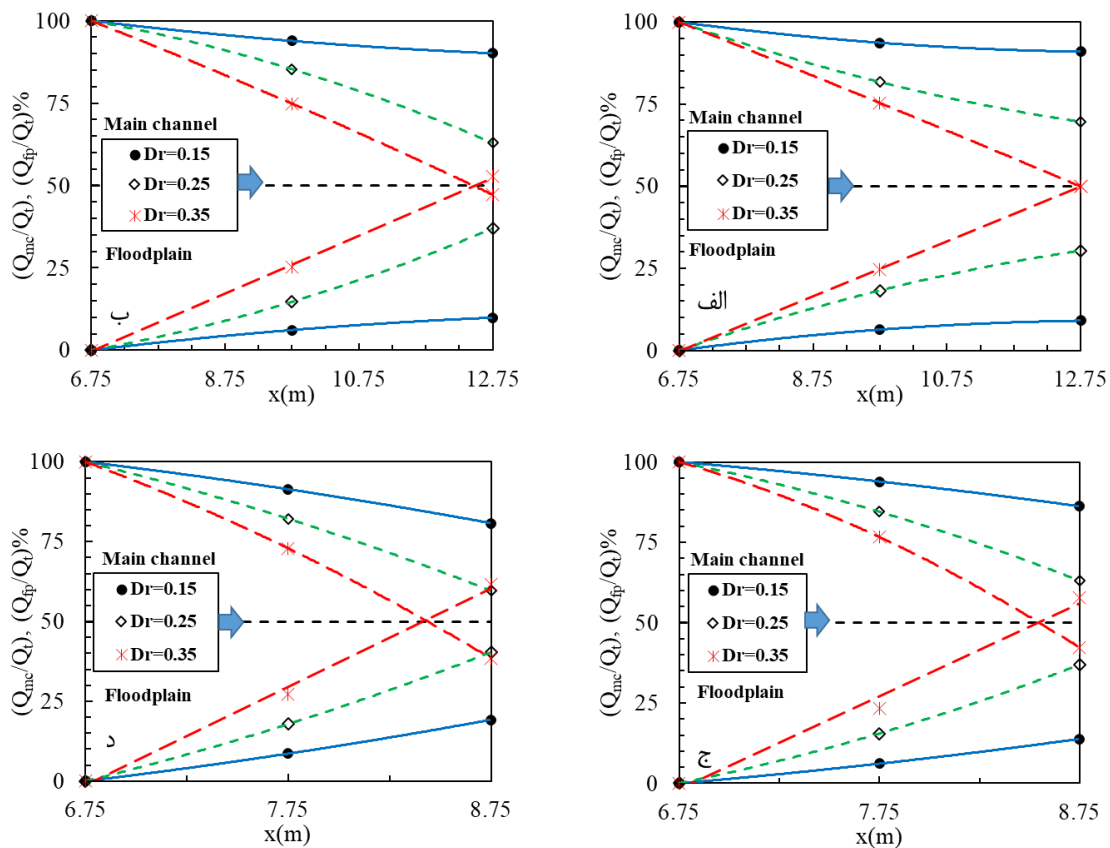
ستون راست: آزمایش‌های NP-η-1-0.35 ستون سمت چپ: آزمایش‌های NP-η-2.74-0.35

افزایش ارتفاع تلماسه‌ها در انتهای محدوده واگرایی، تراز کف کانال اصلی در مقطع انتهایی بالا می‌آید و از این لحظه به بعد سرعت جریان روی سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد و توزیع جریان یکنواخت‌تر می‌شود. نتیجه آن است که حجم (درصد) بیشتری از جریان عبوری به‌واسطه آن انتقال پیدا می‌کند.

در زاویه‌های بزرگ‌تر، به دلیل کوتاه بودن محدوده واگرایی و انتقال سریع دبی جریان روی سیلاب‌دشت، درصد بیشتری از دبی عبوری جریان نیز توسط سیلاب‌دشت انتقال می‌یابد.

د) تأثیر نسبت زبری و زاویه واگرایی بر نحوه مشارکت سیلاب‌دشت‌ها در انتقال دبی جریان

بر اساس سرعت‌سنجی‌ها در مقاطع مختلف آزمایش‌ها، دبی عبوری ورودی از سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی محاسبه شده است. در شکل ۱۳، منحنی‌های تقسیم دبی جریان بین سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی نشان داده شده‌اند. همان‌طور که قبلاً گفته شد و در این شکل نیز نشان داده شده است، با افزایش عمق نسبی، در ابتدا میزان مشارکت سیلاب‌دشت‌ها در انتقال دبی جریان کم است و پس از



شکل ۱۳ تقسیم دبی جریان بین سیلابدشت و کانال اصلی

الف: $\xi=1, \eta=3.8^\circ$ ب: $\xi=2.74, \eta=3.8^\circ$ ج: $\xi=1, \eta=11.3^\circ$ د: $\xi=2.74, \eta=11.3^\circ$

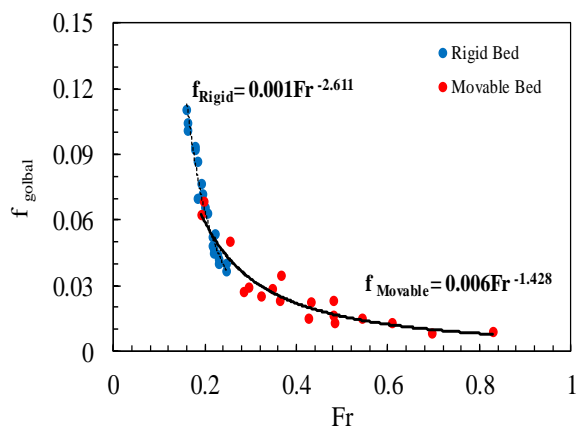
با توجه به رابطه بالا که دو پارامتر دبی و عرض سطح آب ثابت هستند، تنها عامل دخیل در تعیین مقدار عدد فرود، سطح مقطع است. حال آنکه در آزمایش‌های با بستر متحرک، به دلیل بالآمدن تراز کف کانال اصلی تا نزدیکی تراز لبریزی در انتهای مقطع واگرایی، سطح مقطع به یک کانال مستطیلی شباهت دارد و از این رو بدون وجود استهلاک انرژی جریان با سرعت بیشتر و سطح مقطع کوچک‌تر (عمق کمتر در مقایسه با عمق جریان در آزمایش‌های بستر صلب) عبور می‌کند. نتیجه نشان‌دهنده آن است که با افزایش عدد فرود جریان، ضریب زبری سراسری در انتهای محدوده واگرایی کاهش می‌یابد و به مقدار نسبتاً ثابت می‌رسد. مقایسه نتایج همچنین نشان می‌دهد که در بستر ثابت و بازه نسبتاً کوچکی از اعداد فرود، تغییرات ضریب زبری بسیار زیاد است.

ه) تغییرات ضریب زبری سراسری

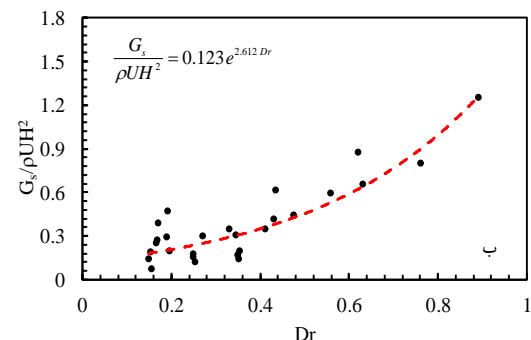
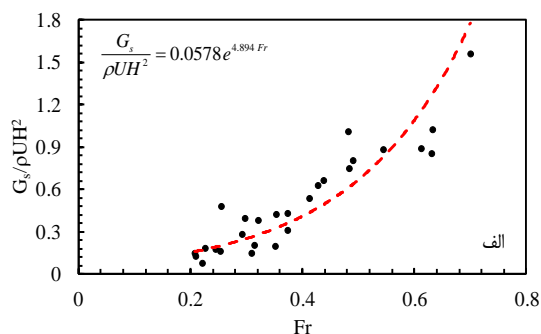
در شکل ۱۴، تغییرات ضریب زبری داریسی-ویسباخ سراسری در برابر عدد فرود جریان در آزمایش‌های کانال غیرمنشوری با بستر ثابت و متحرک نشان داده شده است. دبی‌های مورد آزمایش برای بسترهای صلب و متحرک دقیقاً با هم برابرند و معیار فقط تنظیم عمق نسبی در وسط واگرایی بوده است. در آزمایش‌های اجرا شده در کانال با بستر صلب، به دلیل استهلاک انرژی جریان در انتهای محدوده واگرایی (اثر کانال مرکب)، جریان با سرعت کمتر و ارتفاع بیشتر از مقطع انتهایی عبور می‌کند.

$$Fr = \frac{Q}{A\sqrt{gD}} = \frac{\frac{cte}{Q}}{A^{1.5} \sqrt{\frac{g}{T}}} \Rightarrow Fr \approx \frac{1}{A^{1.5}} \quad (10)$$

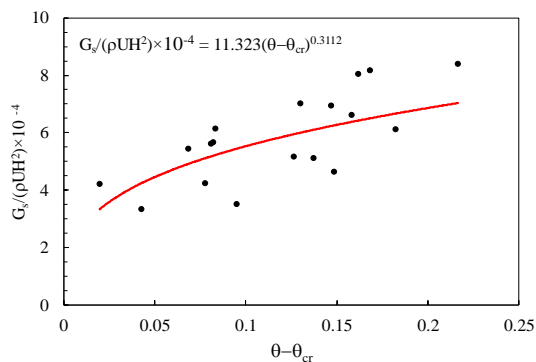
بزرگ‌تر تنش برشی صرف انتقال رسوبات به پایین دست خواهد گردید. همچنین، در مقاطع غیرمنشوری و در زاویه‌های بزرگ‌تر (طول واگرایی کوچک‌تر)، استهلاک انرژی ناشی از گردابه‌ها در طول کمی اتفاق می‌افتد و در نتیجه انرژی جریان در انتقال رسوبات مؤثر خواهد بود. پس از انتقال رسوبات به پایین دست محدوده واگرایی نیز تراز بستر در کانال اصلی بالا می‌آید و مقطع کانال به صورت یک کانال مستطیلی ساده در خواهد آمد.



شکل ۱۴ تغییرات ضریب زبری سراسری در انتهای محدوده واگرایی در برابر عدد فرود جریان



شکل ۱۵ تغییرات میزان انتقال رسوب بدون بُعد الف: در برابر عدد فرود ب: در برابر عمق نسبی



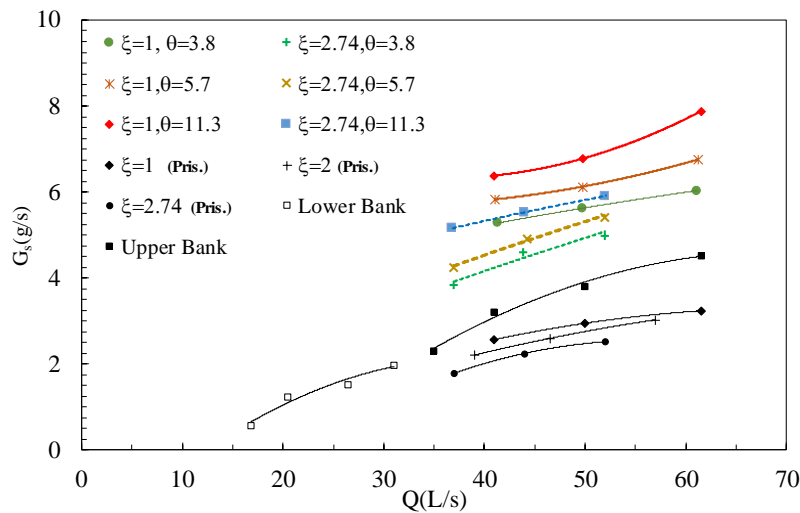
شکل ۱۶ تغییرات میزان انتقال رسوب بدون بُعد در برابر پارامتر شیلدز

و) میزان انتقال رسوب

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش دبی عبوری از کانال مرکب، میزان انتقال رسوب نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت زبری سیلاب‌دشت به کانال اصلی، میزان انتقال رسوب کاهش می‌یابد. دلیلش را می‌توان مشارکت بیشتر سیلاب‌دشت‌ها در انتقال دبی عبوری دانست. در شکل ۱۵ ارتباط بین میزان انتقال رسوب بدون بُعد در برابر عمق نسبی و عدد فرود و در شکل ۱۶ این ارتباط با پارامتر بدون بُعد تنش برشی نشان داده شده است (رابطه ۱۱).

$$G_s / (\rho UH^2) = (11.323(\theta - \theta_{cr})^{0.3112}) \times 10^4 \quad (11)$$

در شکل ۱۶ نمایان است که در تمامی آزمایش‌ها با افزایش مقادیر پارامتر تنش برشی بدون بُعد میزان انتقال رسوب نیز افزایش می‌یابد. این موضوع با نتایج تحقیق Tang and Knight (2006), Ayyoubzadeh (1997), همخوانی دارد. تغییرات میزان انتقال رسوب در مقطع مرکب منشوری و غیرمنشوری و همچنین کانال مستطیلی ساده با همان شرایط جریان در مقطع مرکب در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مقایسه نظیر به نظیر شرایط در مقطع مرکب غیر منشوری نشان می‌دهد که: میزان انتقال رسوب با افزایش زاویه واگرایی رابطه مستقیم و با نسبت زبری رابطه عکس دارد. به دلیل یکنواختی سرعت در نسبت زبری واحد ($\xi = 1$) هم برای مقطع منشوری و هم غیرمنشوری، از مقدار تنش برشی ظاهری کاسته می‌شود و در نتیجه بخش



شکل ۱۷ تغییرات میزان انتقال رسوب در برابر دبی جریان (آزمایش‌های مقطع منشوری و غیرمنشوری)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق زبری سیلاب‌دشت، زاویه واگرایی و عمق نسبی و تاثیر آنها بر هیدرولیک جریان و نحوه انتقال رسوب در مقاطع مرکب با سیلاب‌دشت غیرمنشوری بررسی شد و این نتیجه به دست آمد که افزایش هر سه عامل باعث افزایش ارتفاع تلماسه‌ها و در نتیجه باعث یکنواختی بیشتر در سرعت جریان می‌شود. با افزایش زاویه واگرایی و نسبت زبری، ارتفاع تلماسه‌های تشکیل شده در انتهای محدوده واگرایی بزرگ‌تر می‌شود که این عامل باعث می‌شود تا سرعت متوسط جریان در کل مقطع یکنواخت‌تر شود و میزان مشارکت سیلاب‌دشت‌ها در انتقال دبی جریان افزایش یابد. در این شرایط و در مقایسه با بستر ثابت، ضریب‌های تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت به عدد یک نزدیک‌تر می‌شوند. نتایج نهایی نشان می‌دهد که میزان انتقال رسوب با عدد فرود، عمق نسبی جریان و زاویه واگرایی رابطه مستقیم و با نسبت زبری رابطه عکس دارد.

۵- فهرست علائم

S_0	شیب کف
U_d, V_d	سرعت‌های طولی و عرضی در عمق
Γ	ترم جریان ثانویه در عمق
$\bar{\tau}_{yx}$	تنش برشی رینولدز در عمق
x, y, z	راستای طولی و عرضی عمقی جریان
S_f	شیب خط انرژی
λ	ضریب بدون بعد لزوجت گردابه ای
n	ضریب زبری مانینگ
K_r	نسبت سرعت عرضی به طولی جریان
D_{50fp}, D_{50mc}	قطر متوسط ذرات در کانال اصلی و در کف و دیواره سیلاب‌دشت‌ها
σ	کشش سطحی
μ	لزوجت سیال
G_s	میزان انتقال بار بستر
ϕ	زاویه ایستایی رسوبات
θ	پارامتر بدون بعد تنش برشی
H	عمق جریان در کانال اصلی
y_f	عمق جریان روی سیلاب‌دشت‌ها
u^*	سرعت برشی بستر
u_z	مقدار سرعت در ارتفاع z از کف کانال
m_{sed}	جرم نمونه اندازه‌گیری شده (بر حسب گرم)

τ_b	تنش برشی بستر
S	شیب
ρ	چگالی سیال
g	شتاب ثقل

Myers, W.R.C. (1987). Velocity and discharge in compound channels. *J. Hyd. Eng. ASCE*, 113(6): 753-766.

Prinos, P., Townsend, R. and Tavoularis, S. (1985). Structure of turbulence in compound channel flows," *J. Hyd. Eng. (ASCE)*, 111(9): 1246-126.

Rezaei, B. and Knight, D. W. (2009). Application of the Shiono and Knight Method in compound channels with non- prismatic floodplains. *J. Hyd. Research. (IAHR)* 47(6): 716-726.

Rezaei, B. and Knight, D. W. (2011). Overbank flow in compound channels with non-prismatic floodplains. *J. Hyd. Eng. (ASCE)*, 37(8): 815-824.

Sellin, R. H. J. (1964). A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche*.7: 793-802.

Shiono, K. and Knight, D.W. (1991). Turbulent Open channel flows with variable depth across the channel. *J. Fluid Mech.*, 222: 617-646.

Strickler, M. (1923). Contributions to the question of speed formula and the roughness pay for current channels and closed lines, Messages of the World Office for Water Management, Bern, Switzerland.

Tang, X. and Knight, D.W. (2006). Sediment Transport in River Models with Overbank Flows. *J. Hyd. Eng. (ASCE)*, 132(1): 77-86.

Tominaga, A. and Nezu, I. (1991). Turbulent structure in compound open channel flows. *J. Hyd. Eng. (ASCE)*, 117(1): 21-41.

Chow, Ven, T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill.

t

زمان (برحسب ثانیه)

۶- منابع

Ayyoubzadeh, S.A. (1997). Hydraulic aspects of stright compound channel flow and bed load sediment transport, PhD thesis, univ. of Birmangham, U.K.

Bousmar, D. and Zech, Y. (2004). Velocity distribution in non-prismatic compound channels. *J. Water management (ICE)*, 157(WM2): 99-108.

Graf, W.H. and Altinakar, M.S. (1998). Fluvial Hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry. Wiley, Chichester, England. ISBN 0-471-97714-4.

HU, C. and JI, Z. (2010). Flow movement and sediment transport in compound channels. *J. Hyd. Research. (IAHR)* 48(1): 23-32.

Jumain, M., Ismail, Z., Ibrahim, Z., Zaini, N.A. (2013). Bed load sediment transport rate and bed formation in straight compound channels. *Global journal of Environment Research*, 7(3):40-44.

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. *J. Water management (ICE)*, 159(WM3): 195-205.

Knight, D. W. and Hamed, M. E. (1984). Boundary shear in symmetrical compound channels. *J. Hyd. Eng. ASCE*, 110(10): 1412-1430.

Knight, D.W., and Brown, F.A. (2001). Resistance studies of overbank flow in rivers with sediment using the flood channel facility. *J. Hyd. Research. (IAHR)* 39: 283-301.

Experimental study of flow hydraulic and sediment transport in Non-prismatic compound channels

Hojjatallah Yonesi^{*1}, Mohammad Hossein Omid² and Seyed Ali Ayyoubzadeh³

1- Assistant Professor, Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture, Lorestan University.

2- Professor, Irrigation and Reclamation Eng. Dept., University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Professor, Irrigation Eng. Dept., Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*yonesi.h@lu.ac.ir

Abstract

In rivers with a compound section, typically the relatively high roughness of floodplains, as compared with the main channel, cause to flow speed difference between the main channel and the floodplain. The velocity dissimilarity also creates shear layers at the interface point of the main channel and the floodplain. The development of shear layers will also cause turbulence in the mutual plane of the main channel and the floodplain. In such conditions, the average flow speed cannot be applied to compute parameters such as shear stress, bed-load discharge, and so forth. In this research, laboratory experiments were carried out to study the effects of floodplain divergence on flow hydraulic and the rate of sediment transport for different roughness and divergent angles. 36 tests were done at a concrete flume with compound channel cross section (9 and 27 tests with prismatic and non-prismatic cross section, respectively). - The velocity in different sections were measured using a micro-propeller and ADV (with 200 Hz frequency) for depth ratio of 0.15 and 0.25 and for depth ratio 0.35, respectively. . The results reveal that the increase in all three factors of the roughness, divergence angle, and relative depth cause dramatic changes in the hydraulic of the flow and the sediment transport.

Keywords: Sediment transport, Flood plain, Compound channel, Non-prismatic cross-section.