بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه اریب بر میدان جریان در کانالهای مرکب مورب با سیلابدشتهای مایل

مصطفى دولتى مهتاج^١، بهرام رضائى*^٢

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازههای هیدرولیکی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان ^۲استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۶/۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲۷، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۶/۲۷

چکیدہ

در طبیعت به علت تأثیر شرایط توپوگرافی محلی، رودخانه ها اغلب دارای شکل نامنظم و غیر منشوری هستند. در کانالهای مرکب غیرمنشوری به دلیل تأثیر تغییر شکل مقطع در طول کانال، ساختار جریان پیچیده تر از کانالهای مرکب منشوری است. به همین دلیل بررسی ویژگیهای جریان در چنین کانالهایی امری مهم بوده و می تواند به محققان در درک بهتر رفتار جریان در رودخانه ها به ویژه در مواقع سیلابی کمک کند. در پژوهش حاضر رفتار جریان در کانال مرکب با سیلاب دشتهای مورب مایل به صورت تجربی بررسی شده است. آزمایش ها در سه عمق نسبی ۲/۰، ۳/۰ و ۴/۰ و برای دو زاویه اریب ۱۱/۳۱ و ۱۸/۳ درجه انجام شده است. نیمرخ طولی سطح آب، توزیع عرضی سرعت جریان و تنش برشی مرزی در طول ناحیه اریب اندازه گیری و گزارش شده است. نتایج حاصله بیانگر آن است که توزیع عرضی سرعت و تنش برشی مرزی در کانالهای مرکب مورب با سیلاب دشتهای مایل به صورت نامتقارن و غیریکنواخت است. همچنین سرعت جریان و تنش برشی مرزی در کانالهای مرکب مورب با سیلاب دشتهای مایل به صورت است. با افزایش زاویه اریب سیلاب دشتها از ۱۸/۳۱ به ۱۱/۳۱ درجه، تنش برشی مرزی و سرعت جریان در سیلاب دشتهای مایل به صورت است. با افزایش زاویه اریب سیلاب دشتها از ۱۸/۳ به ۱۱/۳۱ درجه، تنش برشی مرزی و سرعت جریان در سیلاب دشتها و کانال اصلی افزایش می می ایند است. با افزایش زاویه اریب سیلاب دشتها زا ۱۱/۳۱ درجه، تنش برشی مرزی و سرعت جریان در سیلاب دشتها و کانال اصلی افزایش می ایند لیکن نوسانات سطح آب کمتر می شود.

کلیدواژهها: کانال مرکب غیرمنشوری، سیلابدشتهای مورب، سیلابدشتهای شیبدار، توزیع سرعت، تنش برشی مرزی.

۱– مقدمه

در مواقع سیلابی با توجه به افزایش دبی جریان، چنانچه مقطع اصلی رودخانه قادر به انتقال دبی سیلاب نباشد، جریان مقطع اصلی رودخانه را ترک کرده و وارد سیلاب دشتها میشود. کانال مرکب از یک مقطع اصلی با عمق بیشتر در وسط و یک یا دو سیلابدشت در اطراف آن تشکیل شده است. شناخت ویژگیها و ساختار جریان در مقاطع مرکب بهمنظور کاهش خطرات و کنترل سیلابها و همچنین مدیریت سیلابدشتها بسیار مهم است. در نسبت به کانال اصلی و همچنین کمتر بودن عمق جریان در آنها، سرعت جریان در سیلابدشتها نسبت به مقطع اصلی کانال کمتر است. این اختلاف سرعت باعث ایجاد یک لایه برشی در فصل مشترک جریان بین کانال اصلی و سیلابدشتها میشود که باعث ایجاد مقاومت اضافی در برابر حرکت جریان شده و درنتیجه سبب کاهش ظرفیت انتقال در کل مقطع مرکب خواهد شد (Sellin)

۱۹۶۴؛ Bousmar، ۲۰۰۲). درنتیجه ایجاد لایه برشی بین کانال اصلی و سیلاب دشتها، گردابه هایی بزرگ مقیاس با محور قائم و نیز جریان های ثانویه مارپیچی در جهت جریان ایجاد می شوند (Shiono و Shiono، ۲۹۹۱، ۱۹۹۱).

با توجه به این که مسیر حرکت رودخانهها و همچنین شکل مقطع عرضی آنها تحت تأثیر توپوگرافی مسیر، رژیم فرسایش و حمل رسوب قرار دارد، بنابراین شکل مقطع رودخانه و شیب آن بهطور مدام در حال تغییر است. بههمین دلیل در طبیعت رودخانههایی با مقطع عرضی منشوری و ساده بهندرت یافت میشود و انهار طبیعی اغلب دارای مقطع مرکب غیرمنشوری هستند. تحلیل جریان در مقاطع مرکب غیرمنشوری به دلیل تأثیر شکل هندسی آبراهه بر انتقال دبی بین زیربخشها و همچنین افزایش اندرکنش ناشی از آن بین کانال اصلی و سیلابدشتهای پیچیدهتر از مقاطع مرکب منشوری است. ازجمله کانالهای

^{*}نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸۳۰۸۱۸۹۱

آدرس ايميل: m.dolatimahtaj@yahoo.com (م. دولتي مهتاج)، b.rezaei@basu.ac.ir (ب. رضائي).

همگرا، واگرا و مورب اشاره کرد.

Bousmar (۲۰۰۲) و Bousmar و همکاران (۲۰۰۴) جریان در کانالهای مرکب غیرمنشوری با سیلاب دشتهای همگرا (باریک شونده) را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. آنان دریافتند که به دلیل جریان عرضی وار دشده به مقطع اصلی کانال، جریانهای ثانویه مارپیچی در جهت جریان در مقطع اصلی ایجاد میشوند و همچنین عمق جریان در طول ناحیه همگرایی به تدریج کاهش می یابد (Naik و Naik).

و Rezaei (۲۰۰۶)، Rezaei و ۲۰۱۱) Knight جریان در کانالهای مرکب با زاویههای همگرایی ۱/۹۱، ۲۸۸۱ و ۱۱/۳۱ درجه را موردبررسی قرار دادند. آنان بیان کردند که سرعت جریان در نیمه دوم ناحیه همگرایی با شدت بیشتری افزایش مییابد و همچنین توزیع دبی نسبی در طول منطقه همگرایی برای عمقهای نسبی پایین (Dr=0.2) به صورت خطی بوده، در حالی که برای عمقهای نسبی بالا (Dr=0.2) به صورت غیر خطی است.

Vojoudi Mehrabani و همکاران (۲۰۲۰) به صورت آزمایشگاهی ساختار جریان در کانالهای مرکب غیرمنشوری همگرا باوجود پوشش گیاهی مستغرق بر روی سیلاب دشت ها را بررسی کردند. آنان دریافتند که با افزایش زاویه همگرایی، میزان زبری در کل کانال افزایش مییابد و همچنین با افزایش عمق نسبی جریان، مقطع میانی ناحیه همگرایی تمایل کمتری به مشارکت در انتقال دبی دارد.

Bousmar و همکاران در سال ۲۰۰۶ جریان در کانالهای مرکب غیرمنشوری با سیلابدشتهای واگرا را موردمطالعه قراردادند. آنان دریافتند که ظرفیت انتقال دبی سیلابدشتها نسبت به کانالهای مرکب مستقیم با مقطع عرضی و عمق نسبی یکسان کمتر است و همچنین برخلاف کانالهای مرکب همگرا، سرعت جریان در طول ناحیه واگرایی بهتدریج کاهش یافته، درحالیکه عمق جریان بهتدریج افزایش مییابد. نتایج یکسانی توسط ad و Das (۲۰۱۹) ارائه شده است.

Yonesi و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر همزمان زبری و واگرایی سیلاب دشتها در کانالهای مرکب غیرمنشوری را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و بیان کردند که با افزایش عمق نسبی جریان و یا کاهش زبری نسبی (نسبت عمق زبری در سیلاب دشت به عمق زبری در کانال اصلی)، اختلاف سرعت بین کانال اصلی و سیلاب دشتها کاهش می یابد.

James و Brown در سال ۱۹۷۷برای اولین بار جریان در کانالهای مرکب با مقطع اصلی مورب را بهصورت تجربی موردمطالعه قرار دادند. آنان بیان نمودند که سرعت جریان در سیلاب دشت دریافت کننده جریان یا سیلاب دشت واگرا افزایش یافته درحالی که در سیلاب دشت همگرا کاهش مییابد. همچنین آنان دریافتند که با افزایش زاویه اریب مقطع اصلی، مقاومت جریان

در آبراهه افزایش مییابد. از دیگر نتایج پژوهش آنان میتوان به تأثیر اریب بودن مقطع اصلی بر انحراف جریان در عمقهای نسبی پایین اشاره نمود.

(۱۹۹۰) Jasem و Ervine و Isvin (۱۹۹۵) به صورت آزمایشگاهی جریان را در مقاطع مرکب با مقطع اصلی مورب بررسی کرده و با تأیید نتایج مطالعات پیشین، بیان کردند که سرعت جریان در کانال اصلی تقریباً ثابت می ماند و اندکی در پایین دست کاهش می یابد.

Elliott و Sellin و ۱۹۹۰) و Sellin (۱۹۹۵) جریان در مقاطع مرکب با سیلابدشتهای مورب را بهصورت تجربی مطالعه کردند. آنان سه زاویه اریب ۲/۱، ۲/۱ و ۹/۲ درجه را برای سیلابدشتها در نظر گرفتند. آنان دریافتند که اریب بودن سیلابدشتها سبب کاهش ظرفیت انتقال جریان نسبت به آبراهه مرکب منشوری با سطح مقطع یکسان میشود. همچنین آنان بیان کردند که به دلیل تأثیر همزمان همگرایی و واگرایی سیلابدشتها در این نوع از مقاطع مرکب، توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق و تنش برشی مرزی نامتقارن است.

(۲۰۰۹) در ۲۰۰۹) با تحلیل مجدد نتایج حاصل از مطالعات پیشین بیان نمود که محل بیشترین مقدار تنش برشی مرزی در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب دشت واگرا است و مقدار آن می تواند تا ۲/۵ برابر تنش برشی متوسط مقطع نیز برسد. همچنین ایشان با انجام آزمایش هایی بر روی یک کانال مرکب با سیلاب دشت هایی با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه، بیان کرد که شرایط جریان در این کانال به صورت غیریکنواخت است. نتایج آزمایش های Bousmar و همکاران (۲۰۱۲) نیز این موضوع را تأیید می کند.

با توجه به نتایج ارزشمند حاصل از مطالعات پیشین، تاکنون بررسیهای محدودی بر روی رفتار جریان در کانالهای مرکب غیرمنشوری با سیلاب دشتهای مورب انجام شده و مقاطع اندازه گیری و زاویههای اریب در این مطالعات محدود بوده است. همچنین مطالعات پیشین بر روی مقاطع مرکب با سیلاب دشتهای افقی و بدون شیب عرضی انجام شده (شکل (۱-الف)) و تاکنون اثر مایل بودن سیلاب دشتها در این مقاطع در الف)) و تاکنون اثر مایل بودن سیلاب دشتها در این مقاطع در بنظر گرفته نشده است. هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر زاویه اریب در تحلیل میدان جریان در کانالهای مرکب مورب با سیلاب دشتهای مایل (شیب دار) است. با توجه به این که عمق جریان در رودخانهها متغیر است و همچنین متفاوت بودن شرایط هندسی مقطع عرضی آبراهه در آنها، در این پژوهش آزمایش ها در سه عمق نسبی متفاوت و دو زاویه اریب مختلف انجام شده است. شکل (۱–ب) مقطع عرضی کانال مرکب با سیلاب دشتهای مایل (شیب دار)، مورداستفاده در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۱- مقطع عرضی کانال مرکب با: الف) سیلابدشتهای مسطح، ب) سیلابدشتهای مایل

در شکل (۱)، $B_{fp} e^{2} B_{rp}$ به ترتیب عرض سیلاب دشت و کانال اصلی، H_{fp} عمق جریان در مقطع اصلی، h_{mc} عمق کانال اصلی، H_{fp} معق جریان بر روی سیلاب دشت مسطح و $\overline{H_{fp}}$ متوسط عمق جریان بر روی سیلاب دشت مایل است.

۲- مواد و روشها ۲-۱- کانال مرکب

پژوهش حاضر بر روی کانال مستقر در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا، گروه مهندسی عمران انجام شده است. این کانال آزمایشگاهی دارای طول ۱۸ متر، عرض ۱/۲ متر و عمق ۰/۶ متر است. برای گردش آب در این کانال از یک پمپ با حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه استفاده شده است که جریان را از یک منبع زیرزمینی به مخزن بالادست کانال پمپاژ می کند. جریان در انتهای کانال به داخل مخزن خروجی ریزش کرده و توسط یک کانال مجدداً به مخزن زیرزمینی برمی گردد. به منظور آرام کردن جریان و کاهش نوسانات سطح آب، در ابتدای کانال از یک قطعه شناور از جنس پلی استایرن^۱ استفاده شده است. شکل (۲) نمای کلی از کانال آزمایشگاهی مورداستفاده در این پژوهش را نشان می دهد.

مطابق با شکل (۱-ب)، مقطع عرضی این کانال آزمایشگاهی بهوسیله ورقهای PVC بهصورت مرکب ساخته شده و دارای یک مقطع اصلی در وسط به شکل مستطیل با عرض و عمق بهترتیب ۹/۰ و ۰/۰۵ متر و دو سیلابدشت در طرفین آن با شیب جانبی (عرضی) ۰/۰۷۵ (زاویه ۴/۲۹ درجه) و عرض ۰/۴ متر است. متوسط شیب طولی کف کانال برابر با ۲۰۰×۱/۶۳ بصوده و

برای انــدازهگیری دبی ورودی از جریانسنج فراصــوت نصب شده بر روی لوله انتقال آب استفاده شده است (شکل (۲-ب)). آزمایشها بر روی کانال مرکب با سیلابدشتهای مایل مورب در دو زاویه اریب برابر با ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه (متناظر با طولهای اریب ۲ و ۶ متر) انجامشده است. برای مورب ساختن سیلابدشتها از پروفیلهای نبشی فولادی نصبشده بر روی سیلابدشتها استفاده شده است. برای اطمینان از توسعه یافتن جریان و همچنین ایجاد جریان یکنواخت در ورودی به ناحیه اریب، شروع مقطع مورب، مطابق شکل (۳)، در فاصله ۱۰ و ۸ متری از ابتدای کانال مرکب انتخاب شده است که این فاصله بیشتر از حداقل طول ارائه شده توسط Ranga Raju و همكاران (۲۰۰۰) برای ایجاد جریان توسعهیافته در کانالهای باز میباشد. در پاییندست کانال مرکب، یک دریچه انتهایی قرار داده شده که از آن برای تنظیم عمق آب و ایجاد شرایط جریان یکنواخت در نواحی منشوری شکل کانال استفاده شده است. اندازه گیریها در سه عمق نسبی، بهترتیب ۰/۲، ۳/۲ و ۰/۴ انجام شده است. با توجه به مایل بودن سیلابدشتها و همچنین اختلاف تراز موجود در بین طرفین سیلابدشت، از عمق متوسط جریان بر روی سیلابدشتها برای محاسبه عمق نسبی جریان طبق رابطه (۱) استفاده شده است.

$$D_r = \frac{\overline{H_{fp}}}{H} \tag{1}$$

که در رابطه (۱)، Dr معرف عمق نسبی جریان است، منظور H از $\overline{H_{fp}}$ متوسط عمق جریان بر روی سیلاب دشتها و همچنین عمق کل جریان در کانال اصلی است (به شکل (۱- ب) توجه شود). این عمق نسبی در قسمت منشوری شکل بالادست ناحیه اریب تعیین شده است. اندازه گیریهای سرعت و تنش برشی مرزی نیز در امتداد ناحیه اریب کانال در سه مقطع با فواصل طولی ۱ متر برای زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه و در پنج مقطع به فواصل طولی ۱/۵ متر برای زاویه اریب ۳/۸۱ درجه انجام شده است (مطابق شکل (۳)). جدول (۱) ابعاد هندسی و شرایط کلی جریان در مقاطع مختلف اندازه گیری را نشان میدهد. در این جدول، SCIF-2 و SCIF-6 بهترتيب معرف كانال مركب مورب با سیلابدشتهای مایل با طول اریب ۲ و ۶ متر (متناظر با زاویههای اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه)، x معرف فاصله مقطع اندازه گیری از شروع كانال، Bcfp عرض سيلاب دشت واكرا، Bcfp عرض سیلابدشت همگرا، Qexp دبی کل جریان و Fr عدد فرود جریان است که طبق رابطه $F_r = U_m / (gD)^{0.5}$ محاسبه شده و در آن سرعت متوسط جریان، g شتاب گرانش زمین و D عمق U_m هيدروليكي است.

1. Polystyrene

^{2.} Ultrasonic flowmeter





شکل ۲- نمای کلی کانال آزمایشگاهی: الف) نمای کلی، ب) نمای از بالا



شکل ۳- نمای بالایی کانال مرکب غیرمنشوری با زاویه اریب: الف) ۱۱/۳۱ درجه، ب) ۳/۸۱ درجه

آزمايش		ابعاد هندسی				مشخصات جريان		
	<i>x</i> (m) مقطع	B _{Dfp} (m)	B_{mc} (m)	B _{Cfp} (m)	زاويه اريب $ heta$	<i>Q</i> _{exp} (l/s)	D_r	F_r
SCIF-2	١.	•	٠/۴	٠/۴	۱۱/۳۱۰	۶۲۳ تا ۲۲/۷	۰/۴ ت ۰/۲	۰/۷۶ تا ۱۸۳
	11	٠/٢	٠/۴	٠/٢				
	١٢	٠/۴	٠/۴	•				
SCIF-6	٨	•	٠/۴	٠/۴	۳/۲۱۰	FT/T & TT/S	・/そじ・/۲	۰/۸۰ تا ۸۶/۰
	۹/۵	٠/١	٠/۴	۰/٣				
	11	٠/٢	٠/۴	٠/٢				
	۱۲/۵	۰ /٣	٠/۴	٠/١				
	14	۰/۴	۰/۴	•				

جدول ۱- ابعاد هندسی و مشخصات جریان در امتداد ناحیه اریب

۲-۲- وسایل اندازهگیری

در این پژوهش برای اندازه گیری عمق جریان از عمق سنج نقطهای با دقت ۱۱، میلی متر استفاده شده است. عمق جریان در ناحیه اریب در فواصل ۲۸۵، متر برای زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه، ۸۵، متر برای زاویه اریب ۳/۸۱ درجه و در سایر قسمتهای کانال در هر ۱ متر اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری سرعت نقطهای، از سنجش گر جانب نگر دستگاه سرعت سنج سه بعدی صوتی داپلر (ADV, Vectrino) با فرکانس ۲۰۰ هرتز استفاده شده است. اندازه گیری سرعت در فواصل عرضی ۲۰ میلی متری و فواصل (۴) شبکه بندی انجام شده برای اندازه گیری سرعت نقطهای به-ارتفاعی ۱۰ میلی متری در تمامی مقاطع انجام شده است. شکل وسیله ۸DV را نشان می دهد. اندازه گیری تنش برشی مرزی در اطراف پیرامون مرطوب تمامی مقاطع با استفاده از لوله پرستون با قطر خارجی ۴ میلی متر انجام شده است. این اندازه گیری ها در فواصل عرضی ۲۰ میلی متری برروی کف مقطع اصلی و سیلاب

۳- بحث و نتايج

۳-۱- توزيع سرعت متوسط در عمق

برای محاسبه سرعت متوسط در عمق، مطابق شکل (۴)، مقطع کانال به نوارهایی قائم به عرض ۲۰ میلیمتر به نحوی تقسیم شده که نقاط اندازه گیری سرعت در مرکز این نوارها قرار گیرد. سپس با انتگرال گیری عددی از مؤلفه طولی سرعتهای نقطه ای در عمق و در هر یک از این نوارها (مطابق رابطه (۲))، سرعت متوسط در عمق محاسبه شده است.

$$U_d = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n u_i \,\Delta h_i \tag{(Y)}$$

کر این رابطه، *U*d سرعت متوسط در عمق در هر نوار، Δ*h*i ارتفاع هر زیرسطح در اطراف نقطه اندازه گیری، *u*i مؤلفه طولی سرعت نقطه ای و *h* عمق کل جریان در مرکز نوار است.



شکل ۴- نقاط شبکهبندی مقطع برای اندازهگیری سرعت بهوسیله ADV

شکل (۵) توزیع طیفی سرعت متوسط عمقی در امتداد ناحیه اریب برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه را در عمق نسبی ۰/۳ نشان میدهد. این شکل نشاندهنده غیرمتقارن بودن توزیع عرضی سرعت در هر مقطع اندازه گیری، بهویژه در وسط ناحیه اریب است. با توجه به شکل (۵)، می توان مشاهده کرد که بیشینه سرعت جریان در طول ناحیه اریب به طرف سیلابدشت واگرا متمایل شده و نیز سرعت متوسط جریان در طول ناحیه اریب کاهش یافته است لیکن در انتهای ناحیه اریب اندکی افزایش مشاهده می شود. بررسی ها نشان می دهد که با افزایش عمق نسبی جریان، توزیع عرضی سرعت حالت یکنواخت تری به خود گرفته که دلیل آن می تواند کاهش تأثیر سیلابدشتها در ویژگیهای جریان در عمقهای نسبی بالا است. بیشترین سرعت متوسط جریان همواره برای تمامی عمقهای نسبی در مقطع شروع ناحیه اریب (x=10m برای کانال مرکب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه و x=8m برای کانال مرکب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه) رخ داده و بیشترین اختلاف بین سرعت جریان در کانال اصلی و سیلابدشت نیز در این مقطع مشاهده شده است. همچنین با بررسی شکل (۵) میتوان دریافت که سرعت جریان در سیلابدشت واگرا (دریافتکننده جریان) در طول ناحیه اریب کانال تقریباً ثابت مانده در حالی که سرعت جریان در سیلاب دشت همگرا در امتداد ناحیه اریب کاهش یافته است. این مقدار کاهش به صورت میانگین برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه برابر با ۲۵/۷ درصد و برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه برابر با ۱۵/۴ درصد است.



شکل ۵- توزیع طیفی سرعت متوسط عمقی در امتداد ناحیه اریب برای کانال مرکب مورب با عمق نسبی ۲/۳ و زاویه اریب: الف) ۱۱/۳۱ درجه (SCIF-2)، ب) ۳/۸۱ درجه (SCIF-6)

1..

3. Preston tube

با حرکت به سمت انتهای ناحیه اریب کانال، سرعت جریان در كانال اصلى همانند سيلابدشت همگرا كاهشيافته و با افزايش عمق نسبی جریان از ۰/۲ به ۰/۴، این کاهش سرعت جریان در مقطع اصلی در کانال مرکب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه بهترتیب از ۲۱ به ۱۳ درصد و از ۱۷ به ۵ درصد کاهش می یابد. بهمنظور بررسی اثر زاویه اریب سیلاب دشت ها در توزیع سرعت، توزيع عرضى سرعت متوسط در عمق در مقاطع شروع، وسط و انتهایی ناحیه اریب برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه و عمقهای نسبی ۰/۲، ۳/۲ و ۰/۴ در شکل (۶) آورده شده است. با توجه به شکل (۶)، با افزایش زاویه اریب سیلابدشتها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، سرعت جریان در کل مقطع عرضي كانال مركب بهويژه در مقطع شروع و ميانه ناحيه اریب (شکلهای (۶-الف و ب)) افزایش یافته، لیکن در مقطع انتهایی قسمت مورب کانال مرکب افزایش چندانی مشاهده نمی شود (شکل (۶-پ)). این موضوع نشان دهنده تأثیر ناچیز مقدار زاویه اریب بر توزیع عرضی سرعت جریان در مقطع خروجی از قسمت اريب كانال ميباشد.

توزیع سرعت متوسط در عمق در مقطع وسط قسمت اریب کانال که عرض سیلاب دشتهای همگرا و واگرا در آن مقطع با یکدیگر برابر است (شکل (۶-ب))، به وضوح نشان دهنده نامتقارن بودن توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در این کانال است. همچنین با افزایش عمق نسبی جریان، عدم تقارن توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق، در این مقطع کاهش یافته است. برای محاسبه سرعت متوسط جریان در هر زیربخش (شامل سیلاب دشت همگرا، کانال اصلی و سیلاب دشت واگرا)، ابتدا با تقسیم مقطع عرضی کانال به نوارهایی قائم (شکل (۴))، سرعت متوسط در عمق محاسبه شده است (رابطه (۲))، سپس با انتگرال گیری عددی از سرعت متوسط در عمق حول سطح مقطع هر زیربخش، مطابق با رابطه (۳)، دبی عبوری از هر زیربخش محاسبه شده است. با تقسیم دبی عبوری از هر زیربخش مقطع آن (رابطه (۴))، سرعت متوسط جریان در هر زیربخش مقطع آن (رابطه (۴))، سرعت متوسط جریان در هر زیربخش

$$Q_s = \sum_{i=1}^n U_{di} \Delta A_i \tag{(7)}$$

$$U_s = \frac{Q_s}{A_s} \tag{(f)}$$

در این روابط، Q_s دبی عبوری از هر زیربخش، U_{di} سرعت متوسط در عمق در هر المان نواری، ΔA_i سطح مقطع هر المان نواری، U_s سرعت متوسط جریان در هر زیربخش و A_s کل سطح مقطع هر زیربخش است. با بررسی توزیع سرعت متوسط جریان در هر زیربخش، میتوان دریافت که همواره در تمامی مقطعهای

اندازه گیری در طول ناحیه اریب، سرعت متوسط جریان در سیلاب دشت واگرا بیشتر از سرعت متوسط جریان عبوری از سیلاب دشت همگرا است. این موضوع به وضوح در شکل (۷) که در آن سرعت متوسط جریان در سیلاب دشت واگرا (*U*_{Df}) در برابر سرعت متوسط در سیلاب دشت همگرا (*U*_{Cf}) ترسیم شده، مشخص است. برای آزمایش های انجام شده بر روی کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه در مقطع وسط ناحیه اریب (x=11 m) برای عمق های نسبی ۲/۰، ۳/۰ و ۲/۰، سرعت متوسط جریان در سیلاب دشت واگرا به ترتیب ۲/۳۲، ۱۵۸۸ و ۱/۳۶ برابر سرعت متوسط جریان در سیلاب دشت همگرا است.



شکل ۶- توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق برای عمقهای نسبی و زاویههای اریب مختلف در مقطع: الف) شروع ناحیه اریب، ب) وسط ناحیه اریب، ج) انتهایی ناحیه اریب





این مقادیر برای آزمایشهای انجامشده بر روی کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۲/۸۱ درجه در همان مقطع (وسط ناحیه اریب)، بهترتیب برابر با ۲/۰۵، ۱/۵۷ و ۱/۳۱ است. لازم بهذکر است که با افزایش عمق نسبی جریان از ۲/۰ تا ۲/۰۴، اختلاف سرعت متوسط جریان بین سیلابدشتهای واگرا و همگرا برای کانال مرکب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه برابر با ۹۲ درصد و برای کانال است درحالی که با افزایش زاویه اریب سیلابدشتها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، اختلاف سرعت متوسط بین سیلابدشتها بیشتر شده است.

در شکل (۸) سرعت نسبی جریان در هر زیربخش (نسبت سرعت متوسط جریان در هر زیربخش بر سرعت متوسط جریان در کل مقطع) برای عمقهای نسبی مختلف در مقطع شروع، میانه و انتهایی ناحیه اریب برای هر دو کانال مرکب با زاویههای اریب ۱۱/۳۱ و ۲۸/۱ درجه ترسیم شده است. با افزایش عمق نسبی، سرعت نسبی جریان در سیلاب دشت همگرا (U_{cfp}/U_m) و سرعت نسبی جریان در سیلاب دشت واگرا (U_{Dfp}/U_m) روندی افزایشی دارند لیکن شیب افزایش سرعت نسبی جریان در سیلاب دشت واگرا به مراتب کمتر است. برای نمونه در مقطع میانه ناحیه اریب (شکل (۸–ب))، برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه با افزایش عمق نسبی از ۲/۰ به ۲/۰، سرعت نسبی جریان در سیلاب دشت همگرا ۹۵/۳ درصد و در سیلاب دشت واگرا ۵/۱ درصد افزایش مییابد.

در کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه مقدار افزایش سرعت نسبی جریان در سیلاب دشت همگرا برابر ۶۲/۸ درصد و در سیلاب دشت واگرا برابر ۴ درصد است. این موضوع بیانگر آن است که با افزایش زاویه اریب کانال مرکب مورب، اثر عمق نسبی بر سرعت جریان عبوری از هر زیربخش افزایش یافته است. سرعت نسبی حریان در مقطع اصلی کانال (U_{mc}/U_m)، برخلاف سرعت نسبی عبوری از سیلاب دشتها، با افزایش عمق نسبی، روندی

کاهشی دارد. همچنین سرعت متوسط جریان در مقطع اصلی کانال همواره بزرگ تر از سرعت متوسط جریان عبوری از کل مقطع عرضی کانال مرکب است، بهنحویکه در مقطع میانی ناحیه اریب (شکل (۸–ب)) نسبت U_{mc}/U_m در کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ و ۲۸/۱ درجه برای عمق نسبی ۲/۰ این مقادیر بهترتیب به ۱۱/۱ و ۱۱/۳۹ است و برای عمق نسبی ۲/۰ این مقادیر بهترتیب به عمق نسبی جریان، سرعت جریان عبوری از مقطع اصلی کانال مرکب و سرعت متوسط جریان عبوری از کل مقطع عرضی کانال به یکدیگر نزدیک می شوند.



شکل ۸- سرعت نسبی جریان در هر زیربخش در برابر عمق نسبی برای مقطع: الف) شروع ناحیه اریب، ب) وسط ناحیه اریب، ج) انتهایی ناحیه اریب

۲-۳- توزیع تنش برشی مرزی

تنش برشی مرزی یکی از مباحث مهم در مهندسی رودخانه است که در مطالعات مربوط به حفاظت بستر رودخانهها و نیز انتقال رسوب کاربرد دارد. در پژوهش حاضر توزیع عرضی تنش برشی مرزی در پیرامون مرطوب تمامی مقاطع بهوسیله لوله پرستون اندازه گیری شده است. شکل (۹) توزیع طیفی تنش برشی بستر (کف کانال اصلی و سیلابدشتها) در طول ناحیه اریب برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه در عمق نسبی ۳/۰ را نشان میدهد. مشابه توزیع سرعت متوسط در عمق در طول ناحیه اریب (شکل (۵))، توزیع تنش برشی بستر نیز در مقطع عرضي كانال نامتقارن است و همواره مقدار تنش برشي بستر در سیلابدشت همگرا کمتر از سیلابدشت واگرا است. همچنین به دلیل تأثیر اریب بودن سیلابدشتها و ورود جریان به کانال اصلی و درنتیجه تشکیل جریانهای ثانویه در آن، توزیع عرضی تنش برشی بستر به صورت محلی در نزدیکی فصل مشترک دیوارههای کانال اصلی و سیلابدشتها بیشتر شده است. این پدیده در مقطع شروع ناحیه اریب بهوضوح مشاهده شده و با حرکت به سمت انتهای ناحیه اریب کانال از شدت آن کاسته شده است. در مقطع انتهایی ناحیه اریب تنش برشی بستر در سیلابدشت واگرا برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه در حدود ۲۵ درصد و برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه در حدود ۱۵ درصد بیشتر از تنش برشی بستر در مقطع اصلى كانال است.



شکل ۹– توزیع طیفی تنش برشی بستر در امتداد ناحیه اریب برای کانال مرکب مورب با عمق نسبی ۲/۳ و زاویه اریب: الف) ۱۱/۳۱ درجه (SCIF-2)، ب) ۳/۸۱ درجه (SCIF-6)

در شکل (۱۰) بهمنظور بررسی اثر زاویه اریب سیلاب دشتها در کانال مرکب مورب بر توزیع تنش برشی، توزیع عرضی تنش برشی مرزی در سه مقطع شروع، وسط و انتهایی ناحیه اریب برای عمقهای نسبی مختلف و زاویههای اریب ۱۱/۳۱ و ۲/۸۱ درجه ترسیم و با یکدیگر مقایسه شدهاند. با افزایش زاویه اریب سیلاب دشتها، مشابه توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق، تنش برشی مرزی در کل مقطع عرضی کانال بهویژه در مقطع شروع و وسط قسمت اریب کانال (شکلهای (۱۰ – الف) و (۱۰ – ب)) افزایش یافته است که این میزان افزایش تنش برشی مرزی در سیلاب دشتها بهویژه در سیلاب دشت همگرا بیشتر از کانال اصلی است.



شکل ۱۰- توزیع عرضی تنش برشی مرزی برای عمقهای نسبی و زاویههای اریب مختلف در مقطع: الف) شروع ناحیه اریب، ب) وسط ناحیه اریب، ج) انتهایی ناحیه اریب

همچنین با افزایش زاویه اریب سیلابدشتها از ۳/۸۱ به همچنین با افزایش زاویه اریب سیلابدشتها از ۳/۸۱ در ۱۱/۳۱ درجه، توزیع تنش برشی مرزی در مقطع اصلی کانال در نیمه سمت سیلابدشت همگرا (0.2 > y > 0) به دلیل افزایش شدت جریان واردشده از طرف سیلابدشت همگرا به داخل مقطع شدت جریان واردشده از طرف سیلابدشت همگرا به داخل مقطع اصلی کانال، به صورت محلی افزایش یافته است. این موضوع به خوبی در مقطع میانه ناحیه اریب (شکل (۱۰ – ب)) مشخص است.

بیشینه تنش برشی مرزی معمولاً بر روی دیواره مقطع اصلی کانال در سمت سیلاب دشت واگرا اتفاق افتاده است. نتیجه یکسانی نیز توسط Elliott و Sellin (۱۹۹۰) و Chlebek (۲۰۰۹) گزارش شده است. همچنین مقدار بیشینه تنش برشی مرزی تا ۱/۶۹ برابر تنش برشی متوسط کل مقطع برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه و تا ۱/۸۹ برابر برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۸/۳۱ درجه نیز رسیده است.

متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت واگرا (au_{Dfp}) در تمامی مقاطع اندازه گیری در طول قسمت اریب کانال بیشتر از متوسط تنش برشی مرزی در سیلاب دشت همگرا (au_{cfp}) است (شکل (۱۱)). در مقطع وسط ناحیه اریب (x = 11m)، متوسط تنش برشی مرزی در سیلاب دشت واگرا برای عمق های نسبی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ در کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه به-ترتیب ۳/۷۱، ۲/۱۲ و ۱/۵۷ برابر متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت همگرا است. این نتایج برای آزمایشهای انجامشده در کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه بهترتیب ۳/۹۹، ۲/۶۷ و ۱/۶۷ است. اختلاف بین متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشتها نسبت به اختلاف سرعت متوسط جریان در آنها، بیشتر شده که ناشی از تأثیر جریانهای ثانویه ایجادشده در طول ناحیه اریب کانال بر تنش برشی مرزی است. همچنین برخلاف سرعت متوسط جريان، با افزايش زاويه اريب سيلابدشتهاى کانال مرکب مورب از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، اختلاف متوسط تنش برشی مرزی بین سیلابدشت واگرا و همگرا کاهش یافته است.



(au_{Dfp}) شکل ۱۱– متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت واگرا (au_{Cfp}) در برابر متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت همگرا

روند تغییرات تنش برشی نسبی (نسبت متوسط تنش برشی مرزی در هر زیربخش به متوسط تنش برشی مرزی در کل مقطع عرضی کانال) در برابر عمق نسبی جریان در مقطع شروع، میانه و انتهایی ناحیه اریب کانال در شکل (۱۲) نشان داده شده است. تنش برشی نسبی در کانال اصلی (τ_{mc}/τ_m) در طول ناحیه اریب روندی کاهشی داشته لیکن تغییرات تنش برشی نسبی در سیلابدشت همگرا (τ_{Cfp}/τ_m) صعودی است.



شکل ۱۲- تنش برشی نسبی در هر زیربخش در برابر عمق نسبی برای مقطع: الف) شروع ناحیه اریب، ب) وسط ناحیه اریب، ج) انتهایی ناحیه اریب

در مقطع میانی ناحیه اریب کانال (شکل (۱۲- ب)) تنش برشی نسبی در سیلابدشت واگرا (au_{Dfp}/ au_m) روندی کاهشی دارد، درحالی که در مقطع انتهایی ناحیه اریب (شکل (۱۲ - ج)) با افزایش عمق نسبی جریان، تنش برشی نسبی در سیلابدشت واگرا بیشتر شده است. متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت واگرا همواره بیشتر از تنش برشی متوسط مقطع است بهنحوی که برای عمق نسبی ۲/۲ و در مقطع وسط ناحیه اریب، متوسط تنش برشی در سیلابدشت واگرا برای هر دو کانال مرکب مورب با زاویههای اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه، ۲۸ درصد بزرگتر از تنش برشی متوسط مقطع است. متوسط تنش برشی مرزی در مقطع اصلی کانال در مقطع شروع و وسط ناحیه اریب بیشتر از تنش برشی متوسط مقطع است، بهنحوی که در هر دو کانال مرکب مورب برای عمق نسبی ۲/۰، متوسط تنش برشی مرزی در مقطع میانی قسمت اریب حدود ۱۵ درصد بیشتر از متوسط تنش برشی کل مقطع است. در مقطع انتهایی قسمت اریب کانال، تنش برشی مرزی در مقطع اصلی کانال نزدیک به ۱۰ درصد در زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه و ۴ درصد در زاویه اریب ۳/۸۱ درجه کمتر از تنش برشی متوسط مقطع است. در مقطع شروع و وسط ناحیه اریب كانال، با افزایش عمق نسبی جریان اختلاف بین متوسط تنش برشی مرزی در کانال اصلی با تنش برشی متوسط کل مقطع کاهش یافته و مقدار آنها به یکدیگر نزدیک شده است. چنین روندی برای متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت واگرا در مقطع میانی ناحیه اریب نیز مشاهده شده است. در مقطع انتهایی قسمت مورب كانال، با افزايش عمق نسبى جريان اختلاف بين تنش متوسط کل مقطع با متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت واگرا و همچنین با متوسط تنش برشی در مقطع اصلى كانال افزايش يافته است (شكل (١٢- پ)). متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت همگرا همواره به مقدار قابل توجهی کمتر از متوسط تنش برشی در کل مقطع عرضی کانال است بهنحوی که متوسط تنش برشی در سیلاب دشت همگرا در مقطع میانی ناحیه اریب برای عمق نسبی ۲/۰، در کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه نزدیک به ۶۵ درصد و برای زاویه اریب ۳/۸۱ درجه در حدود ۶۸ درصد کمتر از متوسط تنش برشی مرزی در همان مقطع است. با افزایش عمق نسبی جریان، متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت همگرا به مقدار تنش برشی متوسط کل مقطع نزدیکتر شده است (شکلهای (۱۲- الف) (۱۲- ب)). چنین روندی در سرعت متوسط در سیلابدشت همگرا نیز مشاهده شده بود.

۳-۳- نیمرخ طولی سطح آب

با استفاده از عمقسنج نقطهای نیمرخ طولی سطح آب برای عمقهای نسبی مختلف در کانال مرکب مورب با دو زاویه اریب

۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه اندازه گیری و در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



در طول کانال مرکب مورب با زاویه اریب: الف) ۱۱/۳۱ درجه (SCIF-2)، ب) ۳/۸۱ درجه (SCIF-2)

در شروع هر آزمایش با تغییر ارتفاع دریچه انتهایی کانال آزمایشگاهی، نیمرخ سطح آب اندازه گیری و ترسیم شده و سپس شیب سطح آب در قسمت منشوری شکل بالادست ناحیه اریب كانال تعیین می شد تا درنهایت این شیب با دقت قابل قبول به شیب کف کانال نزدیک شود. در ناحیه مورب کانال مرکب به دلیل غیریکنواختی توزیع سرعت و وجود جریانهای عرضی معمولاً شرایط جریان غیریکنواخت برقرار شده و عمق به مقدار جزئی تغییر میکند (شکل (۱۳)). مشاهدات مشابهی نیز توسط Bousmar و همکاران (۲۰۰۹) ارائه شده Bousmar و همکاران (۲۰۱۲) است. با افزایش عمق نسبی جریان، نسبت بیشینه عمق جریان در (H_{max}/H_m) ناحیه اریب به متوسط عمق جریان در همین قسمت (افزایشیافته درحالی که نسبت حداقل عمق جریان در قسمت مورب کانال به عمق متوسط جریان در همین قسمت (*H_{min}/H_m*) با افزایش عمق نسبی کاهش یافته است. این موضوع بیانگر افزایش شدت غیریکنواختی نیمرخ طولی سطح آب در ناحیه اریب کانال مرکب با افزایش عمق نسبی جریان است. بهمنظور بررسی بیشتر پدیده مشاهدهشده، درصد اختلاف بین حداکثر و حداقل عمق جریان نسبت به متوسط عمق جریان در ناحیه اریب کانال مرکب با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شده است.

$$\% \Delta H = \frac{(H_{max} - H_{min})}{H_m} \times 100 \tag{(\Delta)}$$

که در رابطه (۵)، H_{min} و H_{min} به ترتیب بیشینه و کمینه عمق جریان در این جریان در این H_{min}

ناحیه است. درصد اختلاف بین بیشینه و کمینه عمق جریان در قسمت مورب كانال مركب با افزايش عمق نسبى جريان بيشتر شده است. همچنین برای عمقهای نسبی مختلف این اختلاف در کانال مرکب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه به صورت میانگین ۱۰/۱۱ درصد و برای کانال مرکب مورب با زاویه اریب ۳/۸۱ درجه برابر ۱۱/۸۷ درصد است. با افزایش زاویه اریب سیلابدشتها، میزان اختلاف حداقل و حداكثر عمق جريان بهصورت متوسط براى عمقهای نسبی مختلف نزدیک به ۱۷/۴ درصد کاهش یافته است. این موضوع بیانگر آن است که با کاهش زاویه اریب سیلابدشتها، شدت غیریکنواختی نیمرخ سطح آب (میزان پایینافتادگی و بالاآمدگی سطح آب) در قسمت مورب کانال افزایش یافته است. همچنین بیشترین اختلاف عمق جریان در نیمرخ طولی سطح آب در نیمـه اول ناحیه اریب کانال مرکب (فاصله طولی بین و برای کانال مرکب با زاویه اریب ۱۱/۳۱ درجه و 10 < x < 11(م, x < 11 درجه) 8 < x < 11مشاهده شده است.

۴- خلاصه و نتیجهگیری

در این پژوهش ویژگیهای مختلف جریان شامل توزیع سرعت، تنش برشی مرزی و نیمرخ طولی سطح آب در کانالهای مرکب مورب با سیلابدشتهای مایل بهصورت آزمایشگاهی موردبررسی قرار گرفته است. اندازه گیریها برای سه عمق نسبی ۲/۰، ۲/۰ و ۲/۰ و همچنین دو زاویه اریب ۱۱/۳۱ و ۲/۸۱ درجه متناظر با طولهای اریب بهترتیب ۲ و ۶ متر انجام شده است. مهمترین نتایج بهدست آمده از این تحقیق در ادامه ارائه شده است:

توزيع عرضي سرعت جريان در طول ناحيه اريب كانال غیرمتقارن بوده و همواره بیشینه سرعت بهطرف سیلابدشت دریافت کننده جریان (واگرا) متمایل می شود. همچنین با افزایش عمق نسبى توزيع عرضى سرعت حالتى يكنواخت تر به خود گرفته است. سرعت متوسط جریان در مقطع شروع قسمت اریب کانال همواره بیشترین مقدار را داشته و با حرکت به سمت انتهای قسمت اریب کانال مقدار آن کاهش مییابد. سرعت متوسط جریان در طول ناحیه مورب کانال در سیلابدشت واگرا ثابت می ماند لیکن سرعت متوسط جریان در سیلابدشت همگرا در طول اریب کانال روندی کاهشی دارد. سرعت متوسط جریان در سیلابدشت واگرا همواره بیشتر از سرعت متوسط جریان در سیلابدشت همگرا است و با افزایش عمق نسبی جریان، اختلاف سرعت متوسط جریان بین سیلابدشتها کاهش یافته در حالی که با افزایش زاویه اريب سيلابدشتها اين اختلاف بيشتر شده است. همچنين با افزایش عمق نسبی، سرعت نسبی جریان در سیلاب دشتها روندی افزایشی داشته درحالی که این روند در کانال اصلی به صورت

کاهشی است.

توزیع تنش برشی بستر در امتداد قسمت اریب کانال مشابه با توزیع سرعت بهشدت غیریکنواخت و نامتقارن بوده و همواره میزان تنش برشی بستر در سیلابدشت واگرا بیشتر از مقدار آن در سیلابدشت همگرا است. با افزایش زاویه اریب سیلابدشتها، مشابه با توزیع سرعت متوسط در عمق، تنش برشی مرزی نیز در طول ناحیه اریب کانال بهویژه در مقطع شروع و وسط قسمت اریب کانال افزایش یافته است. بیشینه تنش برشی مرزی بر روی دیواره کانال اصلی مجاور با سیلابدشت واگرا اتفاق افتاده که همخوانی کاملی با نتایج تحقیقات پیشین انجامشده بر روی کانال های مرکب مورب دارد. با افزایش عمق نسبی جریان، تنش برشی سرزی در سیلابدشت همگرا روندی صعودی داشته لیکن در مقطع اصلی سیلابدشت همگرا همواره بیشتر و متوسط تنش برشی مرزی در سیلابدشت همگرا همواره کمتر از متوسط تنش برشی مرزی در میطع است.

بررسی نیمرخ طولی سطح آب در امتداد قسمت اریب کانال بیانگر آن است که شرایط جریان در این ناحیه بهصورت غیریکنواخت بوده که تأییدکننده پژوهشهای پیشین انجامشده بر روی کانالهای مرکب با شکل هندسی مشابه است. افزایش عمق نسبی جریان، سبب افزایش شدت اختلاف عمق جریان در طول قسمت اریب کانال شده لیکن افزایش زاویه اریب سیلابدشتها، باعث کاهش اختلاف عمق جریان یا به عبارتی کاهش شدت غیریکنواخت بودن جریان در قسمت اریب کانال شده است. بیشترین تغییرات عمق جریان برای کانال مرکب مورب با زاویههای اریب مختلف، در نیمه ابتدایی قسمت مورب آن مشاهده شده است.

Bousmar D, "Flow modelling in compound channels: Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains", PhD Thesis, University of Catholique de Louvain, Louvainla, Belgium, 2002.

۵- مراجع

- Bousmar D, Winkin N, Jacquemart JH, Zech Y, "Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 2004, 130 (4), 305-312.
- Bousmar D, Proust S, Zech Y, "Experiments on the flow in a enlarging compound channel", The International Conference On Fluvial Hydraulics (River Flow 2006), Lisbon, Portugal, 6-8 September, 2006.
- Bousmar D, Jacqmin T, Wyseur S, Van Emelen S, "Flow in skewed compound channels with rough floodplains", The International Conference On Fluvial Hydraulics (River Flow 2012), San Jose, Costa Rica, 5-7 September, 2012.
- Chlebek J, "Modelling of simple prismatic channels with

S

varying roughness using the SKM and a study of flows in smooth non-prismatic channels with skewed floodplain", PhD Thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK, 2009.

- Das BS, Khatua KK, "Water surface profile computation for compound channel having diverging floodplains", ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 25 (3), 336-349.
- Elliott SCA, Sellin RHJ, "SERC flood channel facility: Skewed flow experiments", Journal of Hydraulic Research (IAHR), 1990, 28 (2), 197-214.
- Ervine DA, Jasem HK, "Observations on flows in skewed compound channels", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, 1995, 112, 249-259.
- James M, Brown BJ, "Geometric parameters that influence floodplain flow, waterways experiment section", Report H-77-1, Hydraulics Laboratory, Department of Defense, US Army Corps of Engineering, Vicksburg, Mississippi, 1977.
- Jasem HK, "Flow in two-stage channels with the main channel skewed to the flood plain direction", PhD Thesis, University of Glasgow, Glasgow, Scotland, 1990.
- Naik B, Khatua KK, "Water surface profile computation for compound channels with narrow flood plains", Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42 (3), 941-995.
- Ranga Raju KG, Asawa GL, Mishra HK, "Flowestablishment length in rectangular channels and ducts", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 2000, 126 (7), 533-539.
- Rezaei B, "Overbank flow in compound channels with prismatic and non-prismatic floodplains", PhD Thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK, 2006.
- Rezaei B, Knight DW, "Overbank flow in compound channels with non-prismatic flood plains", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 2011, 137 (8), 815-824.
- Sellin RHJ, "A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain", La Houille Blanche, 1964, 7, 793-802.
- Sellin RHJ, "Hydraulic performance of a skewed twostage flood channel", Journal of Hydraulic Research (IAHR), 1995, 33 (1), 43-64.
- Shiono K, Knight DW, "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel", Journal of Fluid Mechanics, 1991, 222, 617-646.
- Tominaga A, Nezu I, "Turbulent structure in compound open-channel flows", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 1991, 117 (1), 21-41.
- Vojoudi Mehrabani F, Mohammadi M, Ayyoubzadeh SA, Fernandes JN, Ferreira RML, "Turbulent flow structure in a vegetated non-prismaticcompound channel", River Research and Applications, 2020, 36 (9), 1868-1878.
- Yonesi HA, Omid MH, Ayyoubzadeh SA, "The hydraulics of flow in non-prismatic compound channels", Journal of Civil Engineering and Urbanism, 2013, 3 (6), 342-356.



EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study of the Effects of Skew Angle on Flow Field in Skewed Compound Channels with Inclined Floodplains

Mostafa Dolati Mahtaj, Bahram Rezaei^{*}

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina Univercity, Hamedan, Iran

Received: 15 January 2021; Review: 30 August 2021; Accepted: 18 September 2021

Keywords:

Non-prismatic compound channel, Skewed floodplains, Inclined floodplains, Velocity distribution, Boundary shear stress.

1. Introduction

During a flood, water flows out of the main channel and enters the floodplains. In nature, due to the influence of local topographic conditions, rivers have often irregular and non-prismatic shape. In non-prismatic compound channels, because of the effect of changing in cross-sectional area along the channel, the flow structure is more complex than prismatic compound channels. Therefore, it is important to study the flow characteristics in such channels and it can help researcher to better understand the flow behavior in rivers, especially during floods. In the present study, the flow characteristics in a compound channel with inclined and skew floodplains has been investigated experimentally. The experiments were performed at three relative depths of 0.2, 0.3 and 0.4 and for two skew angles of 11.31° and 3.81°. The water surface profile, lateral distributions of velocity and boundary shear stress along the skew part of the flume have been measured and reported. The results of experiments indicate that the lateral distributions of velocity and boundary shear stress in skewed compound channels with inclined floodplains are non-uniform and asymmetric. Also, the flow velocity and boundary shear stress in diverging floodplain are always higher than its value in converging floodplain. By increasing the skew angle of the floodplains from 3.81 to 11.31 degrees, the boundary shear stress and flow velocity in the main channel and on the floodplains increase.

Each river in the natural world has unique shape. Some gently curve, others meander, some are relatively straight and others become braided. However, one thing can be said for the vast majority, is that they are usually compound i.e. have at least one floodplain with a deeper main channel. Much work has been carried out on compound channels with prismatic and non- prismatic floodplains (Chlebek, 2009). It is believed that James & Brown (1977) were to be the first to carry out experimental research into skewed channels. They tested the effect of skewing the main channel relative to the floodplain for three skew angles of 7.2°, 11.0° and 24.05°. Flow on the diverging floodplain was found to accelerate whereas on the converging floodplain the flow decelerated. Elliott (1990) and Elliott & Sellin (1990) also carried out further works on the skewed compound channels at the Flood Channel Facility (FCF); it was revealed that flow exchange between the skewed floodplains and the main channel had significant effects on the flow characteristics such as the velocity and bed shear stress. Chlebek (2009) managed to conduct some extra experimental studies on a compound channel with skewed floodplains and compared the obtained results with the FCF work of Elliott (1990).

2. Methodology

Experiments were conducted by using an 18-m flume at the Bu-Ali Sina University, Department of Civil Engineering. A compound channel of simple rectangular cross-section with inclined floodplains was selected and all experiments were performed in a straight flume, 18 m long, almost 1,200 mm wide, 600 mm deep, and with the average bed slope of S_0 =1.63×10⁻³. Using PVC material, rigid and smooth boundaries were constructed,

E-mail addresses: m.dolatimahtaj@yahoo.com (Mostafa Dolati Mahtaj), b.rezaei@basu.ac.ir (Bahram Rezaei).

both for the main channel of 400 mm width and 50 mm depth, as also for the floodplains 400 mm wide with side slope of 1:13.3 (V:H), see Fig. 1. Experiments were performed in skewed compound channels with two skew angle of 11.31° and 3.81° and three relative depth ($D_r = \overline{H_{fp}}/H$, where $\overline{H_{fp}}$ is the average water depth on floodplains and *H* is the total flow depth) of 0.2, 0.3, and 0.4. Also, as seen in Fig. 1, the main channel and floodplains were isolated using L-shaped iron profiles to make different skew angles of θ . Using a tailgate, the uniform flow in upstream prismatic part of the flume were adjusted.



Fig. 1. Plan view and cross-section view of skewed compound channel with inclined floodplain

The velocity distributions were measured across the whole cross-section at selected sections along the skew part of the flume (three section for skew angle of 11.31° and five section for skew angle of 3.81°). For all experiment cases, the local velocities were recorded across the whole cross-section, laterally every 20mm and vertically every 10mm. Also the lateral distributions of boundary shear stress were measured around the wetted perimeter at 10mm vertical and 20mm horizontal interval, using a Preston tube of 4 mm outer diameter at the same sections where the velocity distributions were tested.

3. Results and discussion

The depth-averaged velocity (U_d) distribution in a cross-section at different experimental sections was calculated by numerical integration of the point velocity measurement over the flow depth (see Eq. (1)).

$$U_d = \frac{1}{h} \sum u_i \,\Delta h_i \tag{1}$$

In which, *h* is the local flow depth, u_i is the point velocity data, and Δh_i is the height of surrounding subareas. The depth-averaged velocity distribution at three selected sections (at the beginning, in the middle, and at the end of skewed part of the flume) for two skew angles of 11.31° and 3.81° are shown plotted in Fig. 2. From the Fig. 2, it can be seen that the depth-averaged velocity in the diverging floodplain is always bigger than its value in the converging floodplain. In the middle of the skew part of the flume, where the flume cross-section is symmetric, the velocity distributions are asymmetric. Also by increasing the relative depth and skew angle, the depth-averaged velocity along the skewed portion increases and get close to uniform distribution. The boundary shear stress distributions for two skew angles of 11.31° and 3.81° and three relative depth of 0.2, 0.3, and 0.4 are shown in Fig. 3. From figure 3 it be seen that similar to the depth-averaged velocity, the boundary shear stress distributions are not symmetric at the middle of the skew part of the flume. Also, compared to converging floodplain, the boundary shear stress in diverging floodplain is greater.

4. Conclusions

The velocity and boundary shear stress distributions in compound channels with inclined and skew floodplains for two skew angles of 11.31° and 3.81° were experimentally investigated. The results of experimental measurements indicated that both the depth-averaged velocity and boundary shear stress in the middle of skewed part of the flume are not symmetric. Also, in general the velocity and bed shear stress in the diverging floodplain are bigger than the converging floodplain. Moreover, by increasing the skew angle and relative depth, both velocity and shear stress along the skew part of the flume increase.



Fig. 2. Deph-averaged velocity distribution at three experiment sections for two skew angles of 11.31° and 3.81° and different relative depths



Fig. 3. Shear stress distribution at three experiment sections for two skew angles of 11.31° and 3.81° and different relative depths

5. References

Chlebek J, "Modelling of simple prismatic channels with varying roughness using the SKM and a study of flows in smooth non-prismatic channels with skewed floodplain", PhD Thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK, 2009.

Elliott SCA, "An investigation into skew channel flow", PhD Thesis, University of Bristol, Bristol, UK, 1990.

- Elliott SCA, Sellin RHJ, "SERC flood channel facility: Skewed flow experiments", Journal of Hydraulic Research (IAHR), 1990, 28 (2), 197-214.
- James M, Brown BJ, "Geometric parameters that influence floodplain flow, waterways experiment section", Report H-77-1, Hydraulics Laboratory, Department of Defense, US Army Corps of Engineering, Vicksburg, Mississippi, 1977.