

بررسی اثر شرایط ورودی کانال مرکب بر مشخصات جریان به کمک سرعت‌سنجی تصویری ذرات

مصطفی نبی‌پور* (دکتری)

سید علی اکبر صالحی نیشابوری (استاد)
دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

سید حسین مهاجری (استادیار)
دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی

امیررضا زرانی (استاد)
دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه امیرکبیر

رضا صادقی دودران (دانشجوی دکتری)
دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۰)
دوری ۳-۳۷، شماره ۲، ص. ۳۷-۴۶، (پژوهشی)

در مطالعات کانال مرکب به منظور کنترل برقراری شرایط توسعه یافتگی کامل جریان، لازم است توزیع دبی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت بررسی شود. هدف این تحقیق، بررسی اثر شرایط ورودی در کانال مرکب با طول کوتاه در برقراری شرایط توسعه یافتگی با استفاده از بررسی میدان جریان و پارامترهای آشفتگی است. بدین منظور از ابزار سرعت‌سنجی تصویری ذرات در یک کانال مرکب استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در کانال مرکب کوتاه با استفاده از آرام‌کننده‌ی یکسان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت، حتی تا انتهای کانال انتقال جرم از سیلاب‌دشت به کانال اصلی وجود دارد. در این حالت تغییرات سرعت طولی در عرض سیلاب‌دشت بسیار کم است و فروافتادگی شدید در محل سرعت بیشینه در کانال اصلی (در نزدیکی ناحیه اندرکنش) رخ می‌دهد. در حالی که در کانال مرکب کوتاه با افزودن آرام‌کننده‌ی کمکی در سیلاب‌دشت، شرایط مناسب و مشابه با کانال مرکب توسعه‌یافته تشکیل می‌شود.

mnabipour61@gmail.com
salehi@modares.ac.ir
hossein.mohajeri@khu.ac.ir
zarrati@aut.ac.ir
reza_s329@yahoo.com

واژگان کلیدی: کانال مرکب روباز، اثر ورودی، انتقال جرم، میدان جریان، سرعت‌سنجی تصویری ذرات.

۱. مقدمه

اغلب رودخانه‌های طبیعی دارای یک مقطع اصلی به همراه یک یا دو سیلاب‌دشت مجاور (با تراز بالاتر از مقطع اصلی) هستند. به چنین مقطعی در اصطلاح «کانال مرکب» گفته می‌شود. در کانال مرکب یک جریان عمیق در مقطع اصلی و یک جریان کم‌عمق در سیلاب‌دشت تشکیل می‌شود.^[۱] اصلی‌ترین مشخصه‌ی جریان در کانال مرکب، تفاوت سرعت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت است که باعث ایجاد مقاومت در جریان و در نتیجه تغییر ظرفیت آبگذری کانال مرکب می‌شود.^[۲] در این شرایط گرادبان شدید سرعت بین مقطع اصلی و سیلاب‌دشت موجب تبادل مومنتم و جرم شدید بین دو مقطع کم‌عمق و عمیق می‌شود.^[۳] شناخت نحوه‌ی انتقال مومنتم و جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت در یک رودخانه‌ی طبیعی یا کانال مرکب برای بررسی فرایند جابه‌جایی رسوبات،

آلاینده‌ها و مواد مغذی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت، سامان‌دهی رودخانه ارزیابی خطرات سیل از اهمیت زیادی برخوردار است.^[۵] انتقال مومنتم و جرم در کانال‌های مرکب غیرممنشوری مانند کانال‌های مرکب دارای پیچ‌وخم،^[۶] کانال‌های مرکب همگرا^[۷] و کانال‌های مرکب واگرا^[۸] بسیار شدیدتر از کانال‌های ممنشوری است. البته در کانال‌های مرکب ممنشوری نیز امکان تبادل مومنتم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت وجود دارد. بررسی ساختار جریان در کانال مرکب، از دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی آغاز شده و تاکنون ادامه یافته است.^[۱] علی‌رغم انجام مطالعات آزمایشگاهی^[۹-۱۱] و مدل‌سازی عددی^[۱۲،۱۳] متعدد در خصوص بررسی ساختار جریان در کانال مرکب، تحقیقات محدودی در مورد شرایط جریان در طول کانال و محل برقراری شرایط توسعه‌یافتگی جریان در کانال مرکب ممنشوری صورت گرفته است.^[۱۴] در طول کانال مرکب (با توجه به مشخصات کانال مرکب و شرایط ورودی)، اغلب به‌طور متوسط انتقال جرم بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی وجود دارد و بنابراین ممکن است در ابتدای کانال مرکب، جریان‌های ثانویه شامل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۵/۱۶، پذیرش ۱۴۰۰/۶/۶

DOI:10.24200/J40.2021.57470.1577

دو گردابه‌ی سیلاب‌دشت و کانال اصلی در ناحیه‌ی اندرکنش به درستی شکل نگیرند.

به‌طور معمول در مطالعات کانال‌های روباز، در انتخاب محل مناسب اندازه‌گیری جریان معمولاً به توسعه‌ی لایه‌ی مرزی توجه شده و مقطع اندازه‌گیری در نیمه‌ی دوم پایین‌دست کانال انتخاب می‌شود.^[۱۶، ۱۵] اما در کانال مرکب اگر جریان ورودی به سیلاب‌دشت و کانال اصلی از طریق یک مخزن مشترک صورت گیرد (که در بسیاری از مدل‌های آزمایشگاهی این چنین است)، انتقال جرم بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی تا طول زیادی از ورودی کانال اتفاق می‌افتد؛ برای اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان، لازم است توزیع متناسب دبی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت نیز به دقت بررسی شود.^[۱۴] منظور از توزیع متناسب دبی در کانال مرکب عدم انتقال جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت است که طول مورد نیاز برای این منظور بیشتر از طول مورد نیاز برای توسعه‌ی لایه‌ی مرزی در کانال‌های باز مستطیلی است. عدم توجه دقیق به توسعه‌یافتگی جریان در کانال مرکب در برخی از تحقیقات پیشین^[۱۷] می‌تواند صحت نتایج آن را زیر سؤال ببرد. برای فهم بهتر پدیده‌ی عدم انتقال جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت، یک حجم کنترل از سیال در محدوده‌ی سیلاب‌دشت در نظر می‌گیریم.^[۱۸] سطح تحتانی حجم کنترل منطبق بر بستر سیلاب‌دشت، سطح فوقانی آن منطبق بر سطح آزاد آب، یک سطح جانبی آن منطبق بر دیواره‌ی سیلاب‌دشت و سطح جانبی دیگر آن منطبق بر سطح اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت است. ورودی و خروجی حجم کنترل در محدوده‌ی اندازه‌گیری (که دارای جریان کاملاً توسعه‌یافته است^[۱۹]) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به عدم انتقال جرم از بستر و دیواره‌ی سیلاب‌دشت و سطح آزاد آب و همچنین یکسان بودن دبی جریان ورودی و خروجی (به دلیل برقراری جریان کاملاً توسعه‌یافته در این ناحیه)، برای برقراری قانون بقای جرم در این حجم کنترل، باید متوسط دبی جریان‌های ورودی و خروجی از سطح اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت (ناحیه اندرکنش) برابر صفر باشد.

بررسی سرعت متوسط عمقی در عرض کانال مرکب نشان می‌دهد که با افزایش فاصله‌ی طولی از ورودی کانال به اندازه‌ی حداکثر ۵/۶ برابر عرض سیلاب‌دشت، عرض لایه‌ی اختلاطی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت به مقدار ثابتی می‌رسد.^[۲۰] اما برای اطمینان از برقراری توزیع مناسب دبی جریان بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی، باید نسبت طول کانال به عرض سیلاب‌دشت بزرگ‌تر از ۳۵ باشد.^[۱۴] بنابراین با توجه به محدودیت ساخت کانال‌های بلند، باید برای تشکیل جریان توسعه‌یافته در کانال مرکب تدابیر لازم لحاظ شود. در مطالعه‌ی حاضر کانال با نسبت طول کانال به عرض سیلاب‌دشت کوچک‌تر از ۳۵، کانال کوتاه نامیده می‌شود. برای برقراری توزیع مناسب جریان در کانال‌های مرکب کوتاه می‌توان از دو ورودی مستقل (با سیستم پمپاژ مستقل) برای کانال اصلی و سیلاب‌دشت یا تعبیه‌ی چند صفحه‌ی توری فلزی با شبکه‌ی ریزتر در ورودی سیلاب‌دشت تحت عنوان آرام‌کننده‌ی کمکی استفاده کرد. ولی کانال‌های آزمایشگاهی مرکب غالباً از یک مخزن مشترک تغذیه شده و امکان تفکیک دبی سیلاب‌دشت و کانال اصلی وجود ندارد.^[۲۱] در بیشتر آزمایش‌ها معمولاً در ورودی به مدل آزمایشگاهی از یک سازه تبدیل برای تغییر تدریجی مقطع کانال ساده به کانال مرکب استفاده می‌شود. در این شرایط دبی ورودی به سیلاب‌دشت در ابتدای کانال بیشتر از ظرفیت آن است که به تدریج در طول کانال به کانال اصلی تخلیه می‌شود.^[۱۴]

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که جریان عرضی به‌طور قابل ملاحظه‌یی ساختار جریان آشفته را تغییر می‌دهد. در شرایط جریان توسعه‌یافته گردابه‌های افقی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت شکل نمی‌گیرد. در این حالت یکنواختی بیشتر سرعت طولی جریان بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی وجود دارد.^[۲۲] یکنواختی بیشتر

سرعت طولی جریان بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی موجب کاهش اندرکنش این دو مقطع می‌شود. در حالت تخلیه‌ی جریان از سیلاب‌دشت به کانال اصلی، محل وقوع بیشینه‌ی تنش رینولدز $pu'w'$ به سمت کانال اصلی جابه‌جا می‌شود.^[۲۳] مرور کارهای پیشین نشان می‌دهد که بررسی انتقال جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت در مطالعات آزمایشگاهی سابقه‌ی چندانی ندارد و از سال ۲۰۰۵ آغاز شده است.^[۱۴] همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مطالعات پیشین اثر شرایط ورودی بر توسعه‌یافتگی جریان در کانال مرکب به‌طور کامل انجام نشده است. بر این اساس در نوشتار حاضر، الگوی جریان و پارامترهای جریان آشفته و به‌طور خاص شدت‌های آشفتگی و تنش‌های رینولدز در یک کانال مرکب با طول کوتاه بررسی شده و نتایج آن با ساختار جریان توسعه‌یافته مورد مقایسه قرار گرفته است. با استفاده از یافته‌های این تحقیق می‌توان دانست که چگونه با افزودن شبکه‌های ریزتر در ورودی سیلاب‌دشت می‌توان در کانال مرکب با طول کوتاه‌تر هم به جریان کاملاً توسعه‌یافته دست یافت. بدین معنا که مقایسه‌ی نتایج الگوی جریان و پارامترهای آشفتگی در حالت جریان توسعه‌یافته و توسعه‌نیافته در کانال مرکب، این امکان را به پژوهش‌گران فعال در این زمینه می‌دهد که با استفاده از نتایج نوشتار حاضر، به شکل‌گیری جریان توسعه‌یافته یا توسعه‌نیافته در کانال مرکب آگاهی یابند. بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند برای محققان در ساخت مدل‌های آزمایشگاهی قابل اطمینان کانال مرکب و همچنین اعتبارسنجی نتایج تحقیقات پیشین مورد استفاده قرار گیرد.

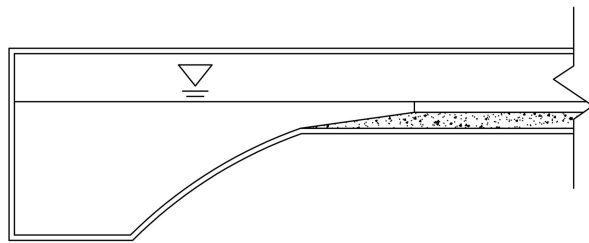
۲. مواد و روش‌ها

آزمایش‌های حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در یک کانال مستقیم مرکب روباز با شیب ثابت ۰/۰۰۳۳ و با مقطع مرکب به طول ۱۱، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۷ متر انجام پذیرفت. کانال آزمایشگاهی مذکور، در حقیقت یک کانال با مقطع مرکب بوده که به علت تقارن، نیمی از آن ساخته شده است. جداره‌های کانال به‌صورت قائم و از جنس شیشه بوده و برای تصویربرداری از جریان، مناسب است. با توجه به زبری شیشه، جداره‌ها و کف کانال از نظر هیدرولیکی صاف است.^[۲۳] برای تنظیم عمق جریان، از یک سرریز در انتهای کانال استفاده شد. دبی در ورودی کانال با استفاده از شیر تنظیم دبی خروجی از پمپ، کنترل و به‌وسیله یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شد. به‌منظور حذف تلاطم در ابتدای کانال از صفحه‌های موازی آرام‌کننده جریان استفاده شده است.

در این مطالعه محور x در راستای جریان اصلی و موازی بستر بوده و در جهت پایین‌دست مثبت در نظر گرفته شده و محور z مربوط به راستای عمود بر جریان و جهت مثبت آن از کف بستر سیلاب‌دشت به سمت بالاست. در نهایت محور y در راستای عرضی بوده و از دیواره سیلاب‌دشت به سمت کانال اصلی مثبت است.

شرایط هیدرولیکی آزمایش‌های انجام شده به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس اطلاعات گزارش شده در این جدول، جریان در کانال مرکب دارای رژیم زیربحرانی و کاملاً آشفته است. کانال مرکب در مطالعه‌ی حاضر از نوع مستطیلی است که عمق جریان در سیلاب‌دشت و کانال اصلی به ترتیب ۵ و ۲۰ سانتی‌متر است. جریان در کانال مرکب بر اساس نسبت عمق جریان در کانال اصلی به سیلاب‌دشت (عمق نسبی) برابر ۴ از نوع کم‌عمق محسوب می‌شود.^[۲۵، ۲۴]

اندازه‌گیری‌ها در فاصله‌ی ۷/۹ متر از ورودی کانال انجام شده است. در این مقطع نسبت طول به عرض سیلاب‌دشت معادل ۱۳/۲ خواهد بود که کم‌تر از ۳۵



الف) مقطع طولی مخزن و سازه تبدیل در ابتدای کانال مرکب؛



ب) ورودی آرام کننده یکسان در کانال اصلی و سیلاب دشت؛



ج) ورودی آرام کننده کمکی (تعبیه ی چند لایه توری فلزی در ورودی سیلاب دشت) کانال مرکب.

شکل ۱. سازه تبدیل مقطع مستطیلی به کانال مرکب و انواع ورودی.

همراه است،^[۲۸، ۲۹] ذرات الک شده پلاویلات^۲ با اندازه ی ۳۰۰ تا ۶۰۰ میکرومتر و چگالی ۱٫۰۳ گرم در سانتی متر مکعب به عنوان مواد ردیاب در آب استفاده شد. این نوع ذرات توسط پژوهشگران دیگر نیز در روش سرعت سنجی تصویری ذرات به کار رفته است.^[۳۰] در هر برداشت، مواد ردیاب در ورودی کانال تزریق شد. تزریق ذرات هدف (مواد ردیاب) به گونه یی انجام شد تا توزیع همگنی از این ذرات به دست آید.

پردازش و تحلیل تصاویر با استفاده از نرم افزار PIVLab انجام شد.^[۳۱] فرکانس و زمان نمونه برداری به ترتیب حدود ۲۴۰ هرتز و ۸۰ ثانیه بوده است. بر اساس پژوهش های دیگر پژوهشگران زمان و فرکانس نمونه برداری مذکور برای اندازه گیری سرعت در کانال مرکب کافی به نظر می رسد.^[۳۲، ۳۳] با توجه به تحقیقات پیشین می توان عدم قطعیت در اندازه گیری پارامترهای مستقل را با فرض توزیع نرمال برآورد کرد.^[۳۳] بر این اساس عدم قطعیت بیشینه اندازه گیری سرعت طولی جریان با سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر ۰٫۰۶ سانتی متر بر ثانیه است.

برای بررسی دقت اندازه گیری دستگاه سرعت سنجی تصویری ذرات، باید مقادیر اندازه گیری شده را با مقادیر واقعی یا نظری مقایسه کرد. یکی از راه های به دست آوردن دقت دستگاه سرعت سنجی تصویری ذرات، مقایسه ی مقادیر سرعت طولی

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی آزمایش ها.

۵	عمق جریان در سیلاب دشت (سانتی متر)
۲۰	عمق جریان در کانال اصلی (سانتی متر)
۴	عمق نسبی
۳۹	دبی (لیتر در ثانیه)
۰٫۳۵	سرعت متوسط (متر در ثانیه)
۰٫۳۴	عدد فرود
عدد رینولدز (با فرض شعاع هیدرولیکی به عنوان طول مشخصه) $2,8 \times 10^4$	

(نسبت طول به عرض سیلاب دشت قابل اطمینان برای توزیع مناسب دبی در کانال مرکب) است. بنابراین با توجه به نتایج تحقیقات پیشین،^[۱۴] این کانال مرکب از نوع کوتاه بوده و در صورت عدم استفاده از تمهیدات خاص در ورودی، توزیع مناسب دبی در این کانال به طور صحیح انجام نخواهد شد.

در این تحقیق مقطع مستطیلی توسط یک سطح شیب دار با شیب ثابت به مقطع مرکب تبدیل می شود. این سازه تبدیل دارای عرض ۶۰ سانتی متر (معادل عرض سیلاب دشت) بوده و در طول ۱ متر، تراز کانال را ۱۵ سانتی متر افزایش می دهد که مقطع طولی آن در شکل ۱ الف نمایش داده شده است.

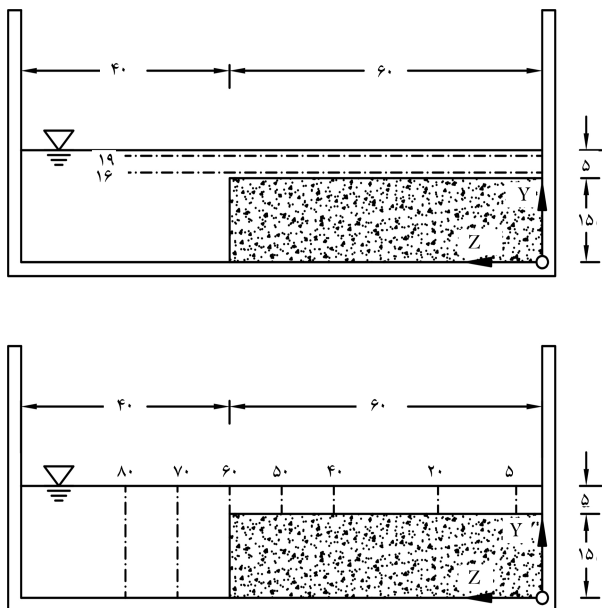
اندازه گیری میدان جریان در کانال مرکب با دو نوع شرایط ورودی به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

۱. ورودی آرام کننده یکسان در کانال اصلی و سیلاب دشت: در این حالت در انتهای مقطع تبدیل، صفحات آرام کننده جریان تعبیه شده اند (شکل ۱ - ب)؛

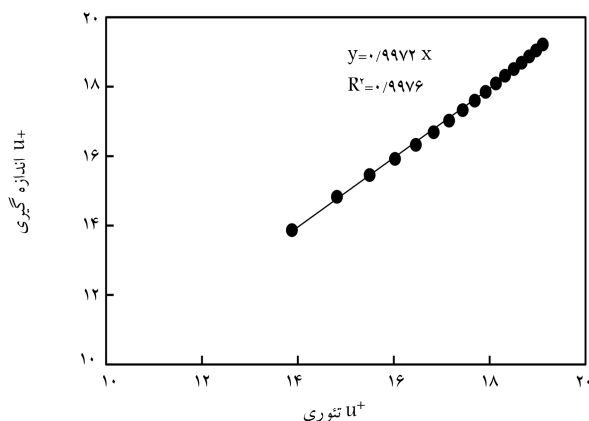
۲. ورودی آرام کننده کمکی: در این حالت علاوه بر وجود آرام کننده یکسان در کانال اصلی و سیلاب دشت، در ورودی سیلاب دشت از ۲۰ صفحه ی توری فلزی اضافی استفاده شده است تا دبی ورودی به سیلاب دشت را کاهش دهد (شکل ۱ - ج).

شایان ذکر است به دلیل کوتاه بودن طول کانال، در شرایط عدم اصلاح ورودی کانال مرکب (ورودی آرام کننده یکسان در کانال اصلی و سیلاب دشت) جریان در محل اندازه گیری به صورت توسعه نیافته خواهد بود. اما با افزودن آرام کننده کمکی، کانال مرکب به گونه یی اصلاح شد که در محل اندازه گیری، جریان کاملاً توسعه یافته (عدم انتقال جرم بین کانال اصلی و سیلاب دشت) حاصل شد. اصلاح ورودی کانال مرکب با استفاده از سعی و خطا و با تغییر دادن تعداد صفحات توری های فلزی انجام گرفت. بدین ترتیب که با تغییر تعداد صفحه ی توری فلزی و برداشت چند صفحه ی افقی و عمودی در ناحیه ی اندرکنش، تعداد مناسب توری های اضافی برای برقراری گردابه های کانال مرکب تعیین شد.

به منظور اندازه گیری صحیح سرعت (مخصوصاً سرعت عرضی و قائم که مقدار بسیار کوچکی دارند)، استفاده از ابزار اندازه گیری غیرتداخلی اهمیت دارد. بنابراین برای اندازه گیری میدان جریان از دستگاه سرعت سنجی تصویری ذرات^۱ به صورت دوبعدی و دومؤلفه یی استفاده شد. مشخصات دستگاه سرعت سنجی تصویری ذرات مورد استفاده در این تحقیق،^[۲۷، ۲۶] به تفصیل ارائه شده است. روش سرعت سنجی تصویری ذرات امکان اندازه گیری سرعت جریان در همه عمق ها را با دقت مناسب فراهم می کند، در حالی که اندازه گیری سرعت با سایر روش ها مانند روش سرعت سنج صوتی داپلر در نزدیکی سطح آب امکان پذیر نبوده و در نزدیکی جدارها با خطا



شکل ۲. صفحات برداشت افقی و عمودی در کانال مرکب (همه‌ی ابعاد برحسب سانتی متر است).



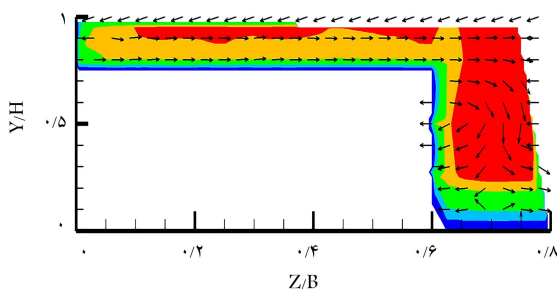
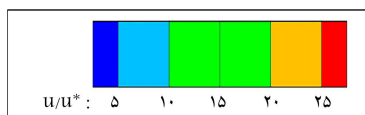
شکل ۳. نمودار u^+ اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سرعت‌سنجی تصویری ذرات برحسب u^+ نظری در محدوده‌ی $300 < y^+ < 30$.

جریان در کانال مستطیلی ساده (در حالت جریان دوبعدی) با روابط نظری (پروفیل سرعت لگاریتمی در راستای عمق جریان) است. به دلیل یک‌سو شدن جریان در منطقه‌ی نزدیک بستر و دوری از زیرلایه‌ی لزوج، فاعده‌ی لگاریتمی سرعت در محدوده‌ی $300 < y^+ < 30$ صادق است.^[۲۴] طبق تعریف $y^+ = yu_{*b}/\nu$ است که در آن u_{*b} سرعت برشی کف، y عمق جریان و ν لزجت سینماتیکی است. بر این اساس در شکل ۲ نمودار $u^* = \bar{u}/u_{*b}$ (سرعت طولی متوسط) اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سرعت‌سنجی تصویری ذرات برحسب u^+ نظری در محدوده‌ی $300 < y^+ < 30$ ترسیم شده است. در ناحیه‌ی برقراری رابطه‌ی لگاریتمی سرعت و در یک کانال مستطیلی با بستر صاف، u^+ با استفاده از رابطه‌ی ۱ به هم مرتبط می‌شوند:^[۲۵]

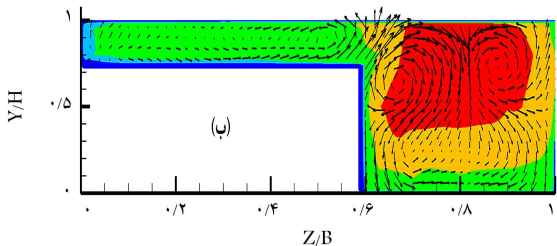
$$u^+ = 2.44 \ln y^+ + 5.729 \quad (1)$$

چنان که در شکل ۲ مشاهده می‌شود ضریب همبستگی بین مقادیر u^+ اندازه‌گیری شده و نظریه نزدیک به ۱ است، که این نشان از دقت خوب دستگاه سرعت‌سنجی تصویری ذرات در اندازه‌گیری سرعت جریان است.

در این تحقیق، میدان جریان در چند صفحه‌ی افقی و قائم برداشت شد. برداشت جریان در راستای عمودی به موازات دیواره‌های کانال و در راستای افقی به موازات بستر کانال انجام شد. صفحات عمودی در ۷ مقطع به فواصل ۵، ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ سانتی‌متر از دیواره‌ی سیلاب‌دشت برداشت شد. همچنین دو صفحه‌ی افقی به فاصله‌های ۱۶ و ۱۹ سانتی‌متر از کف کانال اصلی و در عرض کانال به فاصله‌ی صفر تا ۸۰ سانتی‌متر از دیواره‌ی سیلاب‌دشت برداشت شده‌اند. صفحات اندازه‌گیری افقی و عمودی به صورت خط‌چین در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف) توسعه نیافته؛



ب) توسعه یافته.

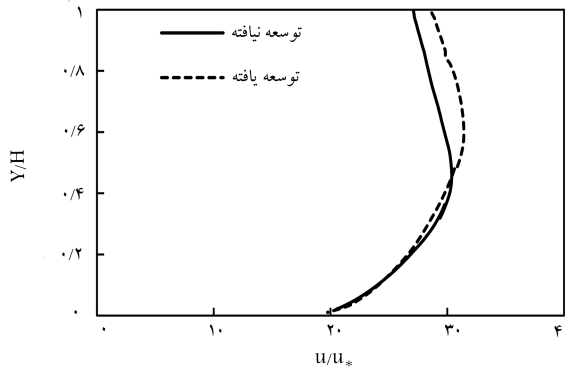
شکل ۴. بردارهای سرعت جریان ثانویه در کانال مرکب.

۳. نتایج

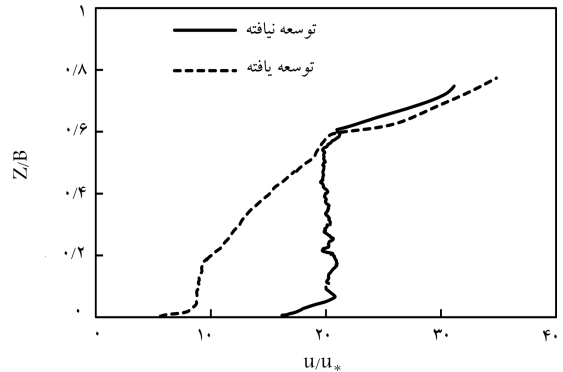
به دلیل اهمیت برقراری جریان کاملاً توسعه‌یافته در کانال مرکب، در این بخش ابتدا الگوی جریان و پارامترهای آشفتگی در دو حالت جریان توسعه‌یافته (عدم انتقال جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت) و جریان توسعه‌نیافته (وقوع انتقال جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت) با هم مقایسه شده است، تا تفاوت‌های این دو نوع جریان در کانال مرکب مشخص شود.

۱.۳. الگوی جریان

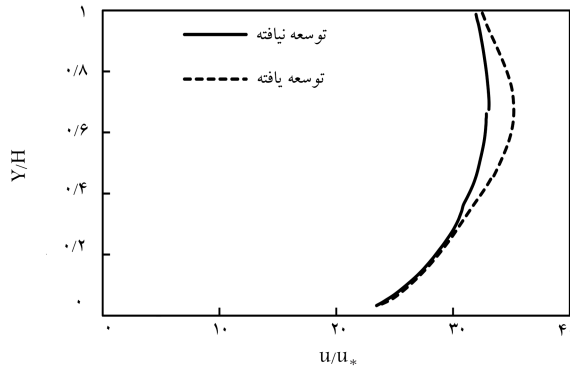
در این بخش الگوی جریان در کانال مرکب در دو حالت جریان توسعه‌یافته و توسعه‌نیافته مقایسه شده است. در ابتدا برای روشن شدن نحوه‌ی انتقال موئمتم عرضی بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی، در شکل ۴ بردارهای سرعت جریان ثانویه در سطح مقطع کانال مرکب در دو حالت مذکور ارائه شده است. در هر یک از این



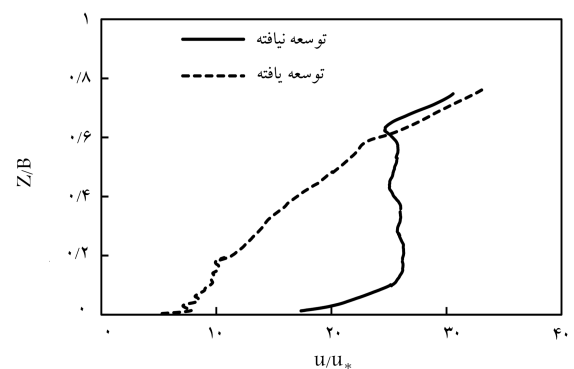
الف) با فاصله ی ۷۰ cm از دیواره سیلاب دشت؛



الف) با فاصله ی ۱۶ cm از کف کانال اصلی؛



ب) با فاصله ی ۸۰ cm از دیواره سیلاب دشت.



ب) با فاصله ی ۱۹ cm از کف کانال اصلی.

شکل ۶. پروفیل عمقی سرعت متوسط طولی در حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه ی قائم.

شکل ۵. پروفیل سرعت متوسط طولی در عرض کانال در حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه ی افقی.

با توجه به این نمودارها می توان دریافت که در هر دو صفحه ی افقی در حالت جریان توسعه نیافته، سرعت متوسط طولی در سیلاب دشت (به جز در ناحیه اطراف دیواره جانبی) تقریباً یکنواخت است. برای نمونه در صفحه ی افقی با فاصله ی ۱۹ سانتی متر از کف کانال اصلی، مقادیر سرعت متوسط طولی بی بعد در حالت جریان توسعه یافته در عرض نسبی ۰/۰۵ تا ۰/۰۶ از ۸/۵ تا ۲۴/۱ افزایش یافته است، در حالی که در حالت جریان توسعه نیافته از ۲۱/۸ تا ۲۵/۳ تغییر کرده است. عدم تغییر سرعت در عرض سیلاب دشت در حالت جریان کم عمق در سیلاب دشت با نتایج مرجع^[۳۶] مغایرت دارد. این موضوع نشان از عدم اندرکنش کامل سیلاب دشت و کانال اصلی در حالت جریان توسعه نیافته است. سرعت طولی تقریباً یکسان در عرض سیلاب دشت در حالت جریان توسعه نیافته نشان می دهد که جریان در سیلاب دشت مشابه یک کانال مستطیلی ساده است. از سوی دیگر در شرایط جریان توسعه یافته در سیلاب دشت، سرعت طولی جریان در عرض سیلاب دشت تغییر قابل ملاحظه یی دارد و با نزدیک شدن به کانال اصلی، به شدت افزایش می یابد. یکنواختی بیشتر بین سرعت طولی جریان در سیلاب دشت و کانال اصلی در حالت جریان توسعه نیافته با نتایج مرجع^[۳۲] همخوانی دارد.

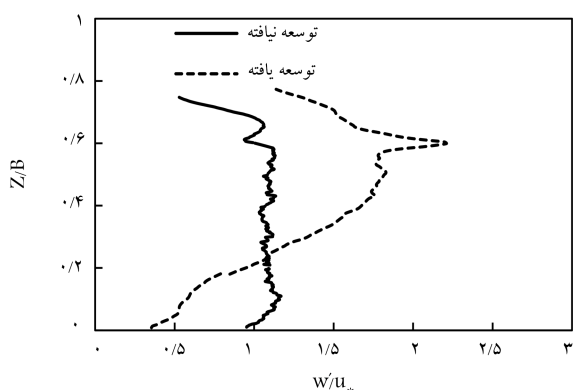
نکته ی دیگر که در بررسی شکل ۵ حائز اهمیت است، برقراری سرعت بیشتر در سیلاب دشت در حالت جریان توسعه نیافته نسبت به حالت جریان توسعه یافته است. این مطلب نشانگر آن است که در حالت جریان توسعه نیافته، دبی عبوری از سیلاب دشت بیشتر از ظرفیت واقعی آن است و حتی در بازه اندازه گیری نیز انتقال جرم از سیلاب دشت به کانال اصلی وجود دارد.

در شکل ۶ مقادیر بی بعد سرعت متوسط طولی در راستای قائم در دو حالت

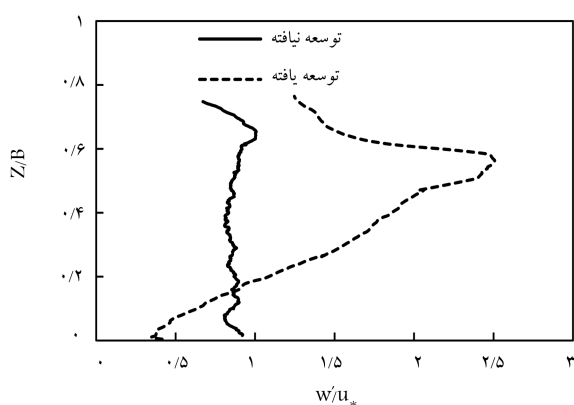
دو شکل، تصویر پیش زمینه نشانگر سرعت طولی بی بعد شده با استفاده از سرعت برشی مقطع $u_* = \sqrt{gRSf}$ ، شتاب گرانش، شعاع هیدرولیکی و Sf شیب خط انرژی است.

با دقت در این تصاویر می توان دریافت که در حالت توسعه نیافته، انتقال جرم از سیلاب دشت به کانال اصلی وجود دارد. این در حالی است که با اصلاح ورودی، انتقال جرم در کانال مرکب به صفر رسیده است و گردابه های کانال اصلی و سیلاب دشت به طور کامل تشکیل شده اند. همان طور که بیان شد علت انتقال جرم بین کانال اصلی و سیلاب دشت، طول کم کانال برای برقراری تعادل در توزیع دبی در کانال مرکب است؛ به عبارت دیگر دبی عبوری از سیلاب دشت در ورودی بیش از ظرفیت آن بوده و در طول کانال، جرم از سیلاب دشت به کانال اصلی تخلیه می شود.^[۱۲]

لازم به توضیح است که یکی از برتری های این مطالعه نسبت به دیگر مطالعات انجام شده در زمینه ی توزیع مناسب دبی بین سیلاب دشت و کانال اصلی این است که در این تحقیق با ترسیم بردارهای جریان ثانویه در مقطع کانال، از برقراری گردابه های جریان یا انتقال جرم بین سیلاب دشت و کانال اصلی اطمینان حاصل شده است. در شکل ۵ مقادیر بی بعد سرعت متوسط طولی در راستای عرض کانال مرکب در دو حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته برای دو صفحه ی افقی با فاصله های ۱۶ و ۱۹ سانتی متر از کف کانال اصلی نشان داده شده اند. منظور از سرعت متوسط طولی، میانگین زمانی سرعت های طولی جریان در مدت زمان اندازه گیری است. در این نمودارها مقادیر سرعت متوسط طولی با استفاده از سرعت برشی مقطع (u_*) و محور قائم با استفاده از عرض کانال مرکب (B) بی بعد شده است.



الف) با فاصله ی ۱۶ cm از کف کانال اصلی؛



ب) با فاصله ی ۱۹ cm از کف کانال اصلی.

شکل ۷. پروفیل شدت آشفتگی عرضی در عرض کانال در حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه ی افقی.

این نشان از عدم کارایی ورودی اصلاح نشده در کانال مرکب با طول کوتاه است. شایان ذکر است که مقادیر شدت آشفتگی عرضی در حالت جریان توسعه یافته به مراتب کم تر از جریان توسعه یافته است که این نشان دهنده عدم اندرکنش مناسب در جریان توسعه یافته است.

در شکل ۸ پروفیل مقادیر $\overline{w'w'}/u_*^2$ در راستای عرض کانال مرکب در دو حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته برای دو صفحه ی افقی با فاصله ی ۱۶ و ۱۹ سانتی متر از کف کانال اصلی نشان داده شده است. در این پارامتر w' و w' به ترتیب مؤلفه ی نوسانی سرعت در راستای طولی و عرضی هستند.

با دقت در شکل ۸ می توان دریافت در حالت جریان توسعه یافته مقادیر $\overline{w'w'}$ در سیلاب دشت نزدیک به صفر و بسیار کوچک هستند که بر اساس فرضیه بوزینسک، این پدیده به دلیل عدم تغییر سرعت متوسط طولی جریان در راستای عرض سیلاب دشت است.

مقادیر $\overline{w'w'}/u_*^2$ در سیلاب دشت در شرایط جریان توسعه یافته در بازه ۰/۳- تا ۰/۵ قرار دارد، در حالی که در حالت جریان توسعه یافته در بازه ۰/۱- تا ۰/۹۵ تغییر می کند. مقادیر نزدیک به صفر $\overline{w'w'}$ در سیلاب دشت نشانگر وقوع جریان مشابه با جریان دو بعدی در کانال ساده مستطیلی است. از سوی دیگر در حالت جریان توسعه یافته تغییرات مقادیر $\overline{w'w'}$ در راستای عرض کانال بسیار شدید بوده که ناشی از اندرکنش قابل توجه بین سیلاب دشت و کانال اصلی است. تغییرات شدید مقادیر $\overline{w'w'}$ در راستای عرض کانال مرکب در دیگر تحقیقات در

جریان توسعه یافته و توسعه نیافته برای دو صفحه ی عمودی با فاصله ی ۷۰ و ۸۰ سانتی متر از دیواره سیلاب دشت نشان داده شده اند. در این نمودارها مقادیر سرعت متوسط طولی با استفاده از سرعت برشی مقطع (u_*) و محور قائم با استفاده از عمق جریان در کانال اصلی (H) بی بعد شده اند.

با دقت در شکل ۶- الف می توان دریافت که محل رخداد بیشینه ی سرعت^۳ در حالت جریان توسعه یافته به طور قابل توجهی پایین تر از حالت توسعه یافته است. محل وقوع بیشینه ی سرعت در حالت جریان توسعه یافته و توسعه یافته به ترتیب برابر ۰/۴۹ و ۰/۶۰ ارتفاع جریان از کف کانال اصلی است. این در حالی است که در تحقیقات مشابه در کانال مرکب (با عمق نسبی ۰/۲۵)، محل وقوع بیشینه سرعت حدود ۰/۶۵ ارتفاع جریان از کف کانال اصلی گزارش شده است.^[۳۲] بدین ترتیب محل سرعت بیشینه در حالت جریان توسعه یافته (استفاده از آرام کننده ی کمکی در سیلاب دشت) به نتایج تحقیقات پیشین نزدیک تر است.

پایین آمدن محل رخداد سرعت بیشینه ی جریان در حالت جریان توسعه یافته نسبت به جریان توسعه یافته با مطالعات مرجع^[۳۰] نیز همخوانی دارد. بدین ترتیب یکی از روش های کاربردی اطمینان از توزیع دبی مناسب بین سیلاب دشت و کانال اصلی، توجه به محل وقوع دبی بیشینه جریان است.

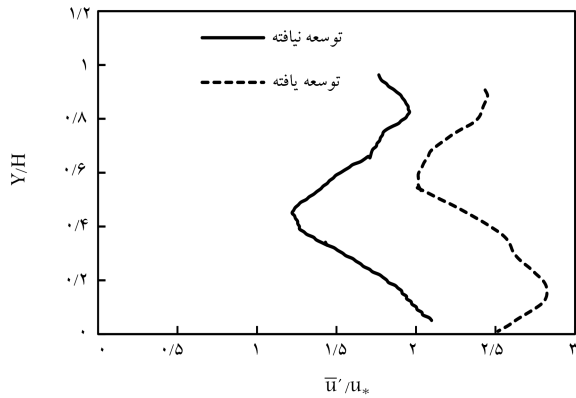
نکته ی دیگری که در شکل ۶ می توان مشاهده کرد، سرعت بیشتر جریان در کانال اصلی در حالت جریان توسعه یافته نسبت به جریان توسعه یافته است؛ زیرا در حالت جریان توسعه یافته دبی عبوری از سیلاب دشت بیشتر از ظرفیت واقعی آن است و به همین دلیل در حالت جریان توسعه یافته انتقال جرم از سیلاب دشت به کانال اصلی وجود دارد.^[۱۴]

۲.۳. پارامترهای آشفتگی

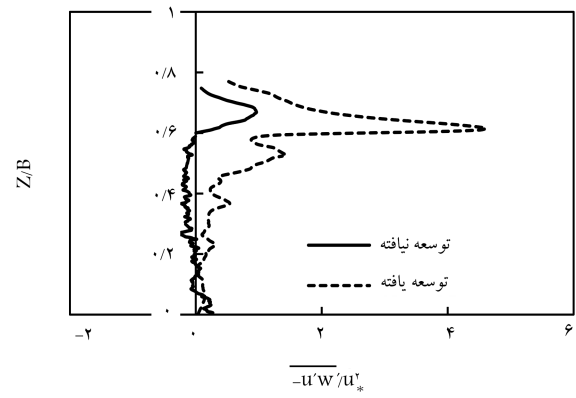
در این بخش پارامترهای آشفتگی جریان در کانال مرکب در دو حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته مورد مقایسه قرار گرفته است.

در شکل ۷ مقادیر شدت آشفتگی عرضی $(\overline{w'})$ در راستای عرض کانال مرکب در دو حالت مذکور برای دو صفحه ی افقی با فاصله های ۱۶ و ۱۹ سانتی متر از کف کانال اصلی نشان داده شده است. شدت آشفتگی عرضی با استفاده از رابطه $\overline{w'} = \sqrt{w'^2}$ به دست می آید که در آن w' نوسان مؤلفه ی عرضی سرعت جریان است. با دقت در این نمودارها می توان دریافت که مقادیر شدت آشفتگی عرضی در حالت جریان توسعه یافته در عرض سیلاب دشت تقریباً یکنواخت بوده و در محل اندرکنش افزایش نمی یابد. این در حالی است که در حالت جریان توسعه یافته مقادیر شدت آشفتگی عرضی از دیواره سیلاب دشت تا محل اتصال کانال اصلی و سیلاب دشت به شدت افزایش یافته و سپس در کانال اصلی روند کاهشی دارد. به بیان دیگر مقادیر شدت آشفتگی عرضی در حالت جریان توسعه یافته در سیلاب دشت در بازه ۰/۴ تا ۰/۷۵ قرار دارد، در حالی که در حالت جریان توسعه یافته در بازه ۰/۷ تا ۱/۱ تغییر می کند.

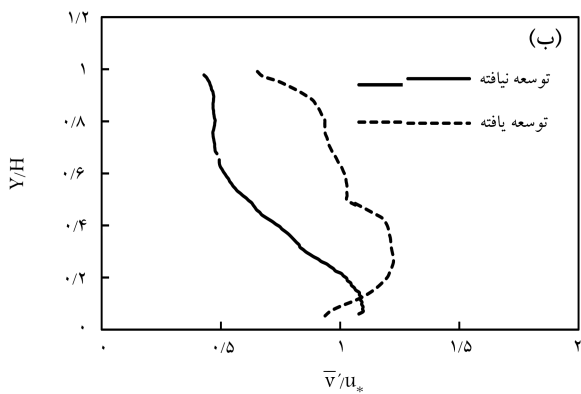
در کانال مرکب توسعه یافته به دلیل گزاردان شدید سرعت بین مقطع اصلی و سیلاب دشت و شکل گیری جریان های ثانویه در اطراف ناحیه اندرکنش (شکل ۴- ب)، تغییرات پارامترهای آشفتگی جریان (مانند شدت آشفتگی عرضی) در راستای عرض کانال بسیار شدید است و این تغییرات در ناحیه اندرکنش به حداکثر مقدار خود می رسد. عدم تغییر شدت آشفتگی عرضی در عرض سیلاب دشت در حالت جریان توسعه یافته با تحقیقات دیگر پژوهشگران (با عمق نسبی ۰/۲۵) سازگاری ندارد.^[۳۷،۳۱] که



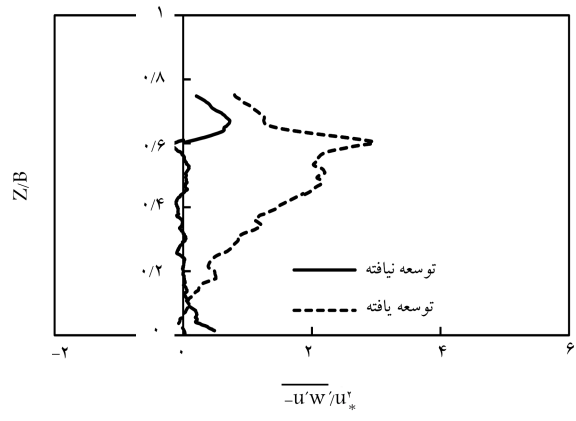
الف) شدت آشفتگی طولی در صفحه ی عمودی به فاصله ی ۷۰ cm از دیواره ی سیلاب دشت؛



الف) با فاصله ی ۱۶ cm از کف کانال اصلی؛



ب) شدت آشفتگی قائم در صفحه عمودی به فاصله ی ۸۰ cm از دیواره ی سیلاب دشت.



ب) با فاصله ی ۱۹ cm از کف کانال اصلی.

شکل ۹. پروفیل عمقی شدت آشفتگی در حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته.

در شکل ۹ - ب نیز مقادیر بی بعد شدت آشفتگی قائم ($\overline{v'}$) برای دو حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه ی عمودی با فاصله ی ۸۰ سانتی متر از دیواره ی سیلاب دشت نشان داده شده است. شدت آشفتگی قائم با استفاده از رابطه ی $\overline{v'} = \sqrt{\overline{v'^2}}$ به دست می آید که در آن $\overline{v'}$ نوسان مؤلفه ی عمودی سرعت جریان است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود مقادیر شدت آشفتگی قائم در جریان توسعه یافته به طور قابل توجهی بیشتر از جریان توسعه نیافته است. به بیان دقیق تر در صفحه ی عمودی با فاصله ی ۸۰ سانتی متر از دیواره ی سیلاب دشت، شدت آشفتگی قائم به طور متوسط در حالت جریان توسعه یافته حدود ۶۱ درصد بیشتر از جریان توسعه نیافته است. همان طور که گفته شد این پدیده به دلیل اندرکنش شدید بین سیلاب دشت و کانال اصلی و در نتیجه افزایش شدت آشفتگی قائم در کانال مرکب با ورودی اصلاح نشده رخ داده است.

در شکل ۱۰ پروفیل مقادیر $-\overline{u'v'}/u_*^2$ برای جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه ی عمودی با فاصله ی ۸۰ سانتی متر از دیواره سیلاب دشت نشان داده شده است.

چنان که در این شکل نیز مشاهده می شود مقادیر بی بعد تنش برشی رینولدز قائم در حالت جریان توسعه یافته به طور قابل توجهی بیشتر از جریان توسعه نیافته است که این پدیده به دلیل اندرکنش شدید در کانال مرکب با جریان توسعه یافته است. این پدیده با نتایج مرجع [۲۱] همخوانی دارد. با دقت در شکل ۱۰ می توان دریافت که بیشینه مقدار $-\overline{u'v'}/u_*^2$ در حالت جریان توسعه یافته در نزدیکی بستر رخ می دهد که این رفتار در کانال های مستطیلی ساده قابل مشاهده است. [۳۸، ۳۳]

شکل ۸. پروفیل مقادیر $\overline{u'w'}/u_*^2$ در راستای عرض کانال در حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه ی افقی.

خصوص کانال مرکب گزارش شده است [۳۷، ۳۲] که ناشی از انتقال مومنت شدید بین کانال اصلی و سیلاب دشت است.

با دقت در شکل ۸ می توان دریافت که بیشینه ی مقادیر $-\overline{u'w'}$ در حالت توسعه یافته در عرض نسبی حدود ۰/۶ رخ می دهد، در حالی که در حالت توسعه نیافته در عرض نسبی تقریبی ۰/۶۵ واقع می شود. این پدیده یعنی جابه جایی مقادیر بالای $-\overline{u'w'}$ از ناحیه ی اندرکنش به کانال اصلی با نتایج مرجع [۲۱] همخوانی دارد.

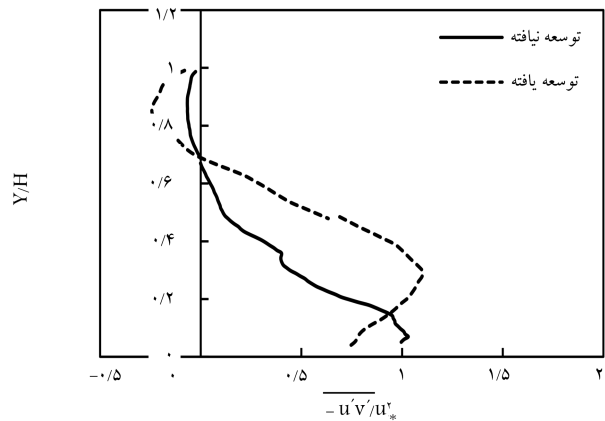
در شکل ۹ - الف مقادیر شدت آشفتگی طولی ($\overline{u'}$) به صورت بی بعد برای جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه ی عمودی با فاصله ی ۷۰ سانتی متر از دیواره ی سیلاب دشت نشان داده شده است. شدت آشفتگی طولی با استفاده از رابطه ی $\overline{u'} = \sqrt{\overline{u'^2}}$ به دست می آید که در آن $\overline{u'}$ نوسان مؤلفه ی طولی سرعت جریان است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود مقادیر شدت آشفتگی طولی در حالت جریان توسعه یافته به طور قابل توجهی بیشتر از جریان توسعه نیافته است. به بیان دقیق تر در صفحه ی عمودی با فاصله ی ۷۰ سانتی متر از دیواره سیلاب دشت، شدت آشفتگی طولی به طور متوسط در حالت جریان توسعه یافته حدود ۴۸ درصد بیشتر از جریان توسعه نیافته است. این پدیده به دلیل اندرکنش شدید بین سیلاب دشت و کانال اصلی و در نتیجه افزایش شدت آشفتگی طولی در کانال مرکب با جریان توسعه یافته رخ داده است. در حالی که در شرایط جریان توسعه یافته، به دلیل طول کم کانال مرکب و عدم تشکیل گردابه ها در ناحیه ی اندرکنش، مقادیر شدت آشفتگی طولی در اطراف این ناحیه کم تر است.

مستطیلی مرکب به بررسی اثر شرایط ورودی در توسعه یافتگی جریان پرداخته شد. بر اساس مشاهدات، موارد زیر قابل اشاره است:

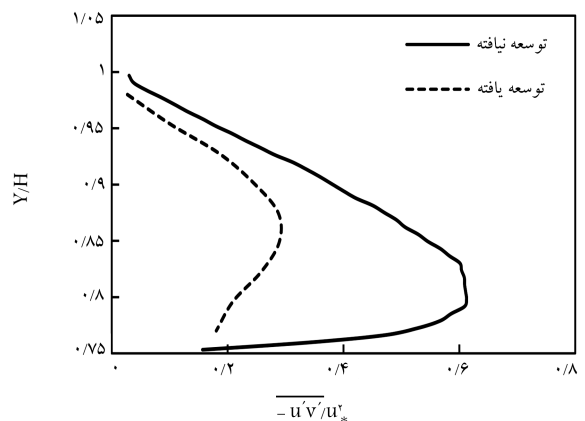
- در حالت جریان توسعه نیافته، به دلیل طول کوتاه کانال مرکب، انتقال جرم از سیلاب دشت به کانال اصلی وجود دارد. در این حالت محل سرعت بیشینه در کانال اصلی (در نزدیکی ناحیه اندرکنش) به طور قابل توجهی پایین تر از نقاط گزارش شده در کانال مرکب است و این پدیده می تواند میدان جریان را در کانال مرکب کاملاً تحت تأثیر خود قرار دهد؛
- در حالت وقوع انتقال جرم عرضی (جریان توسعه نیافته)، سرعت طولی جریان در عرض سیلاب دشت تقریباً یکنواخت است، در حالی که در شرایط عدم وقوع انتقال جرم (جریان توسعه یافته)، سرعت طولی جریان در عرض سیلاب دشت تغییر قابل ملاحظه‌ای دارد؛
- در حالت جریان توسعه نیافته، الگوی جریان و آشفتگی در سیلاب دشت و در نواحی دور از ناحیه اندرکنش و دور از دیواره‌ی سیلاب دشت، با کانال مستطیلی ساده مشابهت دارد. پروفیل شدت آشفتگی و همچنین تنش برشی رینولدز در راستای عمق سیلاب دشت، مشابه کانال مستطیلی بوده و بیشینه‌ی آن‌ها در نزدیکی کف رخ می دهند و با نزدیک شدن به سمت سطح آزاد، کاهش می یابند؛
- شدت آشفتگی و تنش برشی رینولدز قائم در کانال اصلی (در اطراف ناحیه اندرکنش) در حالت جریان توسعه یافته بیشتر از جریان توسعه نیافته است که این نشان از اندرکنش شدیدتر در حالت جریان توسعه یافته است.

فهرست علائم

- B : عرض کانال مرکب؛
 g : شتاب گرانش؛
 H : عمق جریان در کانال اصلی؛
 R : شعاع هیدرولیکی؛
 S_f : شیب خط انرژی؛
 \bar{u} : سرعت طولی متوسط؛
 u^+ : سرعت طولی متوسط بی بعد؛
 u_* : سرعت برشی مقطع؛
 u_{*b} : سرعت برشی کف؛
 u' : نوسان مؤلفه طولی سرعت جریان؛
 $\overline{u'^2}$: شدت آشفتگی طولی؛
 $-\overline{u'v'}$: همبستگی مؤلفه‌های نوسانی طولی و قائم سرعت؛
 $-\overline{u'w'}$: همبستگی مؤلفه‌های نوسانی طولی و عرضی سرعت؛
 v' : نوسان مؤلفه قائم سرعت جریان؛
 w' : نوسان مؤلفه عرضی سرعت جریان؛
 $\overline{w'^2}$: شدت آشفتگی عرضی؛
 y : عمق جریان؛
 y^+ : عمق جریان بی بعد؛
 ρ : چگالی سیال (آب)؛
 ν : لزجت سینماتیکی سیال (آب).



شکل ۱۰. پروفیل عمقی مقادیر $-\overline{u'v'}/u_*^2$ در صفحه‌ی عمودی با فاصله‌ی ۸۰ سانتی متر از دیواره‌ی سیلاب دشت در حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته.



شکل ۱۱. پروفیل عمقی مقادیر $-\overline{u'v'}/u_*^2$ در صفحه‌ی عمودی با فاصله‌ی ۴۰ سانتی متر از دیواره‌ی سیلاب دشت در حالت جریان توسعه یافته و توسعه نیافته.

حالی که در حالت جریان توسعه یافته به واسطه‌ی گردابه‌های واقع در نزدیکی بستر، بیشینه‌ی مقدار پروفیل در فاصله‌ی 0.3 عمق جریان از کف کانال اصلی رخ می دهد. در نهایت در شکل ۱۱ پروفیل مقادیر $-\overline{u'v'}/u_*^2$ برای جریان توسعه یافته و توسعه نیافته در صفحه‌ی عمودی با فاصله‌ی ۴۰ سانتی متر از دیواره‌ی سیلاب دشت (در محدوده سیلاب دشت) ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود مقادیر بی بعد تنش برشی رینولدز قائم در حالت جریان توسعه یافته بیشتر از توسعه یافته است که بر اساس فرضیه بوزینسک، این پدیده به دلیل تغییرات بیشتر سرعت متوسط طولی جریان در راستای عمق سیلاب دشت در حالت جریان توسعه نیافته نسبت به جریان توسعه یافته است.

با دقت در شکل ۱۱ می توان دریافت که بیشینه‌ی مقدار $-\overline{u'v'}/u_*^2$ در حالت جریان توسعه یافته در نزدیکی بستر رخ می دهد که این رفتار در کانال‌های مستطیلی ساده قابل مشاهده است. [۳۸، ۲۳] این در حالی است که در حالت جریان توسعه یافته، بیشینه‌ی پروفیل با فاصله از کف کانال اصلی رخ می دهد.

۴. نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر به کمک روش سرعت سنجی تصویری ذرات در یک کانال

1. particle image velocimetry (PIV)
2. pliolite
3. velocity dip

منابع (References)

1. Sellin, R.H.J. "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), pp. 793-802 (1964).
2. Cao, Z., Meng, J., Pender, G. and et al. "Flow resistance and momentum flux in compound open channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**(12), pp. 1272-1282 (2006).
3. Knight, D.W. and Shiono, K. "Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel", *Journal of Hydraulic Research*, **28**(2), pp. 175-196 (1990).
4. Van Prooijen, B.C., Battjes, J.A. and Uijtewaal, W.S. "Momentum exchange in straight uniform compound channel flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, **131**(3), pp. 175-183 (2005).
5. Ikeda, S. and McEwan, I.K. eds. *Flow and Sediment Transport in Compound Channels: the Experience of Japanese and UK Research*, CRC Press (2009).
6. Shiono, K. and Muto, Y. "Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow", *Journal of Fluid Mechanics*, **376**, pp. 221-261 (1998).
7. Bousmar, D., Wilkin, N., Jacuemart, J.H. and et al. "Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains", *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(4), pp. 305-312 (2004).
8. Bousmar, D., Proust, S. and Zech, Y. "Experiments on the flow in a enlarging compound channel", *In River Flow 2006: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, 6-8 September 2006* pp. 323-332, Leiden, Netherlands: Taylor and Francis (september 2006).
9. Shiono, K. and Knight, D.W. "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel", *Journal of Fluid Mechanics*, **222**, pp. 617-646 (1991).
10. Czernuszenko, W., Koziol, A. and Rowiński, P.M. "Measurements of 3D turbulence structure in a compound channel", *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, **54**(1), pp. 55-73 (2007).
11. Koziol, A.P. "Three-dimensional turbulence intensity in a compound channel", *Journal of Hydraulic Engineering*, **139**(8), pp. 852-864 (2013).
12. Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. "Calculation of compound-open-channel flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, **119**(12), pp. 1418-1426 (1993).
13. Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. "Hydrodynamic behavior of compound rectangular open channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, **119**(3), pp. 390-408 (1993).
14. Bousmar, D., Riviere, N., Proust, S. and et al. "Upstream discharge distribution in compound-channel flumes". *Journal of Hydraulic Engineering*, **131**(5), pp. 408-412 (2005).
15. Rajaratnam, N. and Ahmadi, R.M. "Interaction between main channel and flood-plain flows", *Journal of the Hydraulics Division*, **105**(5), pp. 573-588 (1979).
16. Knight, D.W. and Demetriou, J.D. "Flood plain and main channel flow interaction", *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(8), pp. 1073-1092 (1983).
17. Nabipour, M., Salehi Neyshabouri, S. A. A., Mohajeri, S. H. and et al. "Study on turbulent flow in a compound channel with shallow overbank using particle image velocimetry", *Modares Mechanical Engineering*, **17**(8), pp. 164-172 (2017).
18. French, R.H. and French, R.H. "Open-channel hydraulics", New York: McGraw-Hill (p. 705) (1985).
19. Kirkgöz, M.S. and Ardiçlioğlu, M. "Velocity profiles of developing and developed open channel flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, **123**(12), pp. 1099-1105 (1997).
20. Proust, S., Fernandes, J.N., Peltier, Y. and et al. "Turbulent non-uniform flows in straight compound open-channels", *Journal of Hydraulic Research*, **51**(6), pp. 656-667 (2013).
21. Proust, S., Peltier, Y., Fernandes, J. and et al. "Effect of different inlet flow conditions on turbulence in a straight compound open channel", *In Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering*, Brisbane, Australia **26** (June 2011).
22. Proust, S., Fernandes, J.N., Leal, J.B. and et al. "Mixing layer and coherent structures in compound channel flows: Effects of transverse flow, velocity ratio, and vertical confinement", *Water Resources Research*, **53**(4), pp. 3387-3406 (2017).
23. Nezu, I. and Nakagawa, H. "Turbulence in open-channel flows, IAHR monograph series", AA Balkema, Rotterdam, pp. 1-281 (1993).
24. Besio, G., Stocchino, A., Angiolani, S. and et al. "Transversal and longitudinal mixing in compound channels", *Water Resources Research*, **48**(12) (2012).
25. Stocchino, A., Besio, G., Angiolani, S. and et al. "Lagrangian mixing in straight compound channels", *Journal of Fluid Mechanics*, **675**, pp. 168-198 (2011).
26. Nabipour, M., Salehi Neyshabouri, S.A.A., Mohajeri, S.H. and et al. "Study on turbulent flow in a compound channel with shallow overbank using particle image velocimetry", *Modares Mechanical Engineering*, **17**(8), pp. 164-172 (2017).
27. Nabipour, M., Mohajeri, S.H. and Zarrati, A.R. "Effect of side looking acoustic doppler velocimeter (ADV) presence on turbulent flow field in compound channel", *Modares Mechanical Engineering*, **19**(12), pp. 2945-2953 (2019).
28. Wahl, T.L. "Discussion of "Despiking acoustic doppler velocimeter data" by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora", *Journal of Hydraulic Engineering*, **129**(6), pp. 484-487 (2003).

29. Parsheh, M., Sotiropoulos, F. and Porté-Agel, F. "Estimation of power spectra of acoustic-doppler velocimetry data contaminated with intermittent spikes", *Journal of Hydraulic Engineering*, **136**(6), pp. 368-378 (2010).
30. Zhang, X. and Nepf, H.M. "Exchange flow between open water and floating vegetation", *Environmental Fluid Mechanics*, **11**(5), p. 531 (2011).
31. Thielicke, W. and Stamhuis, E. "PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB", *Journal of Open Research Software*, **2**(1) (2014).
32. Tominaga, A. and Nezu, I. "Turbulent structure in compound open-channel flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, **117**(1), pp. 21-41 (1991).
33. Benedict, L.H. and Gould, R.D. "Towards better uncertainty estimates for turbulence statistics", *Experiments in Fluids*, **22**(2), pp. 129-136 (1996).
34. Sanjou, M., Nezu, I. and Itai, K. "Space-time correlation and momentum exchanges in compound open-channel flow by simultaneous measurements of two-sets of ADVs", *River Flow 2010*, pp. 495-502 (2010).
35. Nezu, I. and Rodi, W. "Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer", *Journal of Hydraulic Engineering*, **112**(5), pp. 335-355 (1986).
36. Stocchino, A. and Brocchini, M. "Horizontal mixing of quasi-uniform straight compound channel flows", *Journal of Fluid Mechanics*, **643**, p. 425 (2010).
37. Kara, S., Stoesser, T. and Sturm, T.W. "Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows", *Journal of Hydraulic Research*, **50**(5), pp. 482-493 (2012).
38. Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and et al. "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows", *Journal of Hydraulic Research*, **27**(1), pp. 149-173 (1989).