

## ساختار جریان و آشفته‌گی در آبراهه‌های مرکب تحت تأثیر پوشش گیاهی صلب سیلاب‌دشت

حسین حمیدی‌فر، محمدحسین امید\* و علیرضا کشاورزی\*\*

\* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، خیابان دانشکده، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۳۲۲۴۱۱۱۹ (۰۲۶)، پیام‌نگار: momid@ut.ac.ir

\*\* به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران؛ و استاد بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۲۵

### چکیده

آگاهی از هیدرولیک جریان در آبراهه‌های مرکب با دشت سیلابی پوشیده از گیاه در تعیین رابطه دبی-اشل و همچنین انتقال رسوب و آلاینده‌ها اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی ساختار جریان متوسط و پارامترهای جریان آشفته در یک کانال مرکب مستقیم منشوری پرداخته شده است. آزمایش‌ها در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی صلب در دشت سیلابی و در سه عمق نسبی مختلف اجرا و نتایج مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که پوشش گیاهی تأثیر چشمگیری بر مشخصات جریان از قبیل مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان متوسط و همچنین تنش‌های رینولدز دارد. به ازای یک عمق نسبی معین و در محدوده آزمایش‌های این تحقیق، مشاهده گردید که ظرفیت انتقال جریان در حضور پوشش گیاهی دشت سیلابی، نسبت به شرایط فقدان پوشش گیاهی، تا ۳۱ درصد کمتر است. سرعت جریان متوسط اگرچه تغییرات عرضی زیادی در کانال اصلی دارد اما روی دشت سیلابی پوشیده از گیاه، تقریباً ثابت است. همچنین، جریان‌های ثانویه قوی و انتقال مومنتوم بین کانال اصلی و دشت سیلابی منجر به ایجاد گرادیان شدید در منحنی توزیع سرعت جریان متوسط، تنش برشی و انرژی جنبشی جریان آشفته در مرز مشترک کانال اصلی و دشت سیلابی می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

پوشش گیاهی صلب، جریان آشفته، ساختار جریان، سرعت‌سنج صوتی داپلر، کانال مرکب

### مقدمه

بین کانال اصلی و دشت سیلابی مجاور آن، منجر به کاهش دبی در کانال اصلی و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال جریان آبراهه می‌شود (Yang et al., 2007). وجه تمایز اصلی مقاطع مرکب با مقاطع ساده نیز ناشی از اندرکنش کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌هاست. از این رو به کارگیری روابط متعارف هیدرولیکی مربوط به کانال‌های ساده در کانال‌های مرکب به بروز خطاهایی بعضاً قابل توجه می‌انجامد. در نتیجه،

هیدرولیک جریان در آبراهه‌های با مقطع مرکب تا اندازه زیادی متفاوت از کانال‌های با مقطع ساده است. در دبی‌های زیاد، جریان در کانال اصلی لبریز و به دشت(های) سیلابی وارد می‌شود. به نظر می‌رسد که در اثر تغییر شکل مقطع جریان و به دلیل تفاوت در زبری کانال اصلی و دشت سیلابی، ساختار جریان در مقاطع مرکب بسیار پیچیده باشد. انتقال مومنتوم

مشاهده کرد که افزایش تراکم پوشش گیاهی منجر به تداخل گردابه‌های پشت میله‌ها و ایجاد جریان برشی قوی و همچنین مؤلفه عمودی سرعت جریان می‌شود که به طور بسیار معنادار شدت آشفتگی‌های عمودی و افقی را افزایش می‌دهد. یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2007) نیز تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت را بر ساختار جریان در مقاطع مرکب بررسی کردند. نتایج تحقیقات این محققان بر روی سه نوع پوشش گیاهی مختلف نشان می‌دهد که حضور هر سه نوع پوشش گیاهی منجر به کاهش سرعت جریان در دشت سیلابی می‌شود. در حضور پوشش گیاهی، گرادیان عرضی سرعت جریان در سیلاب‌دشت و همچنین تنش برشی ظاهری در سطح مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد. در حالی که در نبود پوشش گیاهی، پروفیل عمقی سرعت جریان به صورت لگاریتمی و در حضور پوشش گیاهی به صورت S- شکل است.

بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که در مقاطع مرکب، نیم‌رخ سرعت جریان فقط در نواحی نزدیک بستر از توزیع لگاریتمی پیروی می‌کند (Yang *et al.*, 2007; Hamidifar & Omid, 2012).

ساختار جریان متوسط و همچنین مشخصه‌های آشفتگی از مسائل مهم هستند که در پدیده‌های انتقال رسوب و یا آلاینده‌ها در مقاطع مرکب اهمیت دارند. مطالعات بسیاری درباره چگونگی توزیع سرعت جریان متوسط عمقی و همچنین تنش برشی بستر در کانال‌های مرکب انجام شده است؛ این مطالعات عمدتاً با استفاده از روش‌هایی مانند لوله پرستون برای اندازه‌گیری تنش برشی و لوله پیتو یا میکرومولینه برای اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان صورت پذیرفته‌اند (Rajaratnam & Ahmadi, 1981; Knight & Hamed, 1984; Shiono & Knight, 1991; Tominaga & Nezu, 1997; Ayyoubzadeh, 1991). در مواردی مانند مقاطع

بررسی هیدرولیک این مقاطع از چند دهه قبل آغاز شده است و همچنان ادامه دارد.

با وجود این‌که در گذشته پوشش گیاهی سیلاب‌دشت‌ها برای کاهش مقاومت در مقابل جریان و افزایش ظرفیت انتقال از مسیر جریان حذف می‌گردید، امروزه به منظور بهبود کیفیت آب و افزایش پایداری آبراهه و همچنین تغییر الگوی جریان، نه تنها پوشش گیاهی حذف نمی‌شود بلکه گیاهان در مسیر جریان کاشته می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ریشه گیاهان پایداری مکانیکی آبراهه و سواحل را افزایش می‌دهد (Abernethy & Rutherford, 1998; Simon & Collison, 2002). همچنین، پوشش گیاهی با کاستن از سرعت جریان در نزدیکی بستر، میزان فرسایش را پایین می‌آورد و میزان رسوب‌گذاری در سیلاب‌دشت‌ها را افزایش می‌دهد (Abernethy & Rutherford, 1998; Mars *et al.*, 1999; Pollen & Simon, 2005; Tanaka, 2009). گیاهان موجود در نزدیکی ساحل رودخانه می‌توانند با استهلاک انرژی امواج، قبل از برخورد آن‌ها با جداره‌های فرسایش‌پذیر، از فرسایش دیواره‌ها جلوگیری کنند (Othman, 1994; Massel *et al.*, 1999). به طور معمول، گیاهان موجود در سیلاب‌دشت بزرگ‌تر از گیاهان کانال اصلی (در صورت وجود) بوده و تأثیر آن‌ها بر هیدرولیک جریان قابل توجه است. علت این امر رشد گیاهان و رسوب مواد واریزه‌ای است که این عوامل ممکن است ضریب زبری را بالا برد (Maghrebi & Heidarbeigi, 2009). همچنین، مقدار نیروی دراگ ناشی از حضور پوشش گیاهی در مسیر جریان، در مقایسه با مقاومت جدار، بسیار بزرگ‌تر است (Kadlec, 1990).

زاویستوسکی (Zavistoski, 1994) با بررسی پروفیل‌های سرعت جریان و آشفتگی در بین‌المان‌های چوبی که نقش پوشش گیاهی را شبیه‌سازی می‌کردند،

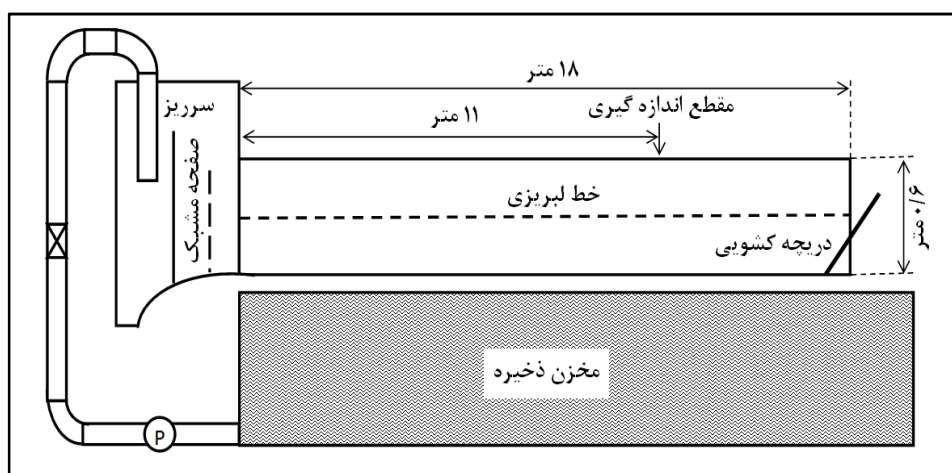
۱۸، عرض ۰/۹ و ارتفاع ۰/۶ متر اجرا شده است. جریان به وسیله یک سرریز مثلثی لبه تیز واسنجی شده اندازه‌گیری شد. برای تنظیم عمق جریان و برقراری جریان یکنواخت، از یک دریچه انتهایی استفاده شد (شکل ۱). به منظور ایجاد مقطع مرکب، با استفاده از صفحات پلکسی‌گلاس یک پله به عرض ۴۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در مقطع عرضی کانال احداث شد. بنابراین، مقطع مرکب مورد نظر از نوع مقاطع مستطیلی نامتقارن است. شیب طولی بستر کانال اصلی و دشت سیلابی ثابت و مقدار آن بر اساس محدودیت‌های آزمایشگاهی برابر با ۰/۰۰۰۹ تنظیم شد.

دیواره‌های جانبی و کف سیلاب‌دشت به ترتیب به صورت عمودی و افقی هستند و نسبت عرض دشت سیلابی به عرض آبراهه اصلی ثابت و برابر یک در نظر گرفته شد. به منظور افزایش دقت در برقراری جریان یکنواخت، در طول فلوم و به فواصل یک متر از یکدیگر، پیژومترهایی در دیواره فلوم نصب شد تا امکان قرائت تراز سطح آب فراهم شود. با توجه به محدودیت‌های فلوم آزمایشگاهی، سه عمق نسبی (نسبت عمق جریان در دشت سیلابی به عمق جریان در کانال اصلی) برابر با ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ مورد بررسی قرار گرفت.

مرکب که جریان کاملاً سه-بعدی است، روشن است که استفاده از این روش‌ها، که ذاتاً برای جریان‌های دو-بعدی ارائه شده‌اند، با چالش روبه‌روست (Yang et al., 2010). با توسعه روزافزون تکنولوژی، این امکان به وجود آمده که از وسایل پیشرفته‌تری برای تعیین ساختار جریان و آشفتگی بهره گرفته شود. سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV) یکی از دستگاه‌هایی است که محققان هیدرولیک برای اندازه‌گیری نوسانات لحظه‌ای سرعت جریان به طور گسترده به کار گرفته‌اند. در این تحقیق نیز با کمک یک دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر، ساختار جریان و آشفتگی در یک کانال مرکب نامتقارن به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. همچنین، تأثیر پوشش گیاهی دشت سیلابی بر مشخصه‌های جریان و آشفتگی از قبیل سرعت‌های متوسط طولی، عرضی و عمقی، تنش‌های رینولدز و شدت آشفتگی مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران و با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی به طول



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر

اعماق بالاتر، این فاصله به ۲/۰ سانتی‌متر افزایش داده شد. از آن‌جا که جریان در اطراف هر پایه پوشش گیاهی متغیر است، بررسی دقیق میدان جریان به یک شبکه‌بندی بسیار ریز از نقاط اندازه‌گیری سرعت جریان، که کاری بسیار زمان‌بر است، نیازمند می‌باشد. بنابراین، پیش از اجرای آزمایش‌های این تحقیق، الگوی جریان روی سیلاب‌دشت با پوشش گیاهی تعیین شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که چنانچه مقادیر سرعت جریان در فاصله ۰/۷۵ برابر فاصله طولی بین ردیف‌های پوشش گیاهی و در وسط دو پایه مجاور در راستای عرضی اندازه‌گیری شود، نتایج می‌تواند نماینده جریان متوسط درون پوشش گیاهی باشد. به منظور حذف داده‌های با کیفیت پایین، از نرم‌افزار WinADV استفاده شد. همچنین داده‌ها با کمک نرم‌افزار متلب (MATLAB R2010a) تجزیه و تحلیل شدند.

### نتایج و بحث

در شکل ۲ خطوط هم‌تراز متوسط مؤلفه طولی سرعت جریان نشان داده شده است. یادآوری می‌شود که در آزمایش با عمق نسبی برابر ۰/۱۵، به علت کم بودن عمق جریان روی دشت سیلابی، مؤلفه عمقی سرعت جریان فقط در ناحیه نزدیک به بستر قابل اندازه‌گیری بود. به ازای یک مقدار مشخص عمق نسبی، مشاهده می‌شود که پوشش گیاهی دشت سیلابی منجر به کاهش شدید سرعت جریان بر روی دشت سیلابی گردیده است. همچنین مقدار مطلق سرعت جریان در کانال اصلی نیز در حالت بدون پوشش گیاهی بسیار بزرگ‌تر از مقدار متناظر برای حالت با پوشش گیاهی است. یکی از دلایل می‌تواند حضور پوشش گیاهی باشد که باعث افزایش مقاومت جریان و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال توسط کانال گردیده است. به عبارت دیگر، به ازای یک عمق نسبی معین، مقادیر دبی در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی متفاوت هستند که در جدول ۱ آورده شده‌اند. همچنین،

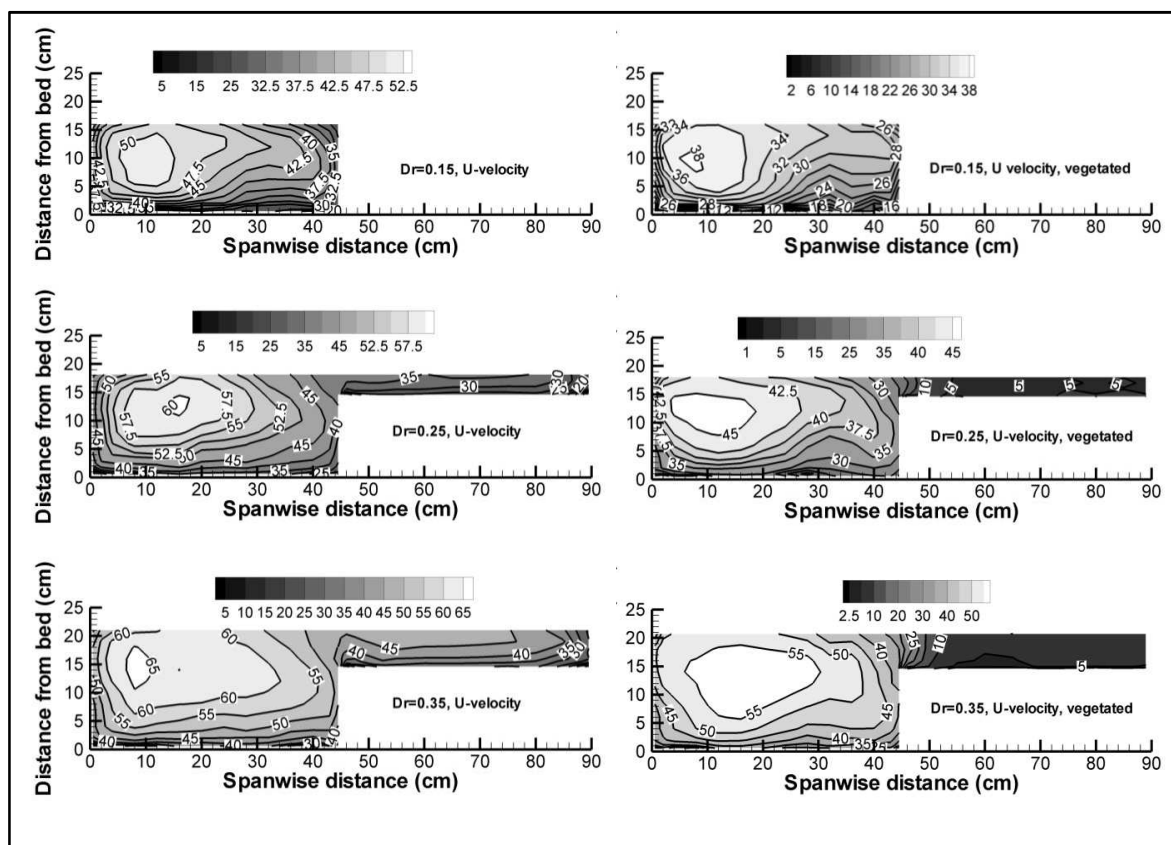
سری اول آزمایش‌ها در حالت بدون پوشش گیاهی روی دشت سیلابی اجرا شد. در سری دوم آزمایش‌ها، به منظور بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر ساختار جریان و آشفتگی، از استوانه‌های پی‌وی‌سی با قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر به عنوان پوشش گیاهی صلب استفاده گردید. آرایش پوشش گیاهی به صورت ردیفی در نظر گرفته شد. بدین منظور در رئوس شبکه مربعی، به فواصل ۵/۰ سانتی‌متر سوراخ‌هایی به قطر ۱/۰ سانتی‌متر در سیلاب‌دشت ایجاد شد که بر این اساس تراکم پوشش گیاهی برابر ۳/۱۴ درصد معادل با ۴۰۰ المان در مترمربع خواهد بود. میزان تراکم انتخاب شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در طبیعت توسط محققان پیشین (Nepf et al., 1997)، هم‌خوانی دارد.

مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان لحظه‌ای با دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV)، با سنجنده جانبی (Vectrino<sup>+</sup> side looking) و در فاصله ۱۱ متری از ابتدای فلوم، اندازه‌گیری شدند. مدت زمان اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت جریان در هر نقطه، ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. فرکانس اندازه‌گیری نیز برابر ۱۰۰ هرتز انتخاب شد. بنابراین در هر نقطه، ۱۲۰۰۰ قرائت سرعت جریان انجام گردید که امکان تعیین ساختار جریان و آشفتگی را با دقت زیاد فراهم می‌آورد.

برای برداشت سرعت جریان، چهارده پروفیل عمقی در کانال اصلی و چهارده پروفیل روی دشت سیلابی در نظر گرفته شدند. فاصله بین پروفیل‌ها در نقاط نزدیک به دیواره و همچنین در محل تقاطع کانال اصلی و دشت سیلابی برابر ۰/۵ سانتی‌متر و در میانه‌های کانال اصلی و دشت سیلابی ۵/۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر پروفیل عمقی، اندازه‌گیری‌ها در اعماق مختلف انجام شدند. در نزدیک کف و دیواره‌های کانال اصلی و دشت سیلابی، از شبکه مترکم‌تری (به فواصل ۰/۵ سانتی‌متر) استفاده شد تا ساختار جریان با دقت بالا تعیین شود. در

سیلابی و کانال اصلی کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش عمق نسبی، تأثیر پوشش گیاهی بر میزان کاهش ظرفیت انتقال جریان توسط کانال کاهش می‌یابد.

در این جدول میزان کاهش ظرفیت انتقال جریان توسط کانال (بر حسب درصد) تحت تأثیر پوشش گیاهی دشت سیلابی آمده است. واضح است که با افزایش عمق نسبی، شدت اندرکنش جریان بین دشت



شکل ۲- خطوط هم‌تراز متوسط مؤلفه طولی سرعت جریان ( $U$ ) به ازای اعماق نسبی مختلف سمت چپ: دشت سیلابی بدون پوشش گیاهی و سمت راست: دشت سیلابی پوشیده از گیاه

جدول ۱- تأثیر پوشش گیاهی دشت سیلابی بر ظرفیت انتقال جریان در آبراهه

میزان کاهش دبی (درصد)	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)		عمق نسبی
	با پوشش گیاهی	بدون پوشش گیاهی	
۳۱/۱	۰/۰۲۱۴	۰/۰۳۱۱	۰/۱۵
۲۸/۹	۰/۰۳۰۷	۰/۰۴۳۲	۰/۲۵
۲۱/۶	۰/۰۴۴۵	۰/۰۵۶۷	۰/۳۵

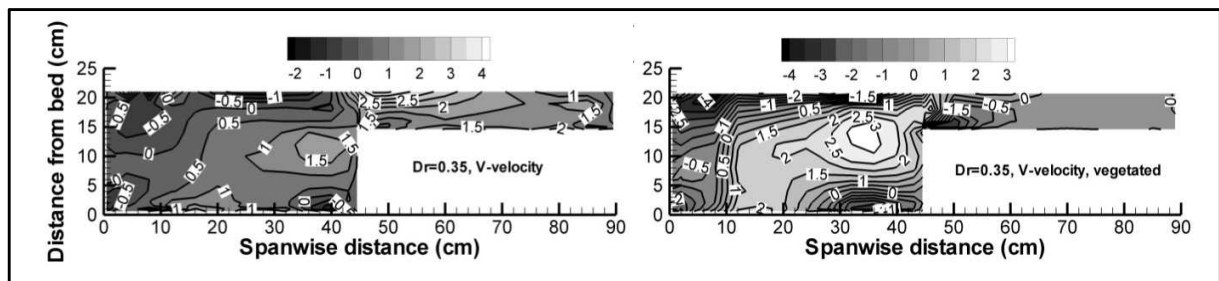
دو- بعدی است در حالی که در کانال اصلی و به ویژه در اعماق نسبی پایین، جریان سه- بعدی است. همچنین، حداکثر سرعت جریان در نزدیکی دیواره بیرونی کانال

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که به استثنای نواحی نزدیک به جدار و همچنین در مرز مشترک کانال اصلی و دشت سیلابی، جریان روی دشت سیلابی تقریباً

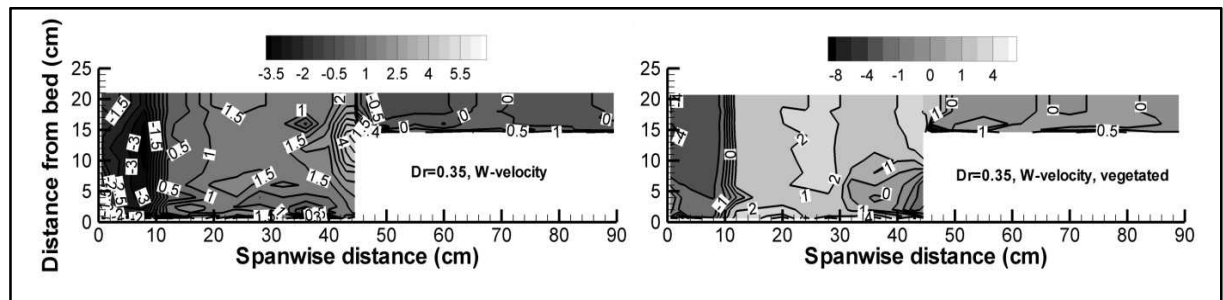
تغییرات مؤلفه‌های عرضی و عمقی سرعت جریان به ازای عمق نسبی ۰/۳۵ به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. واضح است که در حالت حضور پوشش گیاهی، تغییرات این مؤلفه‌ها روی دشت سیلابی بسیار کمتر شده است.

در آزمایش‌های بدون پوشش گیاهی، در نزدیکی لبه مرز مشترک دشت سیلابی و کانال اصلی گرادیان شدیدی از مؤلفه‌های عرضی و عمقی سرعت جریان مشاهده می‌شود که حاکی از جریان‌های ثانویه شدید در این ناحیه است. همچنین، فرار گرفتن نقاط حداکثر و حداقل مؤلفه‌های عرضی و عمقی سرعت جریان با علامت‌های مخالف یکدیگر در کانال اصلی بیانگر آن است که در این نواحی نیز جریان‌های ثانویه بسیار شدید است؛ در حضور پوشش گیاهی، شدت این جریان‌ها در کانال اصلی افزایش می‌یابد که در شکل ۵ قابل مشاهده است.

اصلی اتفاق می‌افتد. در حضور پوشش گیاهی، موقعیت حداکثر سرعت جریان با افزایش عمق نسبی به سمت میانه کانال اصلی جابه‌جا می‌شود. در نزدیکی مرز مشترک دشت سیلابی و کانال اصلی، یک برآمدگی در خطوط هم‌سرعت جریان مشاهده می‌شود که در تحقیقات قبلی نیز وجود این برآمدگی گزارش شده است (Lai & Knight, 1988; Tominaga & Nezu, 1991; Thomas & Williams, 1995; Joung & Choi, 2008; Bijad *et al.*, 2010). این کاهش سرعت جریان ممکن است ناشی از انتقال جریان با مومنتوم کم به وسیله جریان‌های ثانویه از لایه‌های پایینی جریان باشد که شیونو و نایت (Shiono & Knight, 1991) آن را تشخیص داده‌اند. نکته جالب توجه دیگر در شکل ۲ وقوع موقعیت حداکثر سرعت جریان در فاصله نسبتاً زیادی از سطح آب است که می‌تواند به علت جریان‌های ثانویه شدیدی که در مقطع عرضی کانال اتفاق می‌افتند، باشد.



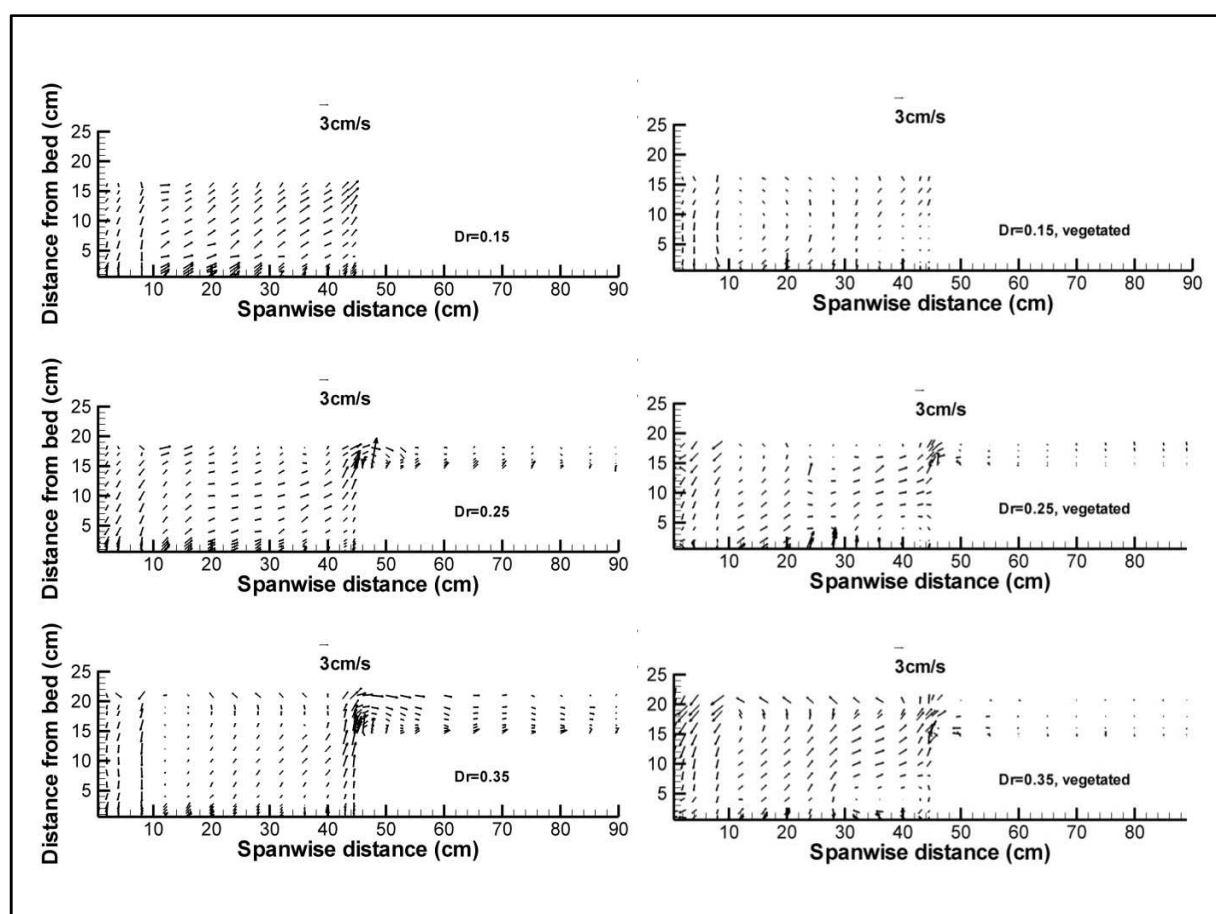
شکل ۳- خطوط هم‌تراز متوسط مؤلفه عرضی سرعت جریان (V) به ازای عمق نسبی ۰/۳۵  
سمت چپ: دشت سیلابی بدون پوشش گیاهی و سمت راست: دشت سیلابی پوشیده از گیاه



شکل ۴- خطوط هم‌تراز متوسط مؤلفه عمقی سرعت جریان (W) به ازای عمق نسبی ۰/۳۵  
سمت چپ: دشت سیلابی بدون پوشش گیاهی و سمت راست: دشت سیلابی پوشیده از گیاه

شکل می‌گیرد که در آزمایش‌های بدون پوشش گیاهی مشاهده نشد. همچنین، در ابتدای دشت سیلابی یک گردابه قابل مشاهده است. میزان گسترش این گردابه روی دشت سیلابی به نسبت عرض به عمق کانال مرکب بستگی دارد (Joung & Choi, 2008).

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در کانال اصلی در مجاورت مرز مشترک با دشت سیلابی، یک جریان رو به بالا وجود دارد در حالی که در دیواره دورتر از دشت سیلابی یک جریان رو به پایین شکل گرفته است. در آزمایش‌های در حضور پوشش گیاهی، در ناحیه پایینی جریان در مجاورت مرز مشترک، گردابه‌ای



شکل ۵- بردارهای جریان های ثانویه به ازای اعماق نسبی مختلف

سمت چپ: دشت سیلابی بدون پوشش گیاهی و سمت راست: دشت سیلابی پوشیده از گیاه

است. این اختلاف سرعت جریان، منجر به ایجاد جریان برشی قوی در مرز مشترک کانال اصلی و دشت سیلابی می‌شود که به نوبه خود بر پدیده‌هایی همچون انتقال آلاینده‌ها در مقاطع مرکب بسیار تأثیرگذار است. از طرفی دیگر، در حضور پوشش گیاهی، اختلاف سرعت جریان بین

تغییرات عرضی سرعت جریان متوسط طولی میانگین‌گیری شده در عمق، در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای مقداری مشخص از عمق نسبی، مقادیر سرعت جریان متوسط در کانال اصلی همواره از سرعت جریان متوسط در دشت سیلابی بزرگ‌تر

جریان قابل توجهی بین کانال اصلی و دشت سیلابی مشاهده می‌شود که حاکی از تأثیرات زیاد پوشش گیاهی دشت سیلابی بر هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب است. در آزمایش‌های با پوشش گیاهی، با فاصله گرفتن از دیواره کانال اصلی به سمت دیواره دشت سیلابی، پروفیل سرعت جریان روند کاهشی دنبال می‌کند، در حالی که در آزمایش‌های بدون پوشش گیاهی، پروفیل سرعت جریان در مرز مشترک کانال اصلی و دشت سیلابی دارای یک حداقل موضعی است. این کاهش موضعی سرعت جریان می‌تواند به علت جریان‌های ثانویه قوی در این ناحیه باشد. تغییرات عرضی تنش برشی وارد بر کف در شکل ۷ نشان داده شده است. تنش برشی بستر ( $\tau_0$ ) از رابطه ۱ محاسبه شده است:

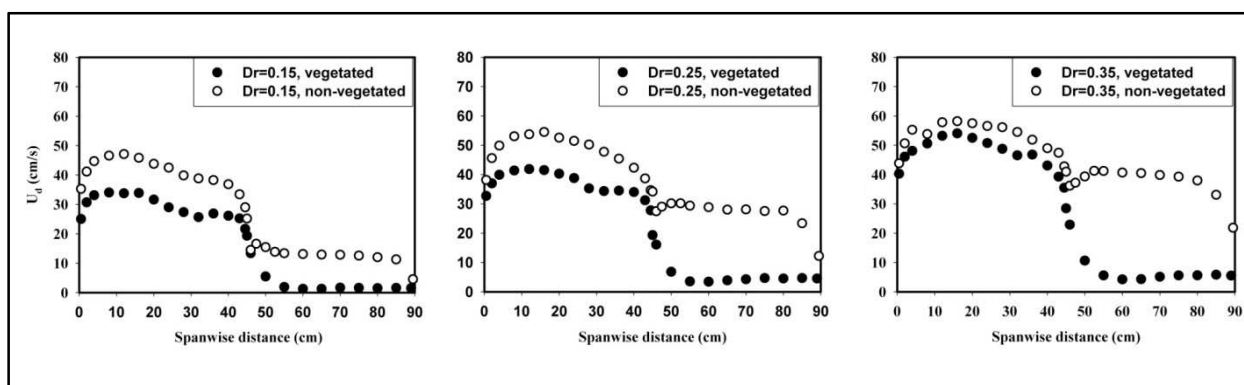
$$\tau_0 = -\rho \overline{u'w'} \quad (1)$$

که در آن،

$\rho$  = جرم مخصوص آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب؛  $u'$  و  $w'$  به ترتیب نوسانات زمانی مولفه‌های طولی و عمقی سرعت جریان در مجاورت بستر بر حسب متر بر ثانیه؛ و علامت بار ( $\bar{\quad}$ ) نشان‌دهنده متوسط زمانی است.

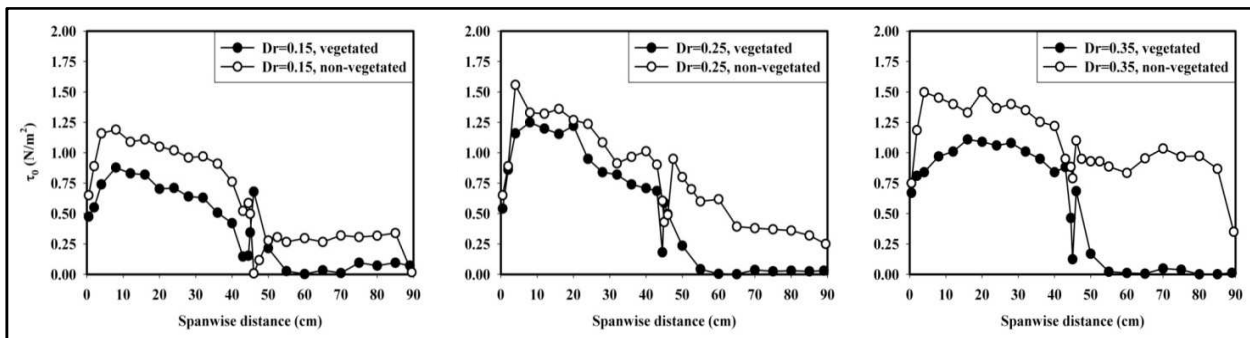
کانال اصلی و دشت سیلابی بیشتر می‌شود و بنابراین بر پخش عرضی و انتشار طولی آلاینده‌ها مؤثر خواهد بود و این عمل در کانال‌های مرکب با پوشش گیاهی، شدیدتر است. همچنین، مشخص است که سرعت جریان متوسط روی دشت سیلابی نسبتاً ثابت است که نشان می‌دهد می‌توان جریان روی دشت سیلابی را دو-بعدی در نظر گرفت. در هر حال، اثر جریان‌های ثانویه و انتقال مومنوم بر کانال اصلی نسبت به دشت سیلابی بسیار مشهودتر است به گونه‌ای که پروفیل سرعت جریان در عرض کانال بسیار متغیر است.

در مجاورت مرز مشترک دشت سیلابی و کانال اصلی، گرادیان سرعت جریان بسیار زیاد و نامنظم است که حاکی از جریان‌های با مومنوم ضعیف است که به وسیله گردابه‌های عمقی از لایه‌های پایینی جریان به لایه‌های بالاتر منتقل می‌شوند. در آزمایش‌های بدون پوشش گیاهی، با افزایش عمق نسبی، اختلاف سرعت جریان بین کانال اصلی و دشت سیلابی کاهش می‌یابد و رفتار کانال مرکب به کانال ساده نزدیک می‌شود، در حالی که در آزمایش‌های با پوشش گیاهی، حتی در بیشترین مقدار عمق نسبی در محدوده تحقیق حاضر، نیز اختلاف سرعت



شکل ۶- نیم‌رخ عرضی سرعت جریان میانگین‌گیری شده در عمق ( $U_d$ )





شکل ۷- نیم‌رخ عرضی تنش برشی بستر ( $\tau_0$ ) به ازای اعماق نسبی مختلف

مشاهده می‌شود که با اضافه شدن پوشش گیاهی، مقدار تنش برشی روی دشت سیلابی، نسبت به مقدار تنش برشی روی دشت سیلابی صاف، کمتر شده است. یک علت می‌تواند نوع زبری‌های استفاده شده تحقیقات قبل (Tominaga & Nezu, 1991) باشد که متفاوت از پوشش گیاهی تحقیق حاضر بوده و در نتیجه به افزایش آشفتگی در نزدیکی بستر و افزایش تنش برشی انجامیده است. در حالی که پوشش گیاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر منجر به کاهش سرعت جریان متوسط روی دشت سیلابی و کاهش نوسانات سرعت جریان شده و بنابراین تنش برشی نیز کاهش یافته است. البته لازم است یادآوری شود که الگوی جریان در اطراف هر کدام از المان‌های پوشش گیاهی بسیار پیچیده بوده و ممکن است در برخی موارد تنش برشی در اطراف المان‌ها افزایش یابد که برای بررسی دقیق آن به امکانات پیشرفته‌تری نیاز خواهد بود.

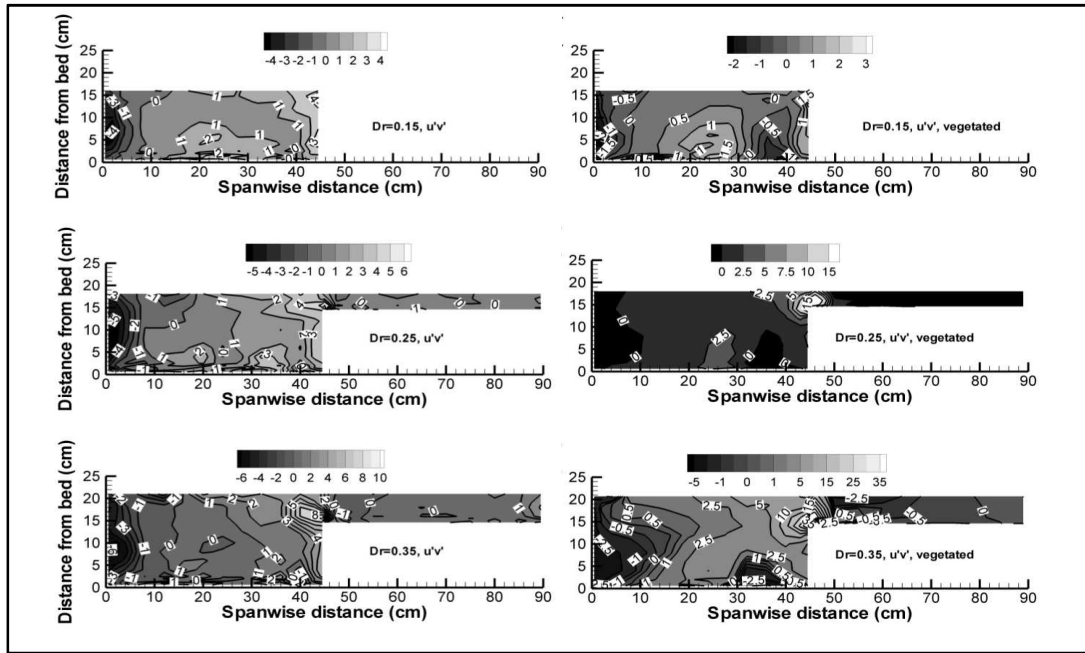
در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز در صفحات  $xy$ ،  $xz$  و  $yz$ ، که به ترتیب برابر  $\overline{u'v'}$ ،  $\overline{u'w'}$  و  $\overline{v'w'}$  هستند، برای اعماق نسبی مختلف و در دو حالت، با و بدون پوشش گیاهی، نشان داده شده است. در این روابط،  $v'$  نوسانات زمانی مؤلفه عرضی سرعت جریان است. با مقایسه شکل‌های ۸ و ۶ مشاهده می‌شود که به طور کلی علامت  $\overline{u'v'}$  با علامت شیب منحنی تغییرات سرعت جریان متوسط ( $du/dy$ ) مرتبط است. بدین صورت که

واضح است که تنش برشی در عرض کانال بسیار متغیر است و بنابراین بر خلاف جریان‌های دو-بعدی که در آن تنش برشی ثابت در نظر گرفته می‌شود، در کانال‌های مرکب این فرض می‌تواند به نتایج نادرست، به ویژه در برآورد میزان انتقال رسوب بیانجامد. از شکل ۷ چنین مشخص می‌شود که مقدار تنش برشی در کانال اصلی به طور کلی بسیار بیش از مقدار تنش برشی در دشت سیلابی است و با نزدیک شدن به دیواره دشت سیلابی، مقدار آن کاهش می‌یابد. اما در مرز مشترک کانال اصلی و دشت سیلابی جهشی ناگهانی اتفاق می‌افتد و با وارد شدن به دشت سیلابی، تنش برشی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در مرز مشترک دو کانال، منحنی تغییرات عرضی تنش برشی در کانال مرکب ناپیوستگی دارد. افزایش در تنش برشی را می‌توان به انتقال مومنوم از کانال اصلی به دشت سیلابی نسبت داد (Rajaratnam & Ahmadi, 1981; Tominaga & Nezu, 1991). منحنی تغییرات تنش برشی در کانال اصلی دارای یک نقطه حداکثر است که با افزایش عمق نسبی، موقعیت این نقطه به سمت میانه کانال جابه‌جا می‌شود.

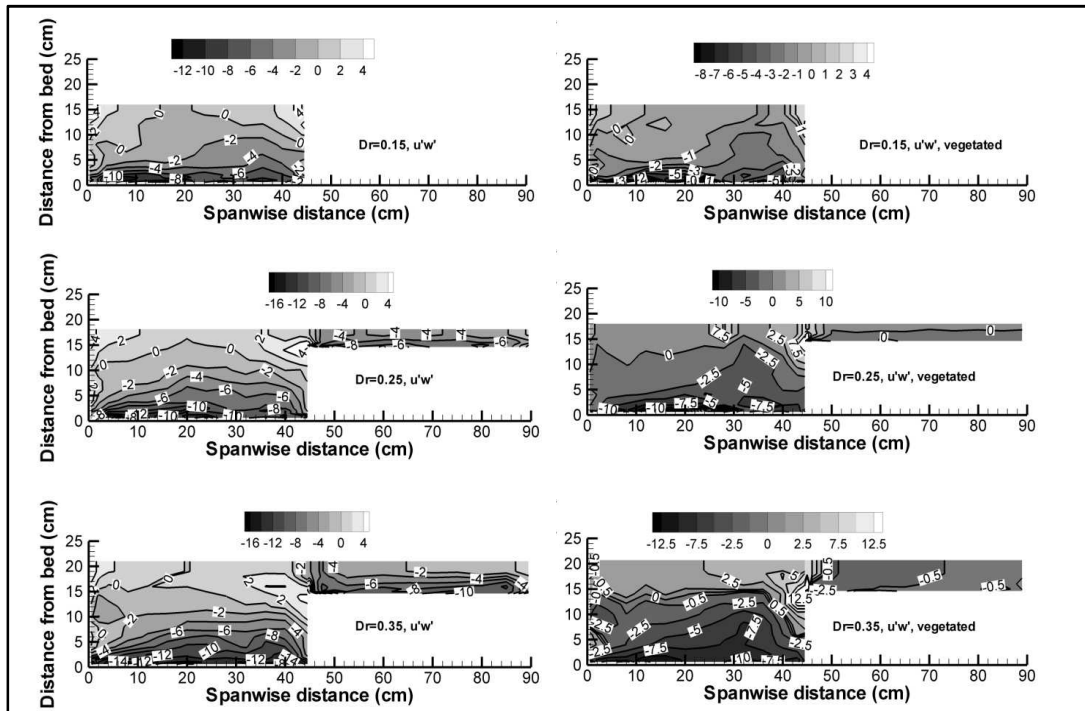
اگرچه انتظار می‌رود که به ازای یک عمق نسبی معین، با زبر شدن دشت سیلابی، در مقایسه با دشت سیلابی صاف، مقدار تنش برشی افزایش یابد (Tominaga & Nezu, 1991)؛ اما در تحقیق حاضر

رینولدز در دشت سیلابی نسبت به تنش‌های رینولدز در کانال اصلی کمتر است و با تغییرات کمتری نیز روبه‌رو می‌شود.

هر جا شیب منحنی تغییرات سرعت جریان مثبت است مقدار  $\overline{u'v'}$  منفی است و بالعکس. همچنین مشاهده می‌شود که در حضور پوشش گیاهی، مقدار تنش‌های



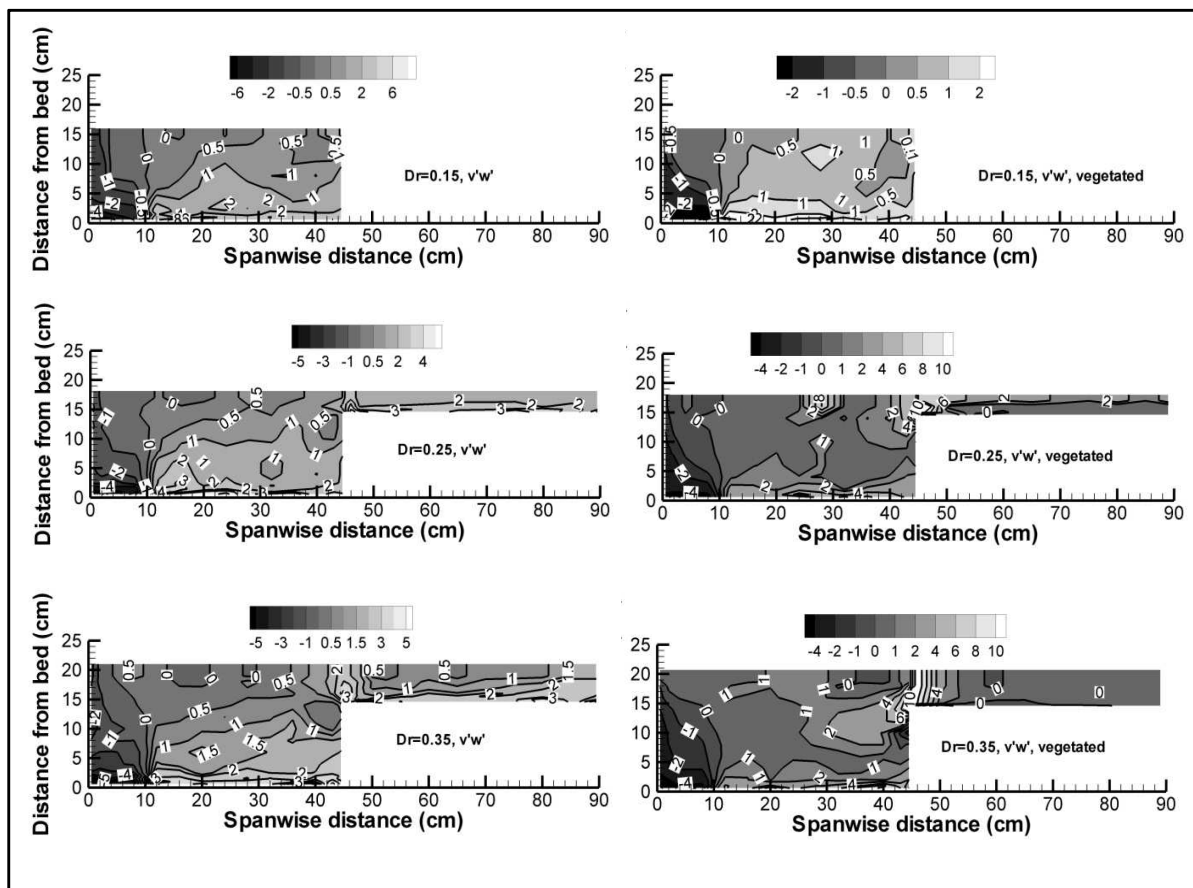
شکل ۸- خطوط هم‌تراز مؤلفه تنش رینولدز ( $\overline{u'v'}$ ) به ازای اعماق نسبی مختلف سمت چپ: دشت سیلابی بدون پوشش گیاهی و سمت راست: دشت سیلابی پوشیده از گیاه



شکل ۹- خطوط هم‌تراز مؤلفه تنش رینولدز ( $\overline{u'w'}$ ) به ازای اعماق نسبی مختلف سمت چپ: دشت سیلابی بدون پوشش گیاهی و سمت راست: دشت سیلابی پوشیده از گیاه

پیش از این بحث شد، پوشش گیاهی با ایجاد مقاومت اضافی در برابر جریان، ظرفیت انتقال توسط کانال و در نتیجه سرعت جریان متوسط را در مقایسه با آزمایش بدون پوشش گیاهی کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مقدار  $\overline{v'w'}$  در آزمایش‌های مربوط به پوشش گیاهی، نسبت به مقدار آن در آزمایش‌های متناظر بدون حضور پوشش گیاهی، بیشتر است. از مجموع مشاهدات فوق چنین نتیجه گرفته می‌شود که پوشش گیاهی موجب کاهش نوسانات مؤلفه طولی سرعت جریان و افزایش نوسانات مؤلفه عرضی سرعت جریان می‌شود.

با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار  $\overline{u'w'}$  در نزدیکی بستر اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از بستر کاهش می‌یابد. همچنین، در لبه دشت سیلابی نیز مقدار این پارامتر موضعی افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج محققان قبلی (Tominaga & Nezu, 1991) همخوانی خوبی دارد. نکته جالب توجه دیگر آن است که به ازای یک عمق نسبی معین، حداکثر مقدار  $\overline{u'w'}$  در آزمایش‌های بدون پوشش گیاهی نسبت به آزمایش متناظر با حضور پوشش گیاهی روی دشت سیلابی بیشتر است. علت این امر متفاوت بودن شدت جریان در آزمایش‌های متناظر است. همان‌طور که



شکل ۱۰- خطوط هم‌تراز مؤلفه تنش رینولدز ( $\overline{v'w'}$ ) به ازای اعماق نسبی مختلف سمت چپ: دشت سیلابی بدون پوشش گیاهی و سمت راست: دشت سیلابی پوشیده از گیاه

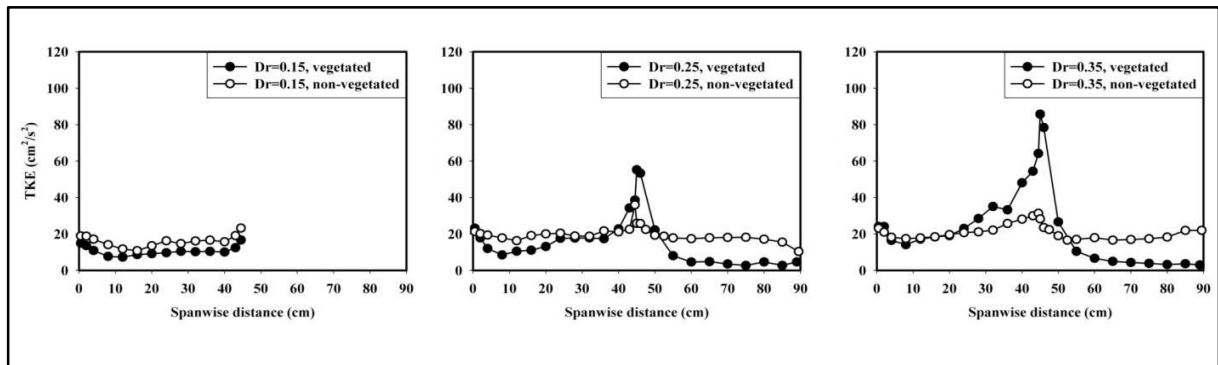
توجهی افزایش می‌یابد که ناشی از تأثیر جریان‌های ثانویه و انتقال مومنوم شدید در این ناحیه است. در عمق نسبی ۰/۳۵ و برای دشت سیلابی پوشیده از گیاه، افزایش انرژی جنبشی آشفتگی به ویژه در محل مرز مشترک بسیار زیاد است. با کاهش عمق نسبی مقدار حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی کاهش می‌یابد و توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در عرض یکنواخت‌تر می‌شود. نکته دیگر که از شکل ۱۱ فهمیده می‌شود آن است که پوشش گیاهی هر چند موجب کاهش انرژی جنبشی آشفتگی در دشت سیلابی می‌شود اما مقدار TKE در مرز مشترک کانال اصلی و دشت سیلابی، در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی، بسیار بیشتر است. همچنین، در مجاورت دیواره کانال اصلی، مقدار TKE به صورت موضعی افزایش می‌یابد که ناشی از حضور گردابه‌ای بزرگ است (در شکل ۵ به راحتی تشخیص داده می‌شود).

در مطالعه جریان‌های آشفته، انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) و نیز متوسط انرژی جنبشی جریان (MKE) از پارامترهای بسیار مهم به شمار می‌آیند. انرژی جنبشی آشفتگی معیاری از شدت آشفتگی است و در واقع بیانگر میزان تبادل مومنوم بین بخش‌های مختلف جریان آشفته است. تغییرات عرضی پارامترهای TKE و MKE به ازای واحد جرم که به صورت روابط ۲ و ۳ تعریف می‌شوند به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است:

$$TKE = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2)$$

$$MKE = \frac{1}{2} \rho (\overline{U^2} + \overline{V^2} + \overline{W^2}) \quad (3)$$

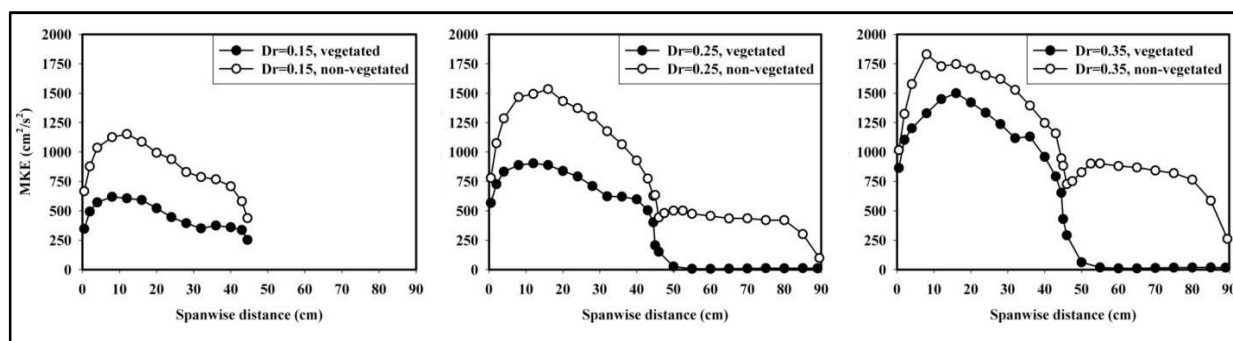
که در آن‌ها U، V و W به ترتیب مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان متوسط در هر نقطه است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در مرز مشترک دشت سیلابی و کانال اصلی، انرژی جنبشی آشفتگی به طور قابل



شکل ۱۱- نیم‌رخ عرضی TKE به ازای اعماق نسبی مختلف

طولی (شکل ۶) مشابه باشد. مقایسه شکل‌های ۶ و ۱۲ این مطلب را تأیید می‌کند. با افزایش عمق نسبی، مقدار MKE نیز افزایش می‌یابد. مقدار MKE روی دشت سیلابی، در مقایسه با مقدار آن در کانال اصلی، ناچیز است. از طرفی، به ازای یک مقدار مشخص عمق نسبی، پوشش گیاهی موجب کاهش MKE می‌شود.

در شکل ۱۲ تغییرات انرژی جنبشی متوسط جریان آورده شده است. بنابر تعریف پارامتر MKE (رابطه ۳) و با در نظر گرفتن این نکته که مقدار مؤلفه طولی سرعت جریان در مقایسه با مؤلفه‌های عرضی و عمقی بسیار بزرگ‌تر است (تا یک مرتبه بزرگی)، انتظار می‌رود که روند تغییرات MKE با روند تغییرات سرعت جریان متوسط



شکل ۱۲- نیمرخ عرضی MKE به ازای اعماق نسبی مختلف

### نتیجه‌گیری

نسبی، اختلاف سرعت جریان بین کانال اصلی و دشت سیلابی کاهش می‌یابد و رفتار کانال مرکب به کانال ساده نزدیک می‌شود. در حالی که در آزمایش‌های با پوشش گیاهی، حتی در بیشترین مقدار عمق نسبی در محدوده تحقیق حاضر، اختلاف سرعت جریان قابل توجهی بین کانال اصلی و دشت سیلابی مشاهده می‌شود. در مقایسه با کانال‌های با مقطع ساده، موقعیت حداکثر سرعت جریان در فاصله‌ای نسبتاً زیاد، از سطح آب دیده می‌شود که می‌تواند به علت جریان‌های ثانویه شدیدی باشد که در مقطع عرضی کانال اتفاق می‌افتند. قرار گرفتن نقاط حداکثر و حداقل مولفه‌های عرضی و عمقی سرعت جریان با علامت‌های مخالف یکدیگر در کانال اصلی، بیانگر آن است که در این ناحیه جریان‌های ثانویه بسیار شدید است که در حضور پوشش گیاهی شدت آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، مشخص شد که در مرز مشترک دو کانال، منحنی تغییرات عرضی تنش برشی در کانال مرکب دارای ناپیوستگی است.

در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی، ساختار جریان و آشفتگی در یک کانال مرکب نامتقارن بررسی شد. آزمایش‌های این تحقیق در سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵، که بنابر تحقیقات قبلی در محدوده انتقال مومنتوم شدید بین کانال اصلی و دشت سیلابی قرار دارند، اجرا شد. به منظور بررسی تأثیر پوشش گیاهی صلب، دشت سیلابی با استفاده از میله‌های استوانه‌ای پوشیده شد. از سرعت‌سنج صوتی داپلر برای اندازه‌گیری نوسانات سرعت جریان لحظه‌ای استفاده گردید. نتایج نشانگر تأثیر قابل توجه پوشش گیاهی بر هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب است. ظرفیت انتقال آبراهه در حضور پوشش گیاهی، در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی، تا ۳۱ درصد کمتر است. تغییرات مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان بررسی شد و تفاوت‌ها مورد بحث قرار گرفتند. مشاهده گردید که در آزمایش‌های بدون پوشش گیاهی، با افزایش عمق

### مراجع

- Abernethy, B. and Rutherford, I. D. 1998. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilise stream banks?. *Geomorphology*. 23(1): 55-75.
- Ayyoubzadeh, S. A. 1997. Hydraulic aspects of straight compound channel flow and bed load sediment transport. Ph. D. Thesis. The University of Birmingham. England.
- Bijad, K., Kouchakzadeh, S. and Ayyoubzadeh, S. A. 2010. An investigation of the influence of

- longitudinal channel slope on secondary currents in compound channels using 2-D momentum model. Iranian J. Soil and Water Res. 41(2): 169-177. (in Farsi)
- Hamidifar, H. and Omid, M. H. 2012. 3-D simulation of flow in compound open channels Using FLOW-3D. CD Proceeding of 11<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Nov. 6-8. Urmia. Iran. (in Farsi)
- Joung, Y. and Choi, S. 2008. Investigation of twin vortices near the interface in turbulent compound open-channel flows using DNS data. J. Hydraul. Eng. 134(12): 1744-1756.
- Kadlec, R. H. 1990. Overland flow in wetlands: vegetation resistance. J. Hydraul. Eng. 116(5): 691-706.
- Knight, D. W. and Hamed, M. E. 1984. Boundary shear in symmetric compound channels. J. Hydraul. Eng. 110(10): 1412-1430.
- Lai, C. J. and Knight, D. W. 1988. Distribution of streamwise velocity and boundary shear stress in compound ducts. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements. July 26-28. Tokyo. Japan. 527-536
- Maghrebi, M. and Heidarbeigi, A. A. 2009. Analytical study of stage-discharge relationship in compound channels with non-uniform roughness. J. Civil Eng. 21(1): 125-141. (in Farsi)
- Mars, M., Kuruvilla, M. and Goen, H. 1999. The role of submergent macrophyte *triglochin huegelii* in domestic greywater treatment. Ecol. Eng. 12, 57-66.
- Massel, S. R., Furukawa, K. and Brinkman, R. M. 1999. Surface wave propagation in mangrove forests. Fluid Dyn. Res. 24(4): 219-249.
- Nepf, H., Mugnier, C. and Zavistoski, R. 1997. The effects of vegetation on longitudinal dispersion. Estuar. Coast. Shelf Sci. 44, 675-684.
- Othman, M. A. 1994. Value of mangroves in coastal protection. Hydrobiologia. 285(1-3): 277-282.
- Pollen, N. and Simon, A. 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. Water Resour. Res. 41, 1-11.
- Rajaratnam, N. and Ahmadi, R. 1981. Hydraulics of channels with floodplains. J. Hydraul. Res. 16(2): 139-150.
- Shiono, K. and Knight, D. W. 1991. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. J. Fluid Mech. 222, 617-646.
- Simon, A. and Collison, A. J. C. 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. Earth Surf. Proc. Land. 27, 527-546.
- Tanaka, N. 2009. Vegetation bioshields for tsunami mitigation: review of effectiveness, limitations, construction, and sustainable management. Landscape Ecol. Eng. 5, 71-79.
- Thomas, T. G. and Williams, J. J. R. 1995. Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound open channel. J. Hydraul. Res. 33(1): 27-41.
- Tominaga, A. and Nezu, I. 1991. Turbulent structure in compound open-channel flows. J. Hydraul. Eng. 117(1): 21-41.
- Yang, K., Cao, S. and Knight, D. W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated

ساختار جریان و آشفتگی در آبراهه‌های مرکب...

floodplains. J. Hydraul. Eng. 133(2): 148-159.

Yang, Z., Gao, W. and Huai, W. 2010. Secondary flow coefficient of overbank flow. Appl. Math. Mech-Engl. 31(6): 709-718.

Zavistoski, R. 1994. Hydrodynamic effects of surface piercing plants. M. Sc. Thesis. Massachusetts Institute of Technology. Zong. USA.

## **Mean Flow and Turbulence in Compound Channels with Vegetated Floodplains**

**H. Hamidifar, M. H. Omid\* and A. Keshavarzi**

\* Corresponding Author: Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Alborz, Iran. Email: momid@ut.ac.ir

Received: 29 December 2012, Accepted: 15 June 2013

The study of flow in compound channels with vegetated floodplains is essential to assessing the development of the stage-discharge relationship and sediment and pollutant transport. The present study experimentally investigated mean flow and turbulence characteristics in a prismatic compound channel. The experimental program consisted of vegetated and non-vegetated floodplains with different relative depths. The results show that vegetation had a significant effect on the flow characteristics of streamwise, lateral, and vertical velocity and Reynolds stress. For a given relative depth, the conveyance capacity of the channel decreased up to 31% for a vegetated floodplain over a non-vegetated floodplain. Although, the depth-averaged velocity varied significantly across the main channel, it was fairly constant over the vegetated floodplain. Strong secondary currents and lateral momentum transfer between the main channel and its floodplain led to high gradients in the depth-averaged velocity, bed shear stress, and turbulent kinetic energy at the interface.

**Keywords:** ADV, Compound channel, Flow structure, Turbulence, Vegetation