

مقاله علمی-پژوهشی

## مطالعه عددی میدان جریان و آشفته‌گی در کانال مرکب با سیلابدشت واگرای دارای پوشش گیاهی

فاطمه محمودی منفرد<sup>۱</sup>، حجت‌الله یونسی<sup>۲\*</sup>، معصومه رستم آبادی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

### چکیده

پوشش گیاهی سیلابدشت بر جریان آشفته کانال‌های مرکب خصوصاً در شرایط سیلابی که عمق جریان تغییر می‌کند مؤثر است. شبیه‌سازی عددی در بررسی دقیق اثر پوشش گیاهی بر جریان آشفته بسیار سودمند است. در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی جریان در کانال مرکب واگرا در دو حالت با پوشش گیاهی و بدون آن در اعماق نسبی متفاوت با استفاده از مدل عددی Flow3D پرداخته شده است. نتایج نشان داد سرعت جریان در کانال اصلی همواره از کانال سیلابدشت بیشتر است. برخورد جریان با پوشش گیاهی منجر به کاهش سرعت در سیلابدشت نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی شده است. بررسی پارامترهای آشفته‌گی نشان داد بیشترین مقدار سرعت برشی در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت رخ داده است، اما با افزایش عمق نسبی مقدار سرعت برشی و تنش برشی کاهش یافته است. همچنین در عمق نسبی ثابت، شدت آشفته‌گی در نزدیک جداره‌ها بیشترین مقدار و در قسمت‌های میانی کانال اصلی کمترین مقدار است. بررسی پایین‌دست ناحیه واگرایی نشان داد در پایین‌دست ناحیه دارای پوشش گیاهی شدت آشفته‌گی در خط مرکزی کانال سیلابدشت و در نزدیکی سطح آزاد بیشترین مقدار است، در حالیکه در غیاب پوشش گیاهی بیشترین مقدار شدت آشفته‌گی در نزدیکی کف کانال سیلابدشت رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: پوشش گیاهی، سیلابدشت واگرا، عمق نسبی، Flow 3D

### مقدمه

که پیچیدگی میدان جریان و ساختار آشفته آن در کانال‌های مرکب را به دنبال خواهد داشت. مطالعه جریان در کانال‌های مرکب می‌تواند به درک بهتر سازوکار جریان رودخانه‌ها و کانال‌های طبیعی به ویژه در مواقع سیلابی که عمق جریان تغییر می‌کند کمک نماید. علاوه بر این، در طبیعت معمولاً سیلاب‌دشت‌ها پوشیده از گیاهان هستند و پوشش گیاهی بر ظرفیت انتقال جریان در کانال اصلی و سیلابدشت و نیز پارامترهای آشفته‌گی تأثیر می‌گذارد. سیلاب‌دشت‌ها به واسطه داشتن عرض زیاد و خاک حاصلخیز همواره از جنبه‌های مختلف تفریحی، تجاری، کشاورزی و مسکونی مورد توجه بوده‌اند، بنابراین آگاهی از شرایط جریان در سیلاب‌دشت‌ها برای حفاظت از جان انسان‌ها و نیز سازه‌ها و تأسیسات موجود در آنها لازم و ضروری است. مطالعات مرتبط با کانال‌های مرکب غیر منشوری دارای پوشش گیاهی شامل رویکردهای آزمایشگاهی و عددی می‌شوند. سان و شیونو ساختار متلاطم جریان کانال باز مرکب را با یک خط پوشش گیاهی در امتداد لبه مشترک سیلابدشت و کانال اصلی مطالعه کردند و به بررسی توزیع سرعت، نسبت دبی و تنش برشی بستر پرداختند (Sun and Shiono, 2009). نتایج شبیه‌سازی آشفته‌گی با روش

بررسی وقوع بلایای طبیعی نشان می‌دهد خسارات مالی ناشی از پدیده سیل بطور قابل توجهی رو به افزایش است. در شرایط سیلابی، عمق جریان تغییر می‌کند. تغییرات عمق جریان و اثر آن بر سازوکار جریان آشفته، در کانال‌های مرکب که دارای کانال اصلی و سیلابدشت هستند با کانال‌های عادی متفاوت است. در کانال اصلی به دلیل عمق زیاد و ضریب زبری کم، جریان سرعت بالایی دارد، در حالیکه سرعت جریان در سیلابدشت‌ها با توجه به عرض زیاد و زبری بیشتر، به مراتب کمتر است. تفاوت زبری، عمق و سرعت جریان سبب اندرکنش جریان سیلابدشت‌ها و کانال اصلی می‌شود

۱- دانشجوی کاشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: yonesi.h@lu.ac.ir)

گردد و از دقت نتایج مدل عددی اطمینان حاصل شود. از این رو هدف اصلی از پژوهش حاضر مطالعه عددی سازوکار جریان در کانال مرکب واگرا به منظور بررسی ساختار جریان آشفته در حضور پوشش گیاهی است. به منظور بررسی اثر پوشش گیاهی، الگوی جریان در حالت بدون پوشش گیاهی نیز شبیه‌سازی شد. نرم افزار Flow3D برای شبیه‌سازی استفاده شده است. لذا پس از صحت‌سنجی مدل عددی، ضمن بررسی سازوکار جریان، سرعت برشی، تنش برشی، شدت آشفتگی در دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون آن با تغییر عمق نسبی مقایسه و تحلیل شده است.

## مواد و روش‌ها

### معرفی مدل عددی

نرم افزار Flow-3D یک مدل CFD با کاربرد وسیع می‌باشد. این مدل برای جریان‌های سه‌بعدی دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده کاربرد دارد و معادلات گسسته شده حاکم بر جریان ماندگار و غیرماندگار سیال را می‌تواند در دو سیستم مختصات کارترین و استوانه‌ای حل کند. Flow3D می‌تواند از الگوریتم‌های تفاضل محدود و حجم محدود روی شبکه محاسباتی ساختار یافته استفاده کند. همچنین از دو روش TruVOF و نماینده کسر مساحت-حجم مانع به ترتیب برای تعیین مکان سطح آزاد و موانع (مرزهای صلب مانند پل‌ها، دریچه‌ها و ...) استفاده نماید (Floes 3D User Manual, 2016). معادلات حاکم بر جریان سیال قانون بقا جرم و بقا مومنتوم هستند و برای سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی (۱) و (۲) می‌باشند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در آن‌ها  $u_i$  و  $X_i$  به ترتیب بردارهای سرعت و موقعیت،  $t$  زمان،  $p$  فشار،  $\rho$  دانسیته سیال و  $t_{ij}$  تانسور تنش ویسکوز بوده که در رابطه (۳) معرفی شده است و در آن  $\mu$  لزجت مولکولی و  $s_{ij}$  تانسور نرخ کرنش مطابق رابطه (۴) می‌باشد:

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (3)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

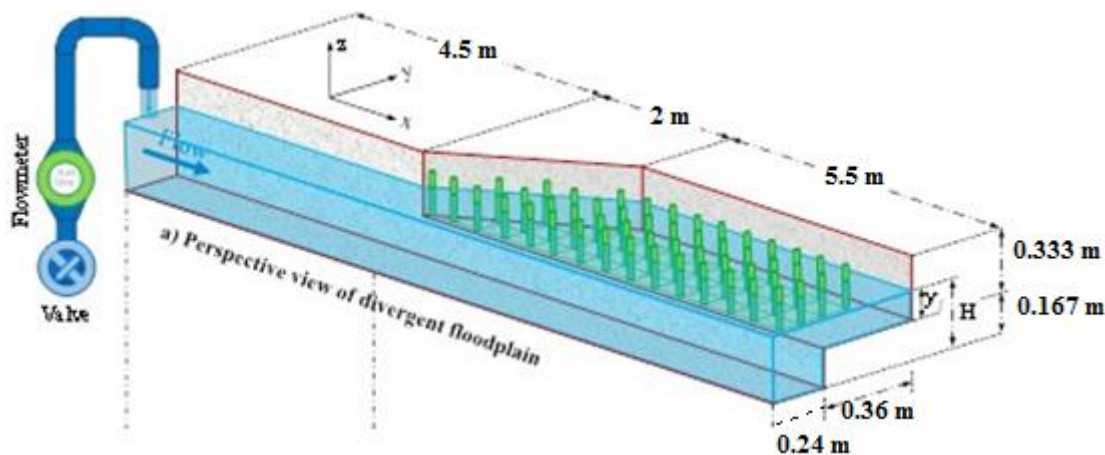
### معرفی میدان حل و تنظیمات مدل عددی

در این پژوهش از داده‌های آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (۱۳۹۹) به منظور صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی مذکور عبارتست از یک کانال مرکب نامتقارن با کانال اصلی منشوری و سیلابدشت غیر منشوری و واگرا. آبراهه از جنس

LES در کانال مرکب با عمق نسبی کم و زیاد در مطالعات عددی کارا و همکاران ارائه شد (Kara et al., 2012). تحقیق آزمایشگاهی نیز به منظور بررسی تغییرات شدت آشفتگی در کانال مرکب با داشتن زبری و پوشش گیاهی در سیلابدشت انجام شد (Kaziot, 2013). تئوهاریس و پاناگیوتیس در مطالعه عددی کانال مرکب نامتقارن با کانال اصلی دوزنقه‌ای و پوشش گیاهی در سیلابدشت به بررسی انتقال مومنتوم بین کانال اصلی و سیلابدشت و تنش برشی و آشفتگی پرداختند (Theoharris and Panagiotis., 2016). دوپویس و همکاران آزمایش‌هایی برای بررسی لایه اختلاط در سطح مشترک جریان‌های کانال باز مرکب با دشت سیلابی انجام دادند (Dupuis et al., 2017). بارمن و کومار به طور فیزیکی برخی پارامترهای آشفتگی را در تاج پوشش ناهمگن در منطقه دشت سیلابی کانال‌های باز مرکب جمع‌آوری کردند (Barman and Kumar, 2022). حمیدی فر و همکاران (۱۳۹۲) به مطالعه آزمایشگاهی جریان و پارامترهای آشفتگی در کانال مرکب مستقیم منشوری با پوشش گیاهی پرداختند. نتایج نشان داد پوشش گیاهی تأثیر چشمگیری بر مشخصات جریان و تنش‌های رینولدز دارد. همچنین، جریان‌های ثانویه منجر به ایجاد گردان شدید در تنش برشی و انرژی جنبشی جریان آشفته در مرز مشترک کانال اصلی و دشت سیلابی می‌شود. صمدی رحیم و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی آزمایشگاهی توزیع سرعت و تنش برشی و شکل‌گیری جریان ثانویه تحت تأثیر تراکم پوشش گیاهی سیلابدشت در یک آبراهه مرکب نامتقارن با سیلابدشت واگرا پرداختند. شکری و مهدی پور (۱۴۰۰) با استفاده از مدل سه بعدی Ansys-Fluent، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلابدشت‌های واگرا را شبیه‌سازی نمودند. صمدی رحیم و همکاران به بررسی آزمایشگاهی اثر تراکم پوشش گیاهی بر ساختار آشفته جریان و ویژگی‌های هیدرولیکی آن در کانال مرکب نامتقارن با سیلابدشت همگرا و واگرا پرداختند (Samadi Rahim et al., 2023). احمدی و همکاران (۱۴۰۲ و ۱۴۰۱) به بررسی عددی اثر پوشش گیاهی سیلابدشت بر ساختار جریان و خصوصیات آشفته کانال مرکب پرداختند و نتیجه گرفتند گردان‌های سرعت در فصل مشترک کانال اصلی و سیلابدشت، منجر به توسعه جریان‌های ثانویه و انتقال جرم و مومنتوم در این ناحیه می‌شود.

با توجه به بررسی مطالعات پیشین، مطالعه عددی ساختار آشفته جریان در کانال‌های مرکب نامتقارن با سیلابدشت واگرای دارای پوشش گیاهی و تأثیر عمیق نسبی و مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه عددی می‌تواند جزئیات دقیقی از جریان و پارامترهای آشفتگی را در کل میدان محاسباتی ارائه نماید و برای بررسی متغیرهای مؤثر بر یک پدیده و نیز ارزیابی سناریوهای مختلف - بدون صرف هزینه و زمان زیاد- بسیار کارآمد باشد، مشروط بر اینکه نتایج مدل عددی صحت‌سنجی

آزمایشگاهی مذکور را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی پوشش گیاهی، در آزمایشگاه از میله‌های پلاستیکی استوانه‌ای صلب به قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. میله‌ها از بخش ابتدایی ناحیه واگرایی تا یک متر بعد از انتهای ناحیه واگرایی بر روی سیلابدشت نصب شدند. آرایش پوشش گیاهی به شیوه ردیفی و با فاصله طولی و عرضی بین میله‌ها به ترتیب ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

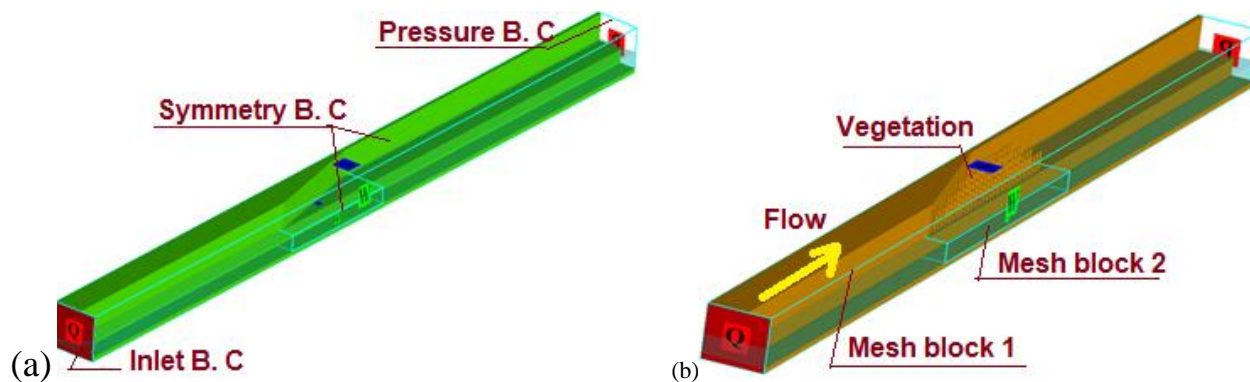


شکل ۱- طرح شماتیک فلوم مورد استفاده در تحقیق آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (۱۳۹۹)

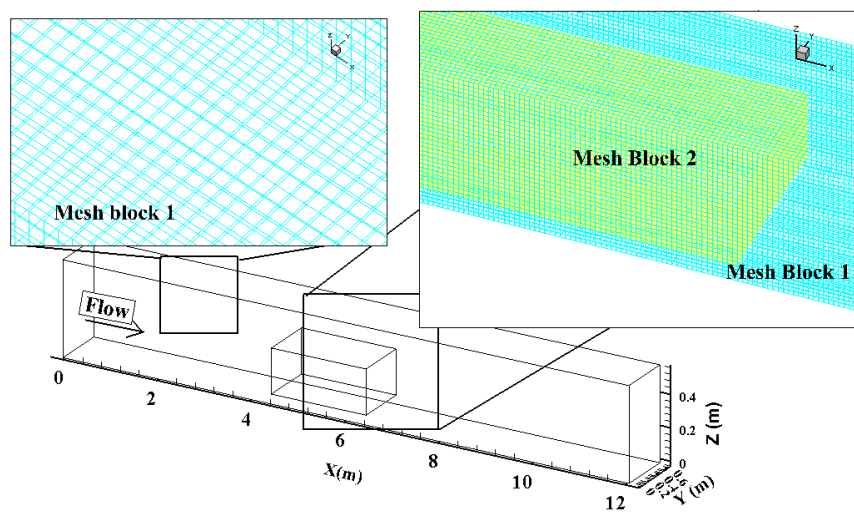
در هر مدل‌سازی عددی لازم است نتایج مستقل از شبکه محاسباتی بدست آید. بدین منظور سه شبکه‌بندی متفاوت به شرح جدول ۱ در نظر گرفته شد. در این جدول علاوه بر اندازه سلول‌های بکار رفته برای بلوک ۱ و بلوک ۲، تعداد کل سلول‌های محاسباتی و مدت زمان محاسباتی هر شبکه که با سیستمی با پردازشگر مرکزی Core(TM) i7 با قدرت 3.60 GHz و حافظه 16GB انجام گرفته ارائه شده است. منظور از مدت زمان محاسباتی، زمانی است که سیستم با پردازشگر مزبور نیاز دارد تا برای هر شبیه‌سازی به همگرایی برسد. معیار همگرایی، تغییر ناچیز باقی‌مانده متغیرهای معادلات حاکم بر مسئله است. به عنوان نمونه، نمودار تغییرات باقی‌مانده متغیرهای فشار و نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی در شکل ۳-ب نشان داده شده است. مطابق شکل ۳-ب، تغییرات باقی‌مانده‌ها با شیب نزدیک به صفر در نمودار دیده می‌شود که نشان دهنده همگرایی مدل عددی است. به منظور بررسی تاثیر شبکه‌بندی ارائه شده در جدول ۱ بر نتایج مدل عددی، مقایسه پروفیل سرعت در مقطع میانی محدوده واگرایی حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (۱۳۹۹) در شکل ۴ نمایش داده شده است.

پلکسی گلاس به طول ۱۲ متر، عرض آبراهه اصلی ۰/۲۴ متر و حداکثر عرض سیلابدشت ۰/۳۶ متر. عمق لبریزی ۰/۱۶۷ متر با شیب بستر ۰/۰۰۸۸ است. سیلابدشت از فاصله ۴/۵ متر از ورودی آبراهه اصلی شروع شده و با زاویه واگرایی ۱۱/۳ درجه تا فاصله ۶/۵ متری ادامه می‌یابد. از این پس ابتدای محل واگرایی را مقطع ورودی، انتهای قسمت واگرایی را مقطع انتهایی و حد واسط مقطع ابتدایی و انتهایی، مقطع میانی نامیده می‌شود. شکل ۱ نمایی از فلوم

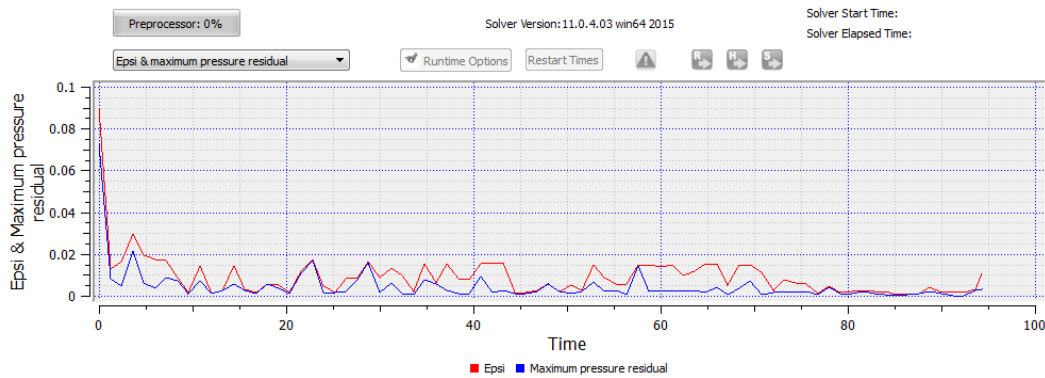
برای شبیه‌سازی، هندسه مدل با استفاده از نرم افزار AutoCAD ساخته شد و با فرمت \*.stl به نرم افزار Flow-3D معرفی شد. در شکل ۲ هندسه تعریف شده کانال اصلی و سیلابدشت در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی نشان داده شده است. علاوه بر تولید هندسه، شبکه‌بندی و تعریف شرایط مرزی نیز باید انجام شود. مطابق شکل ۳-الف شبکه‌بندی کارترین بکار رفته است. شرط مرزی ورودی، دبی ۲۵/۶۵ لیتر بر ثانیه، شرط مرزی خروجی فشار معادل با ارتفاع مشخص آب در کانال، دیواره‌های جانبی مدل و کف آن با شرط مرزی دیواره و سطح آزاد جریان با شرط مرزی تقارن مدل شده است. بر اساس مطالعات رضایی و سیف و نیز رضایی و صفرزاده که نشان دادند مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  قادر است به خوبی میدان جریان را در کانال مرکب مدل‌سازی کند، مدل  $k-\epsilon$  در این تحقیق برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است (Rezaei and safarzade, 2016; Rezaei and Seif, 2022). در شبکه‌بندی میدان حل از دو بلوک شبکه‌بندی استفاده شده است. بلوک اصلی کل هندسه مدل را در بر گرفته و بلوک دوم با هدف افزایش دقت نتایج، اطراف پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. در مرز بین این دو بلوک از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. در شکل ۲ شرایط مرزی اعمال شده در بلوک‌ها نیز نشان داده شده است.



شکل ۲- هندسه و شرایط مرزی در کانال مرکب بدون پوشش گیاهی (a) و کانال مرکب با پوشش گیاهی (b)



(الف)

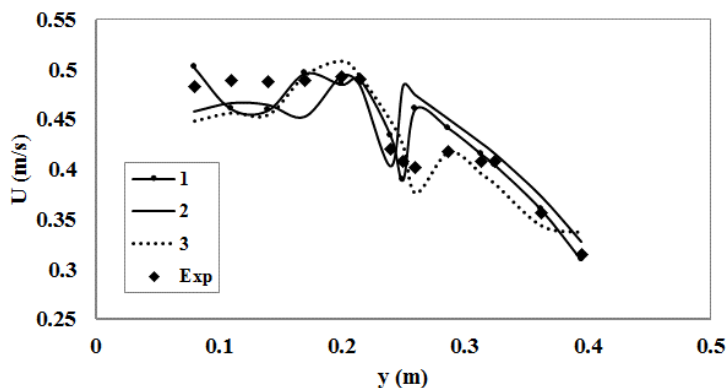


(ب)

شکل ۳- نمایی از الف) شبکه بندی مدل هندسی و ناحیه تقویت شده شبکه بندی و ب) نمودار همگرایی مدل عددی

جدول ۱- جزئیات شبکه بندی مدل عددی

شبکه	اندازه سلول بلاک ۱ در هر راستا (m)	اندازه سلول بلاک ۲ در هر راستا (m)	تعداد کل سلول ها	زمان محاسباتی (دقیقه)
۱	۰/۰۲۳	۰/۰۱۱۵	۵۲۰۰۶۲	۴۳
۲	۰/۰۲۱	۰/۰۱۰۵	۶۶۶۳۴۵	۵۰
۳	۰/۰۱۹	۰/۰۰۹۵	۹۲۵۴۴۶	۷۵



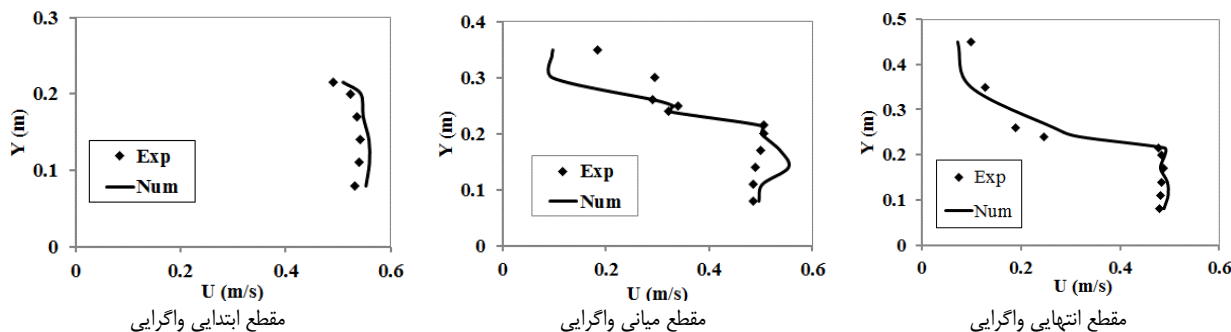
شکل ۲- تاثیر اندازه‌های متغایر بر روی پروفیل سرعت در مقطع میانی

مدل عددی در تطابق با پروفیل‌های آزمایشگاهی می‌باشند. در مقطع ابتدایی واگرایی که فقط جریان در کانال اصلی وجود دارد، تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی دیده می‌شود و مقدار سرعت تقریباً یکنواخت است.

در مقطع میانی، در قسمت کانال اصلی، پروفیل سرعت آزمایشگاهی یکنواخت است اما مدل عددی بیشینه سرعت را در خط مرکزی کانال اصلی نشان داده است. در مرز کانال اصلی و سیلابدشت مدل عددی پروفیل سرعت را منطبق بر مقدار آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. مقدار سرعت در قسمت سیلابدشت (از  $y=0/24$  به بعد) بسیار کم شده است و مدل عددی این کاهش سرعت را پیش‌بینی نموده است.

در مقطع انتهایی واگرایی، نتایج مدل عددی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، پروفیل سرعت در کانال اصلی در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی به صورت یکنواخت مشاهده می‌شود و کاهش شدید سرعت در سیلابدشت در مدل عددی مانند مدل آزمایشگاهی است. میانگین خطای نسبی در تخمین پروفیل عرضی سرعت در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر ۱۳، ۳/۵ و ۸ درصد می‌باشند.

همانطور که مشاهده می‌شود روند کلی پروفیل‌های سرعت برای هر سه شبکه‌بندی تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. از  $y=0/45$  تا  $y=0/3$  نتایج هر سه شبکه مشابه، اما نتایج شبکه ۳ انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت شبکه ۳ نسبت به دو شبکه دیگر، انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در کانال اصلی ( $y=0/24$  تا  $y=0$ )، نتایج شبکه ۲ و ۳ نزدیک یکدیگر است و شبکه ۳ تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد، اما شبکه ۱ اختلاف بیشتری دارد. به منظور مقایسه کمی نتایج، خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی با استفاده از فرمول خطای نسبی (مقدار عددی - مقدار آزمایشگاهی) تقسیم بر مقدار آزمایشگاهی محاسبه شد. محاسبات نشان داد خطای نسبی سه شبکه مذکور به ترتیب برابر ۴، ۶/۵ و ۴ درصد بوده است. لذا علیرغم اینکه با تغییر شبکه خطای نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی تحت تاثیر چندان قرار نگرفته است، اما شبکه ۳ همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. با توجه به توضیحات فوق در ادامه مطالعات شبکه‌بندی ۳ در نظر گرفته شد. به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت بدست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی در سه مقطع ابتدایی، میانی و انتهایی ناحیه واگرایی در شکل ۵ نمایش داده شده است. روند کلی پروفیل‌های عرضی سرعت



شکل ۵- مقایسه پروفیل سرعت شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (۱۳۹۹) در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی

شود.

در حالت وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت (شکل ۶-ا)، برخورد جریان با پوشش گیاهی متراکم مانع از عبور جریان از سیلابدشت شده و سرعت جریان در سیلابدشت بسیار کم شده است. با توجه به اینکه پوشش گیاهی تا حدود یک متر پس از انتهای ناحیه واگرایی وجود دارد، لذا تا انتهای ناحیه دارای پوشش گیاهی ناحیه کم سرعت در سیلابدشت مشاهده شده و پس از آن به تدریج جریان با سرعت بیشتری وارد سیلابدشت می‌شود. اثر پوشش گیاهی بر مقاومت در مقابل جریان و ممانعت از ورود جریان به سیلابدشت تا پایین دست ادامه دارد و ناحیه کم سرعت به صورت مثلثی در پایین دست پوشش گیاهی مشاهده می‌شود. در صورت عدم وجود پوشش گیاهی، با ورود جریان به سیلابدشت از بیشینه سرعت در کانال اصلی کاسته می‌شود، اما سرعت جریان در کانال اصلی همواره از کانال سیلابدشت بیشتر است. علت این امر را می‌توان مومنتم کمتر جریان در سیلابدشت نسبت به کانال اصلی دانست. برخلاف کانال اصلی، بیشینه سرعت در کانال سیلابدشت در مرکز نیست، بلکه در نزدیکی مرز کانال اصلی و سیلابدشت است.

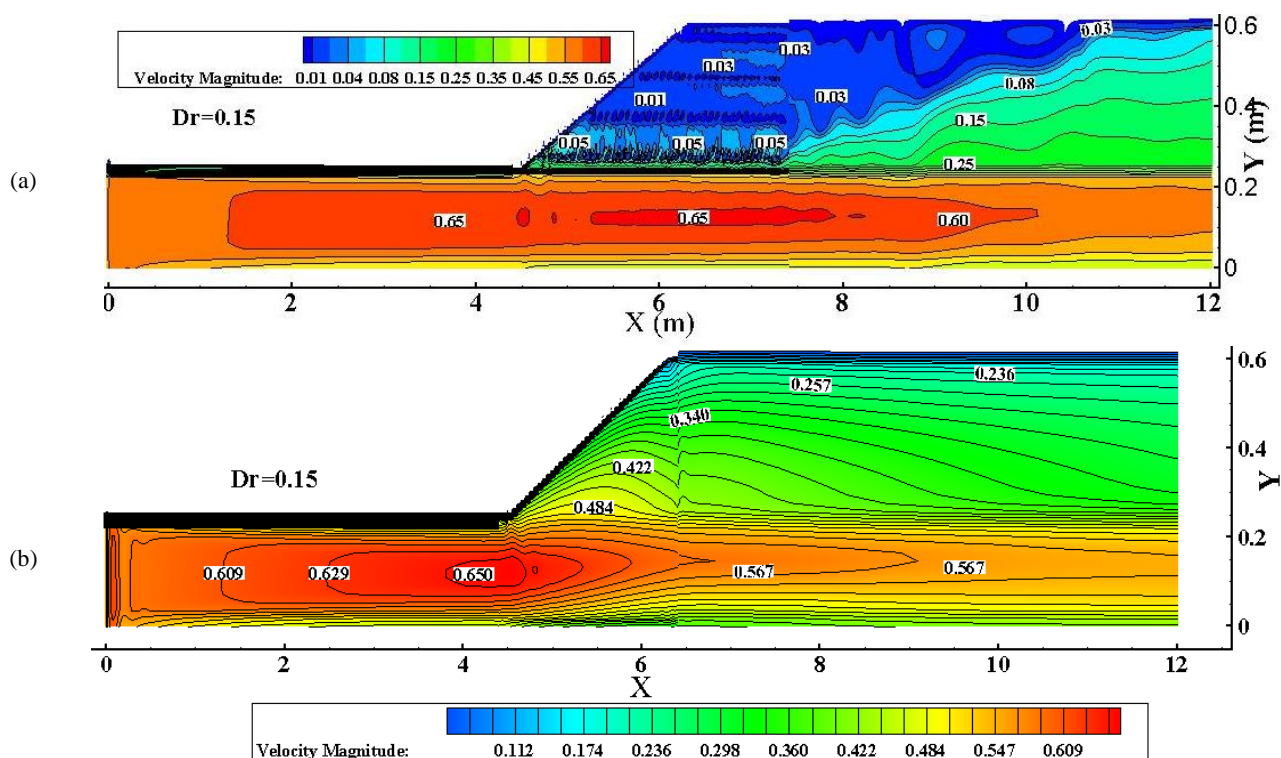
با توجه به دقت قابل قبول نتایج مدل عددی، به منظور بررسی اثر پوشش گیاهی در اعماق نسبی متفاوت، سه عمق نسبی (عمق جریان در سیلابدشت به عمق جریان در کانال اصلی)  $0/25$ ،  $0/35$  و  $0/15$  در دو حالت وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت و بدون پوشش گیاهی شبیه سازی شده و نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

## نتایج و بحث

با توجه به هدف پژوهش حاضر مبنی بر بررسی پارامترهای آشفتگی در اثر حضور پوشش گیاهی، لازم است ابتدا به طور مختصر الگوی جریان مرور شود.

## سازوکار جریان

به منظور بررسی سازوکار جریان، منحنی‌های هم مقدار بزرگی سرعت برآیند در سطح آزاد جریان در دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون آن به ترتیب در شکل‌های ۶-ا و ۶-ب نشان داده شده است. بررسی شکل ۶-ا و ۶-ب نشان می‌دهد قبل از واگرایی، جریان صرفاً در کانال اصلی با بیشینه سرعت در مرکز کانال وجود دارد. با شروع محدوده واگرایی بخشی از جریان به سمت سیلابدشت منحرف می-

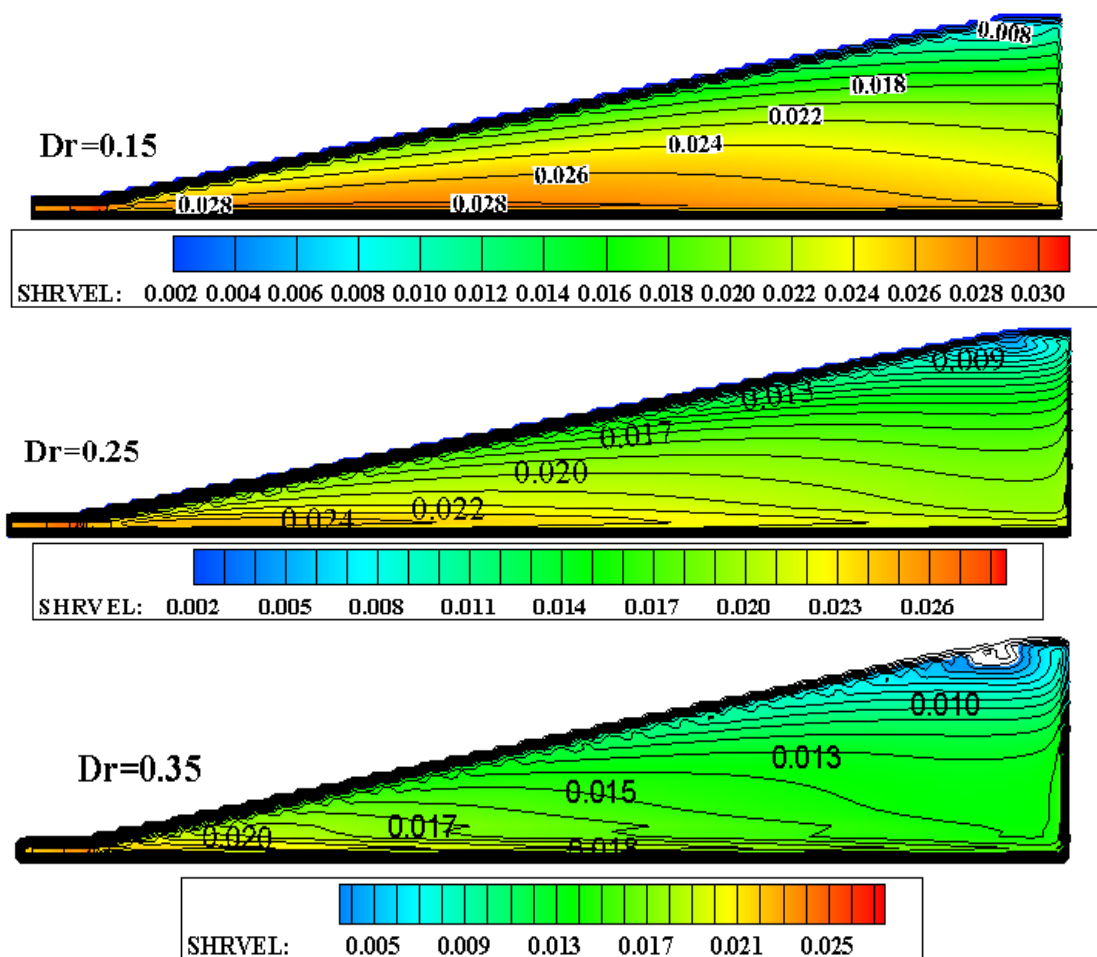


شکل ۳- منحنی‌های هم مقدار بزرگی سرعت برآیند در دو حالت وجود پوشش گیاهی (a) و بدون پوشش گیاهی (b)

### بررسی سرعت برشی

سرعت برشی عبارتست از جذر تنش برشی در واحد جرم، که نشان دهنده تنش برشی روی سطح است. لذا دو پارامتر سرعت جریان و مقاومت در مقابل جریان بر مقدار سرعت برشی اثرگذار هستند. در شکل ۷ منحنی‌های هم مقدار سرعت برشی کف کانال سیلاب‌دشت در محدوده واگرایی با تغییر عمق نسبی در حالت بدون پوشش گیاهی نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ با افزایش عمق نسبی مقدار سرعت برشی کاهش یافته است. در واقع هرچه عمق نسبی بیشتر باشد، مقاومت کف کانال در مقابل جریان کمتر و لذا سرعت برشی کمتر خواهد شد. همچنین با پیشروی به سمت پایین دست محدوده واگرایی، سطح مقطع جریان افزایش یافته، سرعت جریان کمتر و لذا سرعت برشی نیز کاهش یافته است.

با نزدیک شدن به انتهای محدوده واگرایی و به سمت پایین دست که سطح مقطع جریان منشوری می‌شود، اختلاف سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت کمتر می‌شود. بیشینه سرعت جریان در کانال اصلی در حالت وجود پوشش گیاهی بیشتر از حالت بدون پوشش گیاهی است که نشان دهنده عبور جریان بیشتر از کانال اصلی و جریان بسیار کمتر در سیلاب‌دشت نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی است. افزایش سرعت جریان در کانال اصلی کانال با پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی، در مطالعه زنگ و همکاران در شبیه‌سازی جریان کانال باز مرکب با پوشش گیاهی سیلاب‌دشت نیز اشاره شده است (Zeng et al., 2022).



شکل ۷- منحنی‌های هم مقدار سرعت برشی در محدوده واگرایی کف کانال سیلاب‌دشت با تغییر عمق نسبی

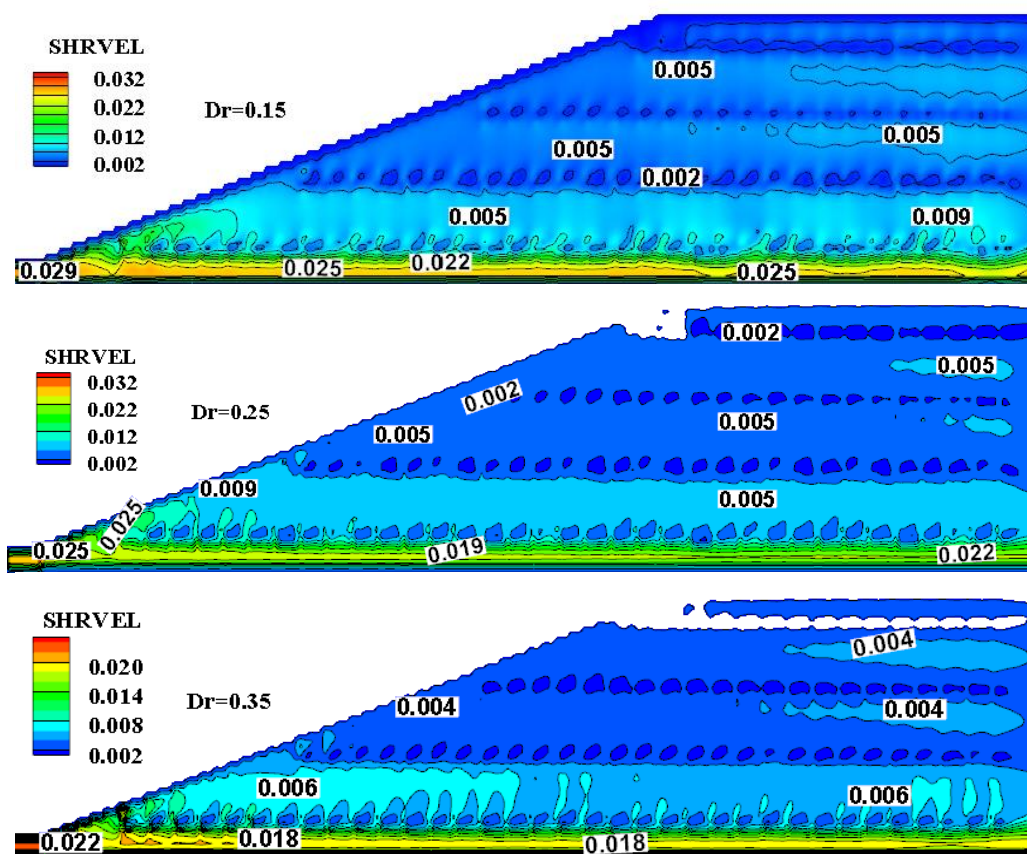
نیز کاهش یافته است و سرعت برشی در مرز کانال اصلی و سیلاب‌دشت بیشترین مقدار را دارد. با توجه به ارتباط مستقیم تنش

شکل ۷ نشان می‌دهد با نزدیک شدن به دیواره‌های کانال سیلاب‌دشت که از مقدار سرعت جریان کاسته می‌شود، سرعت برشی

نشان داده شده است. در مرز کانال اصلی و سیلابدشت که هنوز جریان با پوشش گیاهی برخورد نداشته است همان الگوی حالت بدون پوشش گیاهی حاکم است و با افزایش عمق نسبی سرعت برشی کم شده است. با برخورد جریان با پوشش گیاهی و ممانعت آن از عبور جریان، سرعت جریان و به تبع آن سرعت برشی نیز بسیار کم و نزدیک صفر است و با تغییر عمق نسبی تغییری در سرعت برشی در محدوده پوشش گیاهی مشاهده نمی‌شود.

برشی و سرعت برسی می‌توان نوشت:

- با افزایش عمق نسبی مقدار تنش برشی کاهش یافته است.
  - بیشینه تنش برشی در مرز کانال اصلی و سیلابدشت رخ می‌دهد.
  - مقدار تنش برشی در ابتدای محدوده واگرایی بیشتر و به تدریج تا انتهای واگرایی از مقدار آن کاسته می‌شود.
- در شکل ۸ نیز منحنی‌های هم مقدار سرعت برشی در محدوده واگرایی سیلابدشت با تغییر عمق نسبی در اطراف پوشش گیاهی



شکل ۴- منحنی‌های هم مقدار سرعت برشی در محدوده واگرایی سیلابدشت

### بررسی شدت آشفستگی

شدت آشفستگی، جذر مربع نوسانات سرعت تقسیم بر مقدار متوسط سرعت است. لذا پارامترهای نوسانات سرعت و سرعت متوسط به ترتیب به طور مستقیم و معکوس بر شدت آشفستگی تاثیر دارند. هرچه مقدار سرعت بیشتر باشد، شدت آشفستگی کاهش می‌یابد، همچنین هرچه نوسانات سرعت یا اغتشاش در جریان بیشتر باشد، شدت آشفستگی افزایش می‌یابد. انتظار می‌رود در کانال اصلی، از ابتدای محدوده واگرایی تا انتهای آن با توجه به کاهش سرعت متوسط

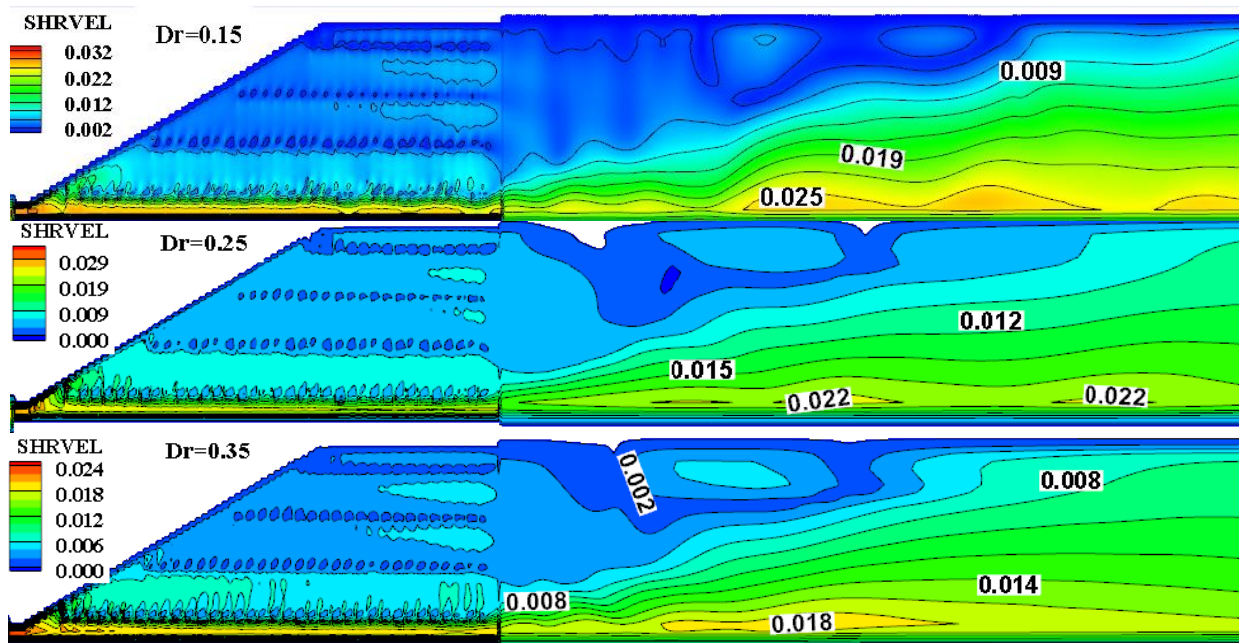
به منظور بررسی بیشتر، منحنی‌های سرعت برشی در پایین دست پوشش گیاهی نیز در شکل ۹ مورد ارزیابی قرار گرفت در پایین دست پوشش گیاهی، الگوی تغییرات سرعت برشی با تغییر عمق نسبی مانند حالت بدون پوشش گیاهی است، یعنی با افزایش عمق نسبی مقدار سرعت برشی کم شده است و بیشترین مقدار سرعت برشی در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت رخ داده است. ناحیه مثلی پایین دست پوشش گیاهی نشان دهنده انتقال تدریجی جریان به سمت سیلابدشت و ماندگار بودن اثر پوشش گیاهی بر الگوی جریان پایین دست می‌باشد.

- شکل‌های (b, c و d) نشان می‌دهد با انتقال مومنتم از کانال اصلی به سیلابدشت و کمینه سرعت در نزدیکی کف سیلابدشت، شدت آشفستگی در مرز و نزدیکی کف سیلابدشت از مقدار آن در مرکز کانال اصلی بیشتر است.
- در محدوده واگرایی سیلابدشت در مدل‌های دارای پوشش گیاهی (شکل‌های b', c' و d')، سرعت جریان بسیار کم است، از طرفی نوسانات سرعت نیز در حد صفر است، لذا شدت آشفستگی در حد صفر است
- در مدل‌های دارای پوشش گیاهی بیشترین مقدار شدت آشفستگی در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت (شکل‌های b', c' و d')، یعنی محل تغییر مسیر جریان به سمت سیلابدشت رخ داده است.

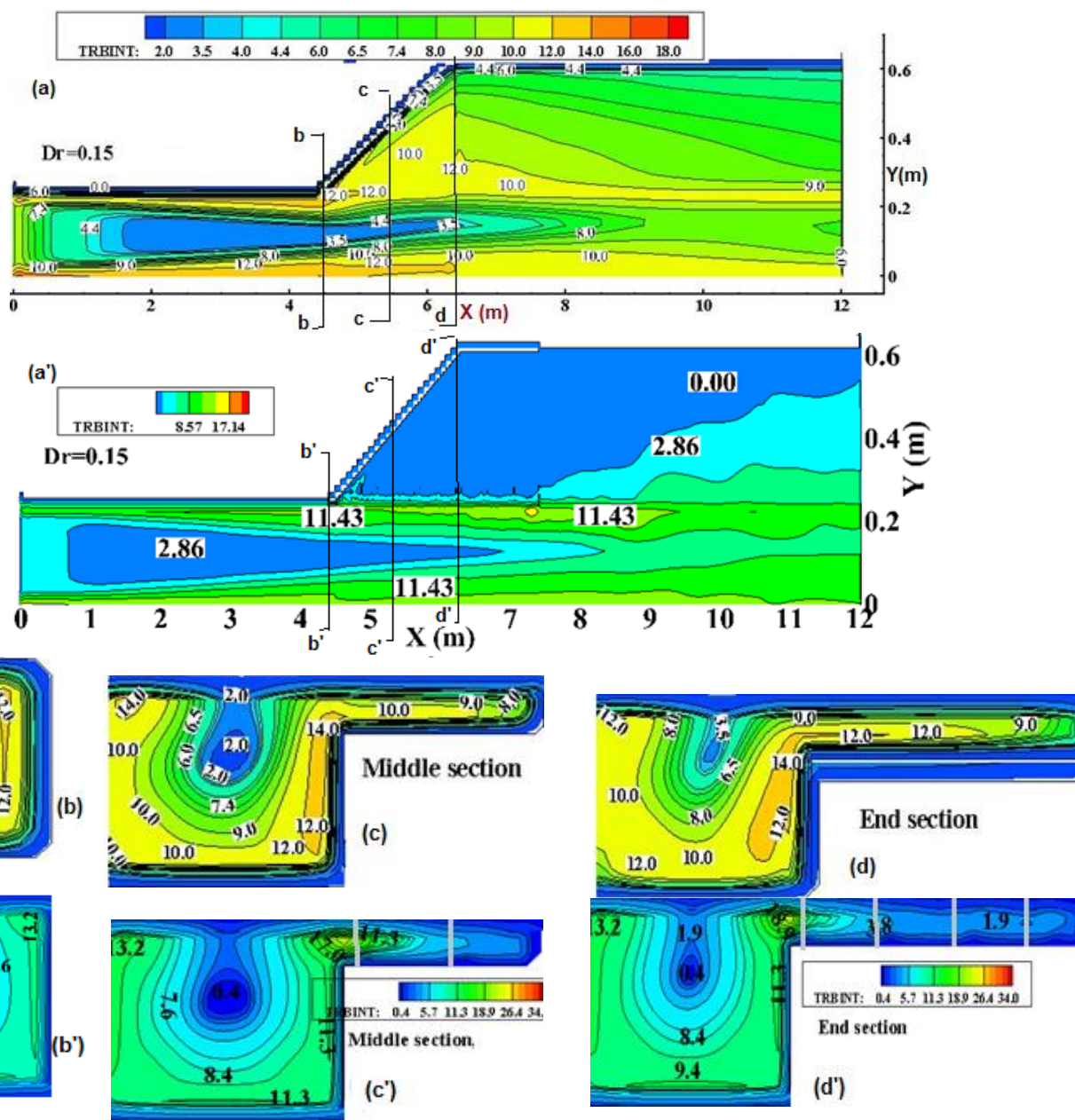
با توجه به مقاومت پوشش گیاهی در مقابل جریان و صفر بودن شدت آشفستگی در محدوده واگرایی، شدت آشفستگی در پایین دست محدوده دارای پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی-های هم مقدار شدت آشفستگی در مقطع  $X=9.5\text{ m}$  به ازای هر سه عمق نسبی نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳ با افزایش عمق نسبی بر مقدار شدت آشفستگی در کانال اصلی، در سیلابدشت و در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت افزوده شده است. بررسی شکل ۱۳ نشان می‌دهد با افزایش عمق نسبی و کم شدن سرعت متوسط جریان، شدت آشفستگی در کانال اصلی و سیلابدشت افزایش یافته

جریان، شدت آشفستگی افزایش یابد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، منحنی-های هم مقدار شدت آشفستگی در دو حالت بدون و با پوشش گیاهی با تغییر عمق نسبی در یک مقطع عمقی (شکل‌های a و a') و سه مقطع عرضی (شکل‌های b, c و d, b', c' و d') نشان داده شده است.

- مقایسه شکل‌های a، نشان می‌دهد در حالت عدم وجود پوشش گیاهی، با افزایش عمق نسبی و به تبع آن با کاهش سرعت متوسط جریان، شدت آشفستگی افزایش یافته است.
- مقایسه شکل‌های a'، نشان می‌دهد در حالت وجود پوشش گیاهی، در مرز مشترک سیلابدشت و کانال اصلی، با افزایش عمق نسبی شدت آشفستگی افزایش یافته است. با توجه به کم شدن سرعت متوسط، این پدیده قابل انتظار است.
- مقایسه شکل‌های (b با b', c با c' و d با d') نشان می‌دهد: در هر دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون آن و در عمق نسبی ثابت، شدت آشفستگی در قسمتهای میانی کانال اصلی کمترین مقدار و در کناره‌ها و نزدیک جداره‌ها دارای بیشترین مقدار است. با توجه به اینکه در قسمتهای میانی کانال سرعت جریان به سرعت متوسط نزدیکتر و در نزدیکی جداره‌ها سرعت جریان از سرعت متوسط خیلی کمتر است، لذا شدت آشفستگی نیز از کم به زیاد تغییر نموده است. پدیده افزایش شدت آشفستگی در نزدیکی جداره‌ها در مطالعات آزمایشگاهی Mudde و همکاران (۲۰۱۱) برای بررسی جریان و شدت آشفستگی در یک ونتوری متر نیز بیان شده است.



شکل ۵- منحنی‌های هم مقدار سرعت برشی در کل سیلابدشت



شکل ۱۱- منحنی های هم مقدار شدت آشفستگی در مقاطع عمقی و عرضی در عمق نسبی ۰/۱۵

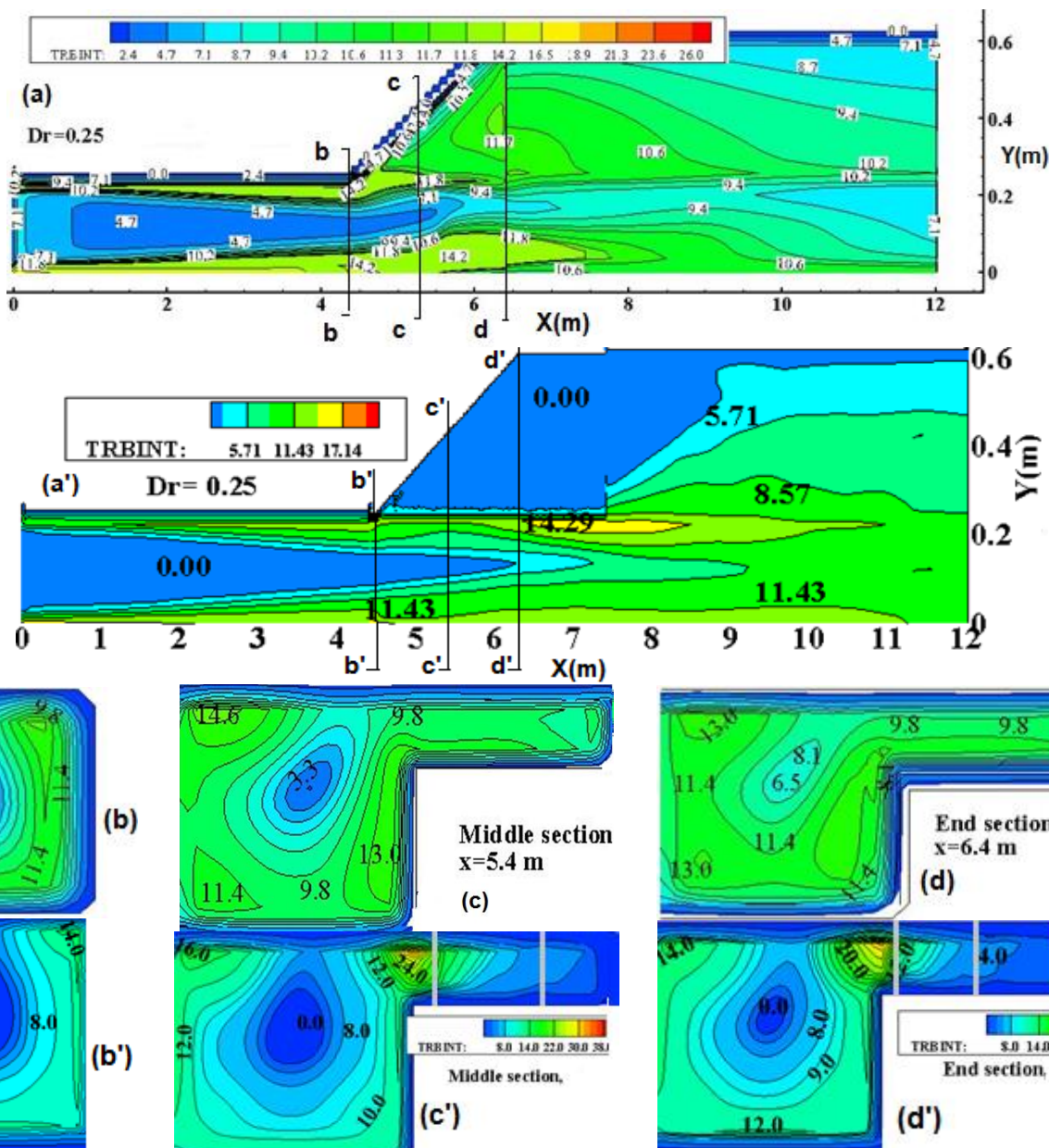
به منظور بررسی کمی مقدار تنش برشی در محدوده واگرایی، توزیع تنش برشی در مقاطع عرضی میانی (M) و انتهایی (E) برای کف کانال اصلی و سیلابدشت در دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون آن، در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در حالت عدم وجود پوشش گیاهی، تنش برشی بستر در محور مرکزی کانال اصلی دارای بیشترین مقدار است و با نزدیک شدن به دیواره آن مقدار آن کاسته شده است. تنش برشی در مرز کانال اصلی و سیلابدشت به مقدار بیشینه

همچنین با افزایش عمق نسبی، منحنی های هم مقدار شدت آشفستگی توزیع یکنواخت تری در کل عرض کانال سیلابدشت دارند و بیشینه شدت آشفستگی در خط مرکزی کانال سیلابدشت و در نزدیکی سطح آزاد رخ داده است. این پدیده در مدل های بدون پوشش گیاهی دیده نمی شود و بیشترین مقدار شدت آشفستگی در سیلابدشت بدون پوشش گیاهی در نزدیکی کف کانال سیلابدشت مشاهده می شود.

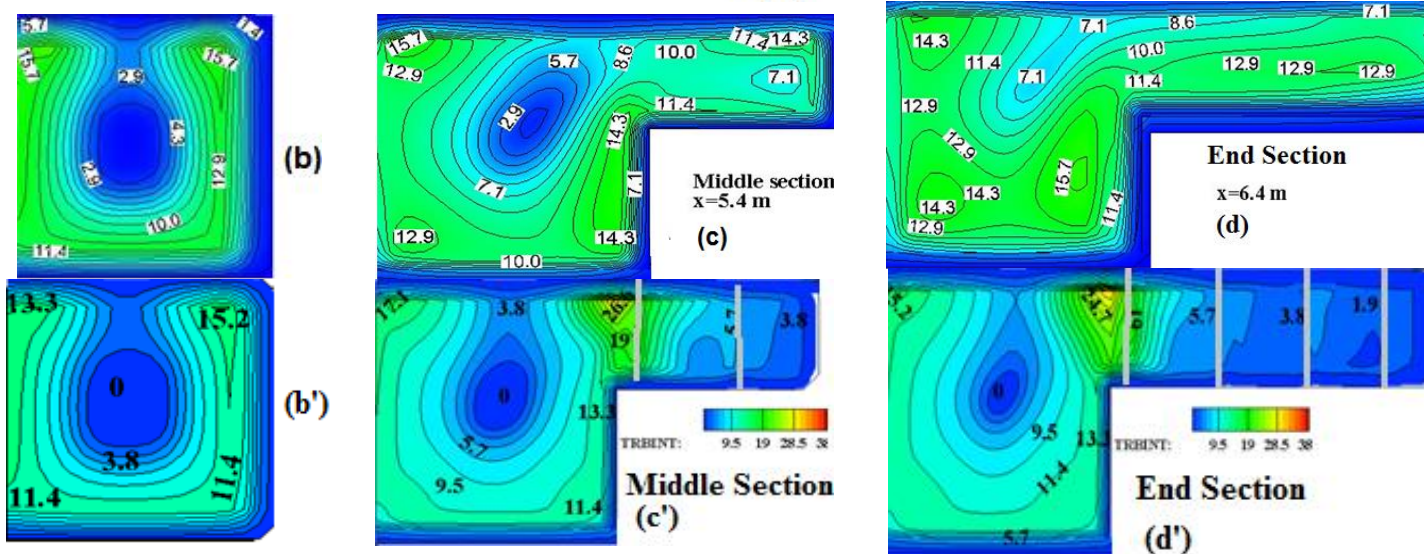
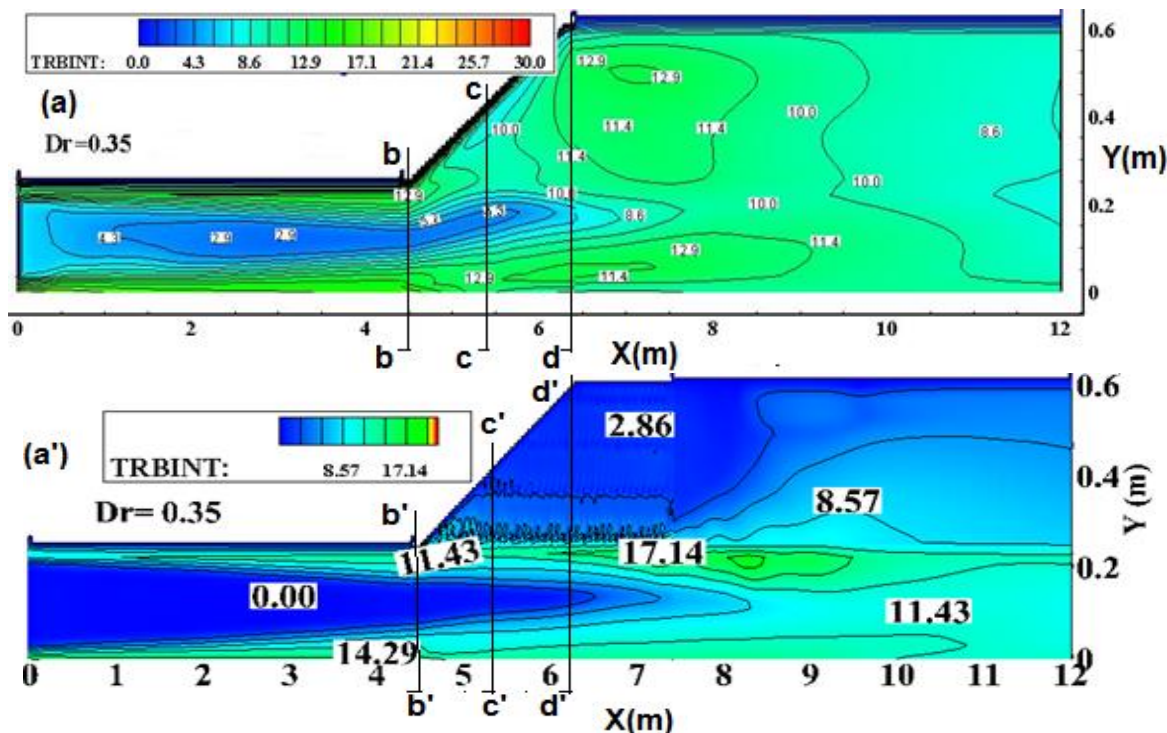
بررسی تغییرات تنش برشی

حاکی از کاهش تنش برشی با افزایش اعماق نسبی می‌باشد. علت این امر ناشی از کاهش مقاومت در برابر جریان و نیز کاهش سرعت با افزایش عمق نسبی و لذا کاهش تنش برشی است. همچنین تغییرات تنش برشی در مرز سیلابدشت و کانال اصلی با افزایش عمق نسبی کاهش یافته است.

خود می‌رسد و با نزدیک شدن به دیواره محدوده واگرایی کاهش می‌یابد. همچنین تنش برشی در کانال اصلی و سیلابدشت در مقطع انتهایی محدوده واگرایی نسبت به مقطع میانی آن کاهش پیدا کرده است که دلیل آن را می‌توان ناشی از افزایش سطح مقطع کانال و کاهش سرعت از ابتدای ناحیه واگرایی به سمت ناحیه انتهایی بیان کرد. در ارتباط با تاثیر اعماق نسبی روی توزیع تنش برشی، نتایج



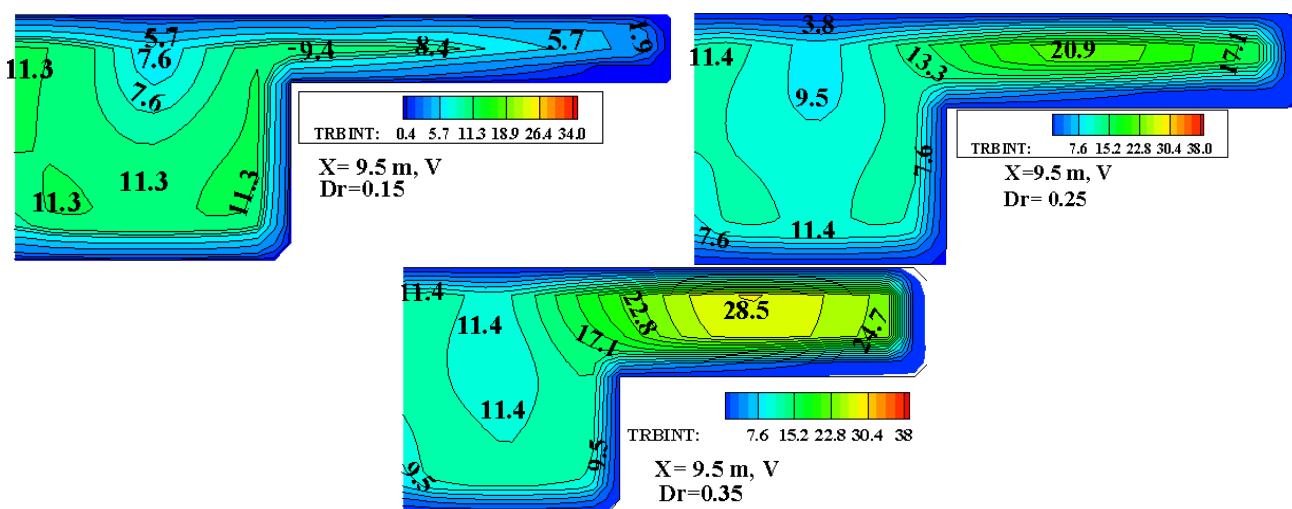
شکل ۱۱- منحنی‌های هم مقدار شدت آشفتگی در مقاطع عمقی و عرضی عمق نسبی ۰/۲۵



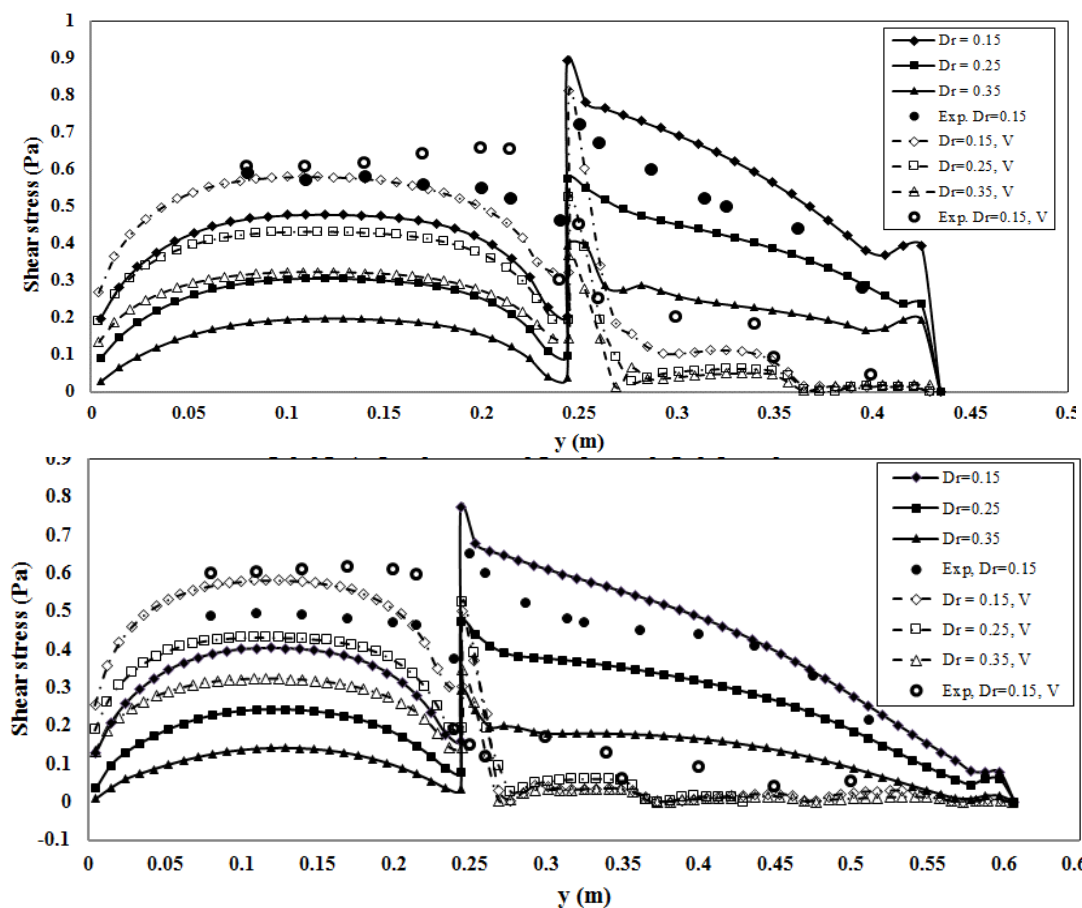
شکل ۱۲- منحنی های هم مقدار شدت آشفته گی در عمق نسبی ۰/۳۵

تنش برشی در بستر سیلابدشت بسیار کم و نزدیک به صفر است. این پدیده هم در مقطع میانی و هم در مقطع انتهایی واگرایی مشهود است. علت آن، همان مقاومت پوشش گیاهی در مقابل عبور جریان و کم شدن سرعت و به تبع آن کم شدن تنش برشی است. در شکل ۱۴ مقادیر آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داده شده است. روند نتایج عددی در پیش بینی تنش برشی در کانال اصلی با مشاهدات آزمایشگاهی همسو است. در مشاهدات آزمایشگاهی نیز مقدار تنش برشی در سیلابدشت در حالت وجود پوشش گیاهی چه در مقطع میانی و چه در مقطع انتهایی بسیار کم است.

نتایج تحقیق آزمایشگاهی یونسی و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد با افزایش عمق نسبی از میزان تنش برشی کاسته می شود و با عبور جریان از ابتدای محدوده واگرایی، از مقدار تنش برشی کاسته شده و این روند در انتهای محدوده واگرایی به حداقل مقدار خود می رسد. همچنین در مطالعات فیزیکی و عددی نجفیان و همکاران (۱۳۹۵) مشاهده شد که افزایش عمق نسبی موجب کاهش گرادیان تنش برشی در محل اتصال کانال اصلی به سیلابدشت می شود. لذا مطالعه عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. شکل ۱۴ نشان می دهد در حالت وجود پوشش گیاهی، مقدار



شکل ۱۳- منحنی‌های هم مقدار شدت آشفتنگی با تغییر عمق نسبی در پایین دست پوشش گیاهی



شکل ۱۴- توزیع تنش برشی در مقاطع عرضی میانی و انتهایی محدوده واگرایی برای کف کانال اصلی و سیلابدشت در اعماق نسبی مختلف

مشترک کانال اصلی و سیلابدشت رخ داده است. بکارگیری مدل آشفتنگی دو معادله‌ای  $k-E$  می‌تواند از عوامل ایجاد خطای پیش‌بینی تنش برشی باشد، لذا استفاده از دیگر مدل‌های آشفتنگی و مقایسه

در حالت وجود پوشش گیاهی خطای نسبی مدل عددی در پیش-بینی تنش برشی نسبت به مدل آزمایشگاهی در مقطع میانی و انتهایی به ترتیب ۱۷ و ۲۴ درصد می‌باشد. بیشترین خطا در مرز

سیال در کانال های غیر منشوری مرکب. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۳): ۲۷۰-۲۸۰

صمدی رحیم، ع.، یونسی، ح.، شاهی نژاد، ب. و ترابی پور، ح. ۱۳۹۹. ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر پوشش گیاهی سیلابدشت بر روی هیدرولیک جریان در آبراهه های مرکب واگرا. مجله هیدرولیک. ۱۶(۱): ۱۱۱-۱۳۰.

نجفیان، ش.، یونسی، ح.، پارسایی، ع. و ترابی پور، ح. ۱۳۹۵. مدلسازی فیزیکی و عددی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلابدشت های غیرمنشوری و زیر. مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، (۶۶): ۸۷-۱۰۴

یونسی ح.، امید م. ح. و ایوب زاده س. ع. ۱۳۹۴. اثر زبری سیلابدشت بر هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلابدشت غیرمنشوری. مجله پژوهش آب ایران، (۲): ۹: ۷۲-۶۳

Barman, J. and Kumar, B. 2022. Flow behavior in a multi-layered vegetated floodplain region of a compound channel. *Ecohydrology*. 15 (4): e2427.

Dupuis, V., Proust, S., Berni, C. and Paquier, A. 2017. Mixing layer development in compound channel flows with submerged and emergent rigid vegetation over the floodplains. *Experiments in Fluids*. 58 (4): 30.

Flow Science Inc., 2016. FLOW-3D V 11.2 User's Manual. Santa Fe, New Mexico.

Kara, S., Stoesser, T. and Sturm, T. W. 2012. Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows. *Journal of hydraulic research*. 50(5): 482-493.

Kaziot, A. P. 2013. Three-Dimensional turbulence intensity in a compound channel. *Journal of hydraulic engineering*. 139(8): 852-864.

Mudde, R. F., Deutz, L., Nievarart, V. A. and Mannen, H. R. E. 2016. LDA-Measurements of the turbulence in and around a venture. *Engineering turbulence modelling and experiments 6. Proceedings of the ERCOFTAC international symposium on engineering turbulence modelling and Measurements, ETMM6, Sardinia, Italy, 23-25 May, 511-520.*

Rezaei, B. and Seif, M. M. 2022 Numerical study of flow in skewed compound channel using k-ε turbulence model. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 46: 3919-3929.

Rezaei, B. and Safarzade, A. 2016. Numerical modeling of flow field in prismatic compound channels with different floodplain widths. *Journal of applied*

نتایج آن با نتایج پژوهش حاضر، برای مطالعات آتی پیشنهاد می گردد.

## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، اثر پوشش گیاهی در اعماق نسبی متفاوت بر ویژگی های جریان آشفتنه در مقاطع مرکب غیرمنشوری با استفاده از نرم افزار Flow 3D بررسی شده است. صحت سنجی مدل عددی نشان داد مدل عددی می تواند درک درستی از خصوصیات سه بُعدی جریان آشفتنه در این گونه مقاطع ارائه دهد. بررسی نتایج مدل عددی نشان داد برخورد جریان با پوشش گیاهی منجر به کاهش سرعت جریان در سیلابدشت شده است. در نبود پوشش گیاهی، ورود جریان به سیلابدشت از بیشینه سرعت در کانال اصلی می کاهد، اما سرعت جریان در کانال اصلی همواره از کانال سیلابدشت بیشتر است. در کانال مرکب، افزایش عمق نسبی منجر به کاهش تنش برشی شده است، اما بیشینه تنش برشی در مرکز کانال اصلی و سیلابدشت رخ داده است. در ابتدای محدوده واگرایی تنش برشی بیشتر و تا انتهای واگرایی به تدریج کاهش می یابد. با برخورد جریان با پوشش گیاهی سرعت جریان و سرعت برشی بسیار کم و نزدیک صفر است و تأثیر پوشش گیاهی در کاهش سرعت برشی بیشتر از اثر عمق نسبی است. بررسی شدت آشفتگی نشان داد در عمق نسبی ثابت، شدت آشفتگی در قسمتهای میانی کانال اصلی کمترین مقدار و در کناره ها و نزدیک جدارها دارای بیشترین مقدار است. همچنین شدت آشفتگی در مرکز و نزدیکی کف سیلابدشت از مقدار آن در مرکز کانال اصلی بیشتر است. اما با وجود پوشش گیاهی شدت آشفتگی در حد صفر است.

## مراجع

احمدی دهرشید، ف.، یاسی، م. و حیدری، م. ۱۴۰۱. مطالعه عددی خصوصیات جریان در آبراهه روباز مرکب با پوشش گیاهی لایه ای ناهمگون در سیلابدشت. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۳(۱۱): ۲۵۳۱-۲۵۱۵.

احمدی دهرشید، ف.، حیدری، م.، یاسی، م. و خوش کنش، ع. ۱۴۰۲. اثر پوشش گیاهی ناهمگون در نوار کناری سیلابدشت بر ساختار جریان و تلاطم در آبراهه روباز مرکب. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۷(۳): ۴۹۱-۴۷۹.

حمیدی فر، ح.، امید، م. و کشاورزی، ع. ۱۳۹۲. ساختار جریان و آشفتگی در آبراهه های مرکب تحت تأثیر پوشش گیاهی صلب سیلابدشت. مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی. ۱۴(۳): ۶۶-۵۱

شکری، م. و مهدی پور، ر. ۱۴۰۰. مدل سازی عددی تاثیر زوایای متفاوت بازشدگی سیلابدشت ها بر توزیع تنش برشی و سرعت

- Theoharris, k. and Panagiotis, P. 2016. Reynolds stress modelling of flow in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of applied water engineering and research*. p. 1-11.
- Zeng, C., Bai, Y., Zhou, J., Qiu, F., Ding, S., Hu, Y. and Wang, L. 2022. Large Eddy Simulation of Compound Open Channel Flows with Floodplain Vegetation. *Water*. 4: 3951.
- research in water and wastewater. 6: 260-270.
- Samadi Rahim, A., Yonesi, H., Rahimi, H. R.; Shahinejad, B., Torabi Podeh, H. and Azamathulla, H.M. 2023. Effect of vegetation on flow hydraulics in compound open channels with non-prismatic floodplains. *AQUA. Water Infrastructure, Ecosystems and Society*. 72 (5): 781–797
- Sun, X. and Shiono, K. 2009. Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound open channel. *Advances in Water Resources*. 32(3): 430–438.

## Numerical Study of Flow Field and Turbulence in a Compound Channel with Diverging Floodplain with Vegetation

F. Mahmoodi Monfared<sup>1</sup>, H. Younesi<sup>2\*</sup>, M. Rostamabadi<sup>3</sup>

Received: Jul.26, 2024

Accepted: Aug.31, 2024

### Abstract

Vegetation in the flood plains is effective on the turbulent flow of compound channels, especially in flood conditions where the flow depth changes. Numerical simulation is very useful in investigating the effect of vegetation on turbulent flow. In the present study, the numerical simulation of the flow in the diverging floodplain of compound channel in two cases with and without vegetation at different relative depths has been done using the Flow3D numerical model. The results showed that the flow velocity in the main channel is always higher than that of floodplain. The collision of the flow with the vegetation has led to a decrease in the velocity in floodplain compared to the state without vegetation. Investigation of turbulence parameters showed that the highest value of shear velocity occurred at the common border of the main channel and the floodplain, but with the increase in relative depth, the value of shear velocity and shear stress decreased. Also, at a fixed relative depth, the turbulence intensity is the highest near the walls and the lowest in the middle parts of the main channel. The investigation of the downstream of the divergence area showed that in the case of vegetation, the turbulence intensity is the highest in the center line of the floodplain channel and near the free surface, while in the absence of vegetation, the highest turbulence intensity occurred near the bottom of the floodplain.

**Keywords:** Divergence Floodplain, Flow3D, Relative Depth, Vegetation

1- M. Sc student of hydraulic structures, Department of water engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Buin Zahra Branch, Buin Zahra, Iran

(\*-Corresponding author, Email: yonesi.h@lu.ac.ir)