

مقاله علمی-پژوهشی

## اثر پوشش گیاهی ناهمگون در نوار کناری سیلابدشت بر ساختار جریان و تلاطم در آبراهه روباز مرکب

فریبا احمدی دهرشید<sup>۱</sup>، مجید حیدری<sup>۲\*</sup>، مهدی یاسی<sup>۳</sup>، علیرضا خوش کنش<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸

### چکیده

پوشش گیاهی سیلابدشت می‌تواند خصوصیات جریان رودخانه را با اعمال یک نیروی کشانه اضافی تغییر دهد. در این پژوهش، ساختار جریان و خصوصیات تلاطم تحت اثر پوشش گیاهی دولایه ناهمگون در نوار کناری سیلابدشت‌های یک کانال مرکب مطالعه شد. در مطالعه این پدیده، از یک مدل عددی سه بعدی برای حل معادلات ناویر استوکس و ردیابی سطح آزاد استفاده شد. برای اطمینان از عملکرد مدل، نتایج عددی با استفاده از داده‌های مطالعات آزمایشگاهی پیشین اعتبارسنجی شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که این مدل دقت بالایی در بازتولید خصوصیات دینامیکی جریان دارد. در گام بعدی، مدل در پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد و میدان سرعت جریان ماندگار در ناحیه دارای پوشش گیاهی سیلابدشت مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که شکل‌گیری گردان سرعت در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت، منجر به توسعه جریان‌های ثانویه و انتقال جرم و مومنتوم در این ناحیه می‌شود. همچنین، انرژی جنبشی تلاطم و اتلاف انرژی جریان عبوری از ناحیه دارای پوشش گیاهی در سیلابدشت نسبتاً زیاد است، بنابراین نتیجه‌گیری شد که پوشش گیاهی ناهمگون می‌تواند موجب افزایش تلاطم و اتلاف انرژی جنبشی جریان شود. مقادیر بیشینه پارامترهای انرژی جنبشی تلاطم و شدت تلاطم در فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی رخ داد. بنابراین، تلاطم قابل ملاحظه در فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی می‌تواند انتقال جرم و مومنتوم را در این ناحیه تقویت کند.

**واژه‌های کلیدی:** آبراهه مرکب، انرژی جنبشی تلاطم، پروفیل سرعت، پوشش گیاهی لایه‌ای، شدت تلاطم

### مقدمه

تنوع زیستی شود (Nepf & Nepf and Vivoni, 2000; Ghisalberti, 2008; Curran and Hession, 2013; Gu et al., 2019; Zhang et al., 2021). انواع مختلفی از پوشش گیاهی در امتداد آبراهه‌های طبیعی رشد می‌کنند و گاهی اوقات نیز آنها را به منظور اقدامات مهندسی یا نیازهای اکولوژیکی کاشت می‌کنند (Chembolu et al., 2019). براساس راهبرد جدید بخش آب سازمان ملل (UN Water 2018)، مبنی بر "راه‌حل‌های طبیعی برای حل مسائل آب جهان" (NBSW: Nature-based solution for water)، حفاظت رودخانه از طریق ایجاد نوار سبز (با حضور درختان) در ساحل بالای آبراهه اصلی مورد تأکید قرار گرفته است. با این رویکرد، مطالعات جهت حفاظت بستر اصلی رودخانه، پیوستگی آبراهه اصلی و سیلابدشت، کنترل سیلاب، و بهبود کیفیت آب‌های ورودی به رودخانه، گسترش یافته است (شکل ۱). پوشش گیاهی موجود در کناره‌های سواحل مقاومت در برابر جریان را به دلیل کشانه (Drag) اضافی ایجاد شده افزایش می‌دهد. در نتیجه پوشش گیاهی

حضور پوشش گیاهی در آبراهه‌ها و تأثیر آن بر ساختار جریان بسیار مورد توجه محققین می‌باشد، زیرا پوشش گیاهی می‌تواند باعث بهبود کیفیت آب، پایدارسازی کناره‌های آبراهه و کاهش فرسایش سواحل و همچنین فراهم نمودن محیط مناسب برای ایجاد زیستگاه و

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

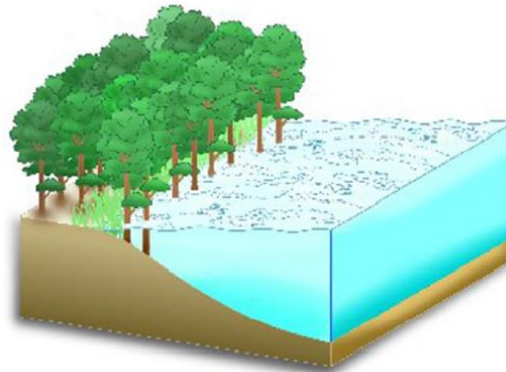
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: mheydari@basu.ac.ir)

بر توزیع سرعت متوسط جریان، تنش‌های رینولدز و شدت تلاطم تاثیر می‌گذارد ( Nepf & Vivoni, 2000; Lopez & Garcia, 2001; Tang & Knight, 2009; Zhao & Huai, 2016; Tang, 2019).



شکل ۱- طرحی از رودخانه طبیعی دارای پوشش گیاهی در کناره سیلابدشت (Zhang et al., 2022)

در مطالعات پیشین عموماً به صورت آزمایشگاهی ساختار جریان تحت تاثیر پوشش گیاهی یک لایه (پوشش گیاهی با یک ارتفاع ثابت) که با استفاده از استوانه‌های مصنوعی از نوع صلب یا انعطاف‌پذیر شبیه‌سازی شده بود، بررسی شده است و همچنین در این مطالعات شرایط جریان به صورت غیرمستغرق یا کاملاً مستغرق مورد بررسی قرار گرفته است (Carollo et al., 2002; Stone & Shen, 2002; Tang & Knight, 2009; Tang & Ali, 2013; Yang et al., 2020; Yan et al., 2020). همچنین ساختار جریان در آبراهه‌های دارای پوشش گیاهی (یک لایه و دو لایه) از طریق مدل‌سازی عددی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با استفاده از نرم-افزارهای تجاری مانند FLUENT و FLOW-3D نیز بررسی شده است (Lopez & Garcia, 2001; Neary, 2003; Souliotis & Prinos, 2011; Zeng & Li, 2014; Anjum et al., 2018; Anjum & Tanaka, 2020; Rahimi et al., 2020a; Dehrashid et al., 2022). در نواحی ساحلی آبراهه‌ها، انواع مختلف پوشش گیاهی با ارتفاع‌های گوناگون مانند علف‌ها، درختچه‌ها و درختان وجود دارد که اغلب پوشش گیاهی با ارتفاع کوتاه‌تر مستغرق و پوشش گیاهی با ارتفاع بلندتر غیرمستغرق است. بنابراین، در این شرایط ساختار جریان به دلیل اندرکنش بین جریان و پوشش گیاهی ناهمگون بسیار پیچیده می‌شود. برای درک تاثیر پوشش گیاهی ناهمگون دولایه بر ساختار جریان، چندین مطالعه آزمایشگاهی در یک کانال روباز با بستر کاملاً پوشیده شده توسط پوشش گیاهی با دو ارتفاع مختلف انجام شده است (Liu et al., 2010; Anjum et al., 2018; Tang et al., 2018 and 2019; Rahimi et al., 2020a and 2020b). تانگ و همکاران نیز آزمایش‌هایی را جهت بررسی ساختار جریان تحت تاثیر پوشش گیاهی دو لایه در یک کانال که نیمی از بستر پوشیده از پوشش گیاهی است، انجام دادند (Tang et al., 2019).

## مواد و روش‌ها

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) روشی برای شبیه‌سازی پروسه جریان است که در آن معادلات استاندارد جریان مانند معادلات ناویر-استوکس گسسته‌سازی می‌شوند و برای هر سلول محاسباتی حل می‌شوند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از یک نرم‌افزار، از جهات زیادی شبیه به انجام آزمایش است. اگر در یک آزمایش، شرایط آزمایشگاهی نتواند آن‌طور که باید، شرایط واقعی را توصیف کند، نتایج به‌دست آمده از آزمایش نیز بازگو کننده نتایج واقعی نخواهند بود. در شبیه‌سازی عددی نیز چنانچه شرایط معرفی شده به مدل عددی مناسب نباشد، نتایج قابل استناد نخواهد بود. در پژوهش حاضر ساختار جریان در آبراهه مرکب دارای پوشش گیاهی دو لایه در نوار کناری سیلابدشت با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شد. FLOW-3D یک نرم‌افزار قوی و جامع در زمینه دینامیک سیالات

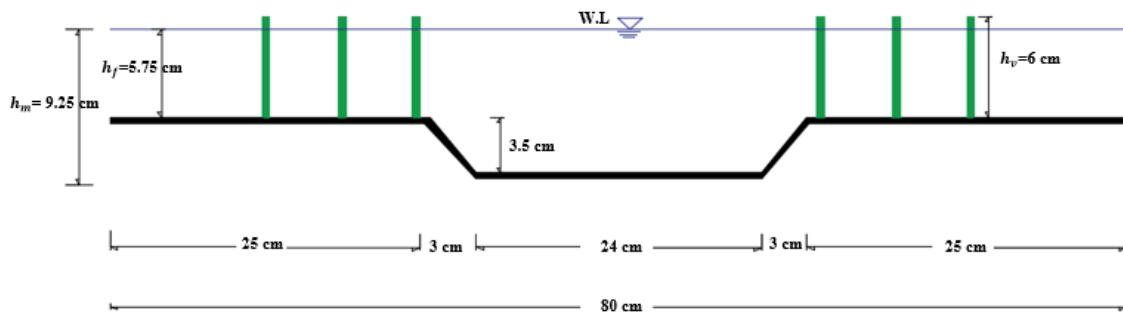
در مطالعات پیشین عموماً به صورت آزمایشگاهی ساختار جریان تحت تاثیر پوشش گیاهی یک لایه (پوشش گیاهی با یک ارتفاع ثابت) که با استفاده از استوانه‌های مصنوعی از نوع صلب یا انعطاف‌پذیر شبیه‌سازی شده بود، بررسی شده است و همچنین در این مطالعات شرایط جریان به صورت غیرمستغرق یا کاملاً مستغرق مورد بررسی قرار گرفته است (Carollo et al., 2002; Stone & Shen, 2002; Tang & Knight, 2009; Tang & Ali, 2013; Yang et al., 2020; Yan et al., 2020). همچنین ساختار جریان در آبراهه‌های دارای پوشش گیاهی (یک لایه و دو لایه) از طریق مدل‌سازی عددی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با استفاده از نرم-افزارهای تجاری مانند FLUENT و FLOW-3D نیز بررسی شده است (Lopez & Garcia, 2001; Neary, 2003; Souliotis & Prinos, 2011; Zeng & Li, 2014; Anjum et al., 2018; Anjum & Tanaka, 2020; Rahimi et al., 2020a; Dehrashid et al., 2022). در نواحی ساحلی آبراهه‌ها، انواع مختلف پوشش گیاهی با ارتفاع‌های گوناگون مانند علف‌ها، درختچه‌ها و درختان وجود دارد که اغلب پوشش گیاهی با ارتفاع کوتاه‌تر مستغرق و پوشش گیاهی با ارتفاع بلندتر غیرمستغرق است. بنابراین، در این شرایط ساختار جریان به دلیل اندرکنش بین جریان و پوشش گیاهی ناهمگون بسیار پیچیده می‌شود. برای درک تاثیر پوشش گیاهی ناهمگون دولایه بر ساختار جریان، چندین مطالعه آزمایشگاهی در یک کانال روباز با بستر کاملاً پوشیده شده توسط پوشش گیاهی با دو ارتفاع مختلف انجام شده است (Liu et al., 2010; Anjum et al., 2018; Tang et al., 2018 and 2019; Rahimi et al., 2020a and 2020b). تانگ و همکاران نیز آزمایش‌هایی را جهت بررسی ساختار جریان تحت تاثیر پوشش گیاهی دو لایه در یک کانال که نیمی از بستر پوشیده از پوشش گیاهی است، انجام دادند (Tang et al., 2019).

متر انجام دادند. شیب کف کانال ثابت و برابر با  $1/1000$  است. عرض کف آبراهه اصلی  $0.24$  متر، عرض بالایی آبراهه اصلی  $0.3$  متر و عرض سیلابدشت‌های دو طرف آن  $0.25$  متر است (شکل ۲). پوشش گیاهی توسط استوانه‌های صلب به قطر  $0.12$  (D) متر و با ارتفاع  $h_v$  ثابت  $0.06$  متر در نوار کناری سیلابدشت‌های کانال مرکب قرار داده شده‌اند (شکل ۲). نحوه چیدمان استوانه‌ها به صورت زیگزاگی بوده و با تراکم  $\lambda_{veg} = 1 \text{ m}^{-1}$  کنار هم قرار گرفته‌اند. فاصله طولی و عرضی بین استوانه‌ها ( $\Delta S$ ) معادل  $0.055$  متر است. خلاصه‌ای از شرایط آزمایشگاهی مطالعه تاکیویا و همکاران در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول  $\lambda_{veg}$  تراکم پوشش گیاهی، D قطر پوشش گیاهی،  $h_v$  ارتفاع پوشش گیاهی،  $\Delta S$  فاصله بین استوانه‌های پوشش گیاهی، Q بده، U سرعت متوسط، Fr عدد فرود و  $Re^*$  عدد رینولدز جریان است.

محاسباتی می‌باشد که از روش تفاضل محدود (یا حجم محدود) جهت حل معادله‌های حاکم بر حرکت سیال (معادلات ناویر-استوکس) استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار پنج مدل تلاطمی مختلف طول اختلاط پرانتل، مدل یک معادله‌ای، مدل دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) برای حل خصوصیات جریان‌های متلاطم استفاده می‌شود. در نرم‌افزار FLOW-3D از دو تکنیک عددی روش حجم سیال (VOF) و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی هندسی با به کارگیری تقریب احجام محدود استفاده می‌شود (Khoshkonesh et al., 2022).

### داده‌های آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی مدل عددی

اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تاکیویا و همکاران انجام شد (Takuya et al., 2014). آنها آزمایش‌ها را در یک کانال مرکب دوزنقه‌ای مستقیم به طول  $4/8$  متر و عرض  $0.8$



شکل ۲- برش از مقطع مدل آزمایشگاهی (Takuya et al., 2014)

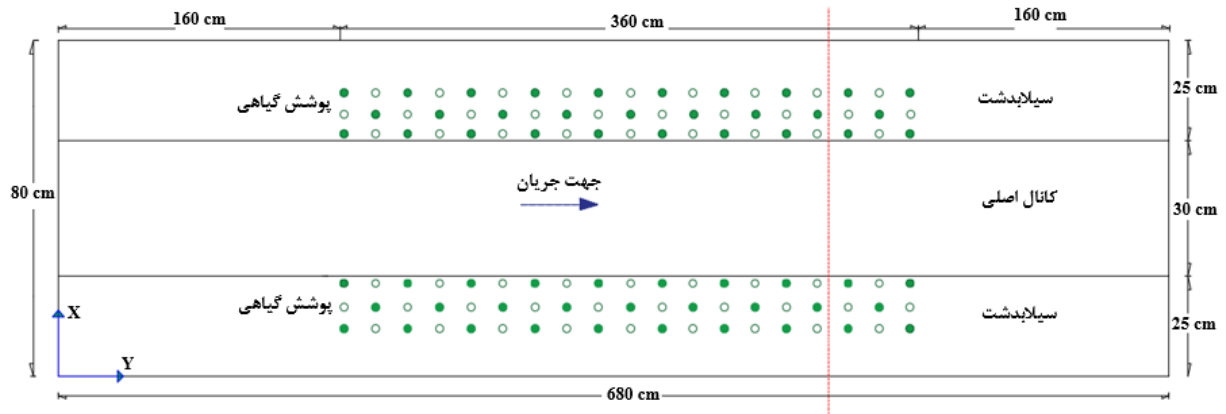
جدول ۱- مشخصات جریان در مدل فیزیکی کانال مرکب با پوشش گیاهی (Takuya et al., 2014)

عدد رینولدز جریان $Re^*$	عدد فرود Fr	سرعت متوسط U (m/s)	بده Q (l/s)	فاصله بین استوانه‌های پوشش گیاهی $\Delta S$ (m)	ارتفاع پوشش گیاهی $h_v$ (m)	قطر پوشش گیاهی D (m)	تراکم پوشش گیاهی $\lambda_{veg}$ ( $m^{-1}$ )	عمق آب در آبراهه اصلی $h_m$ (cm)	عمق آب در سیلابدشت $h_f$ (cm)	شرایط جریان
۱۲۵۰۷	۰/۲۲	۰/۱۸۱	۱۰	۰/۰۵۵	۰/۰۶	۰/۰۱۲	۱	۹/۲۵	۵/۷۵	غیر مستغرق

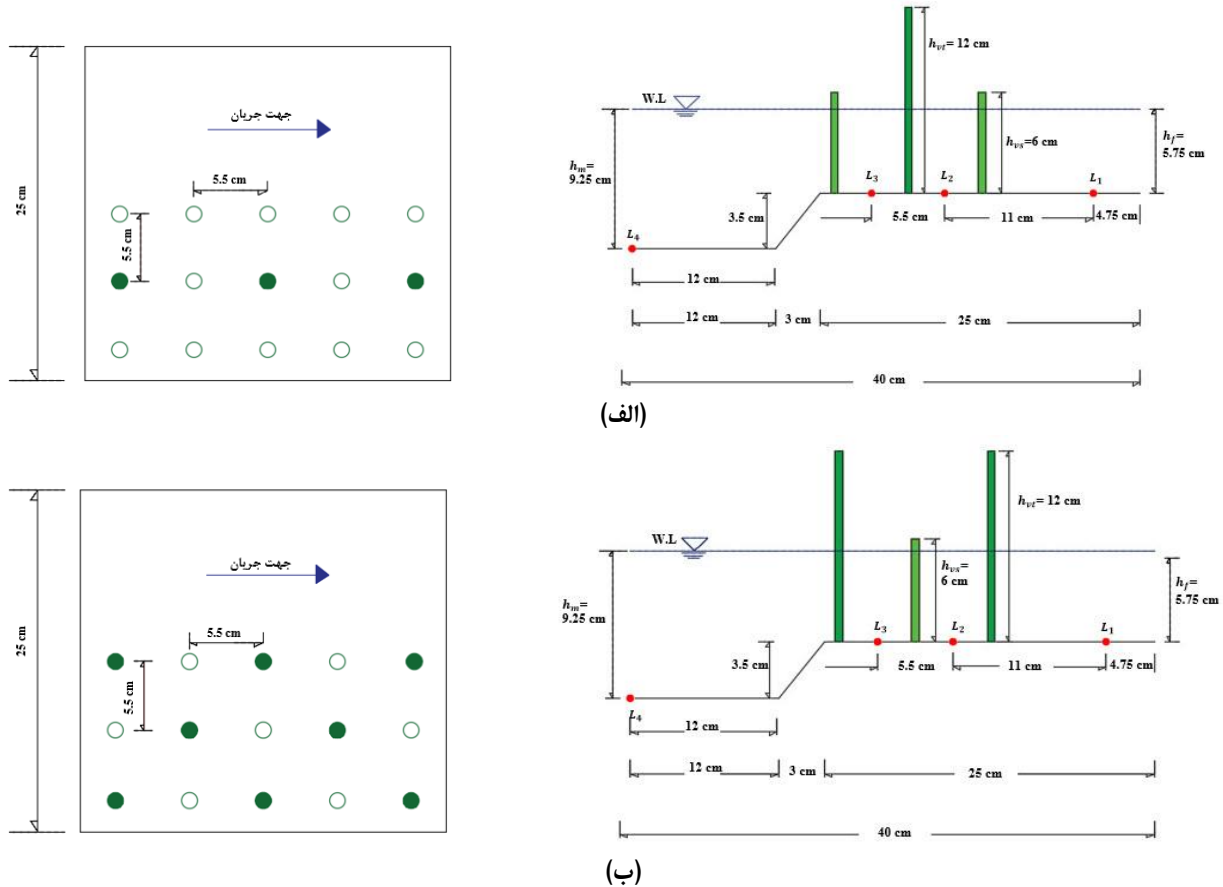
استوانه‌هایی با قطر یکسان ۱۲ میلی‌متر و دو ارتفاع ۶ و ۱۲ سانتی‌متر که به ترتیب نشان‌دهنده پوشش گیاهی با ارتفاع کوتاه و پوشش گیاهی با ارتفاع بلند می‌باشد، طراحی شد. آرایش استوانه‌ها به دو صورت زیگزاگی و خطی (شکل ۴) در نوار کناری سیلابدشت در نظر گرفته شد. طراحی چیدمان‌های پوشش گیاهی بر اساس این واقعیت است که پوشش گیاهی در آبراهه‌های طبیعی دارای ارتفاع‌های متفاوت هستند و پوشش گیاهی بلندتر اغلب در نزدیکی ساحل رودخانه، و پوشش گیاهی کوتاه‌تر بیشتر در قسمت داخلی آبراهه مشاهده می‌شوند (Nepf et al., 2007).

### تنظیمات مدل عددی در پژوهش حاضر

برای تهیه هندسه کانال مرکب دارای پوشش گیاهی از نرم‌افزار AutoCad استفاده شد. در پژوهش حاضر، ابعاد کانال مشابه ابعاد فلوم آزمایشگاهی تحقیق تاکیویا و همکاران در نظر گرفته شد با این تفاوت که ۱ متر به ابتدای کانال جهت تامین فاصله دو برابر عرض کانال ( $1/6$ ) متری جهت تامین توسعه یافتگی جریان قبل از رسیدن به ناحیه پوشش گیاهی و همچنین ۱ متر به انتهای کانال جهت جلوگیری از تاثیر جریان خروجی بر الگوهای جریان، بیشتر در نظر گرفته شد (شکل ۳). پوشش گیاهی در نوار کناری سیلابدشت توسط



شکل ۳- نمای کانال مرکب دارای پوشش گیاهی با چیدمان شماره ۲ در نوار کناری سیلابدشت‌ها در مدل شبیه‌ساز (دایره‌های توپر نشان‌دهنده استوانه‌های بلند و دایره‌های توخالی نشان‌دهنده استوانه‌های کوتاه می‌باشند)



شکل ۴- برش از مقطع و چیدمان مختلف پوشش گیاهی سیلابدشت در مدل‌های شبیه‌ساز در شرایط جریان غیر مستغرق در نصف عرض کانال (الف) چیدمان شماره ۱ و (ب) چیدمان شماره ۲ (دایره‌های توپر نشان‌دهنده استوانه‌های بلند و دایره‌های توخالی نشان‌دهنده استوانه‌های کوتاه می‌باشند)

جدول ۲- فاصله و نوع آرایش استوانه‌ها و شرایط هیدرولیکی جریان در ساخت مدل عددی تحقیق حاضر

چیدمان	شرایط جریان	قطر پوشش گیاهی D (mm)	بده Q(l/s)	فاصله بین	
				آرایش استوانه‌های پوشش گیاهی	استوانه‌های پوشش گیاهی
				بلند	کوتاه
چیدمان شماره ۱	غیر مستغرق	۱۲	۱۰		
	نیمه مستغرق	۱۲	۱۸	خطی	خطی
	کاملاً مستغرق	۱۲	۲۸		
چیدمان شماره ۲	غیر مستغرق	۱۲	۱۰		
	نیمه مستغرق	۱۲	۱۸	زیگزاگی	زیگزاگی
	کاملاً مستغرق	۱۲	۲۸		

میانگین مطلق خطای پیش‌بینی شده  $(MAPE)^3$  و ضریب تبیین  $(R^2)$  استفاده شد (روابط ۱-۴). در این روابط  $n$  تعداد کل داده‌ها،  $obs_i$  مقادیر مشاهداتی و  $com_i$  مقادیر محاسباتی است. با توجه به نتایج سرعت متوسط عمقی بدست آمده از مدل عددی و مقایسه با نتایج مدل فیزیکی و محاسبه‌ی خطاها (جدول ۳) مشاهده شد که مدل تلاطمی RNG دارای خطای کمتر و ضریب تبیین بیشتری نسبت به دو مدل تلاطمی LES و  $k - \epsilon$  می‌باشد، از این رو مدل تلاطمی RNG برای سایر شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. این مدل توسط محققین مختلف و راهنمای نرم‌افزار نیز به عنوان بهترین مدل تلاطمی و پیش‌فرض نرم‌افزار معرفی شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((obs_i - com_i)^2 / n)}{n}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |obs_i - com_i| \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{obs_i - com_i}{obs_i} \right| \times 100 \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - com_i)^2}{\sum_{i=1}^n obs_i^2} \quad (4)$$

با توجه به همگرایی نتایج مدت زمان شبیه‌سازی تا رسیدن به شرایط پایداری ۱۰۰ ثانیه بود. شرایط مرزی در ورودی بده حجمی، در خروجی فشار مشخص همراه با تعیین تراز سطح آب، شرط مرزی تقارن برای مرز بین بلوک‌ها و سطح آزاد جریان و شرط مرزی دیوار برای جداره‌ها انتخاب شد. چهار اندازه شبکه مختلف جهت تحلیل حساسیت شبکه مورد آزمون قرار گرفت. به این منظور در شبیه‌سازی‌های حساسیت‌سنجی سه بلوک با دو اندازه شبکه متفاوت در نظر گرفته شد. از این رو اندازه شبکه در بلوک‌های اول و سوم یعنی نواحی فاقد پوشش گیاهی برابر با ۰/۰۱ متر و در بلوک دوم یعنی محل

شبیه‌سازی‌ها در سه حالت جریان کاملاً مستغرق برای در نظر گرفتن شرایط سیلابی (هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند کاملاً مستغرق)، نیمه مستغرق (پوشش گیاهی کوتاه مستغرق و پوشش گیاهی بلند غیر مستغرق) و غیر مستغرق جهت در نظر گرفتن پایین بودن سطح آب آبراهه (هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند غیرمستغرق) انجام شد (شکل ۴). بر اساس پژوهش یانگ و همکاران نقاط کنترلی مهم L1 الی L4 روی مقطع X (شکل ۴) جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های جریان انتخاب شدند (Yang et al. 2007). این نقاط در ناحیه فاقد پوشش گیاهی در سیلابدشت (L1)، نوار کناری سیلابدشت در میان پوشش گیاهی کوتاه و بلند (L2 و L3) و همچنین در خط مرکزی آبراهه اصلی در امتداد عرض کانال (L4) قرار دارند. شرایط هیدرولیکی جریان در تحقیق حاضر و فاصله و نوع آرایش استوانه‌ها در چیدمان‌های شماره ۱ و ۲ در جدول (۲) ارائه شده است.

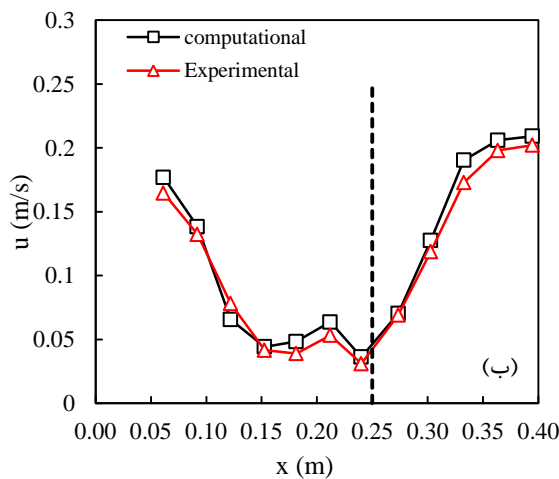
برای داشتن انتخابی دقیق‌تر در مورد شبیه‌سازی پیش‌رو پارامتر مدل تلاطمی به عنوان یکی از موارد صحت‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. به عبارتی در این پژوهش از مدل‌های تلاطمی ارائه شده در Flow-3D، مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k - \epsilon$ ، مدل RNG و مدل LES مورد ارزیابی قرار گرفتند. اما از مدل طول اختلاط پراتل به دلیل فرضیات محدود کننده‌اش و مدل تک معادله‌ای انرژی تلاطم به دلیل اینکه کاربرد آن عمدتاً محدود به لایه‌های برشی است و تعیین تجربی توزیع مقیاس طول در جریان‌های پیچیده‌تر مشکل می‌باشد، استفاده نشد. جهت بررسی دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌های تلاطمی و انتخاب بهترین مدل از معیارهای مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE)، میانگین مطلق خطا<sup>۲</sup> (MAE)، درصد

1- Root Mean Squared Error (RMSE)

2- Mean Absolute Error (MAE)

3- Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

محور افقی فاصله عرضی در جهت  $x$  در نصف عرض کانال را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر سرعت در نواحی فاقد پوشش گیاهی در سیلابدشت (یعنی ناحیه  $0 < x < 0.15$  m) و کانال اصلی (یعنی ناحیه  $0.4 < x < 0.25$  m) بیشتر از سرعت در ناحیه دارای پوشش گیاهی در سیلابدشت (یعنی ناحیه  $0.15 < x < 0.25$  m) است. این نتیجه بیانگر این واقعیت است که حضور پوشش گیاهی در نوار کناری سیلابدشت سبب ایجاد مقاومت اضافی در برابر جریان و در نتیجه کاهش سرعت جریان در سیلابدشت و افزایش گرادبان سرعت بین کانال اصلی و سیلابدشت می‌گردد. این کاهش سرعت سبب کاهش ظرفیت انتقال جریان در سیلابدشت و با توجه به قانون پیوستگی سبب افزایش ظرفیت انتقال جریان در آبراهه اصلی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های محاسباتی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. با این حال، مدل عددی با یک تفاوت جزئی نتایج را بیش برآورد می‌کند، که با توجه به پایین بودن مقادیر خطا (جدول ۳) می‌توان بیان کرد که مدل عددی حاضر اعتبار خوبی دارد و این مقدار خطا قابل قبول است.



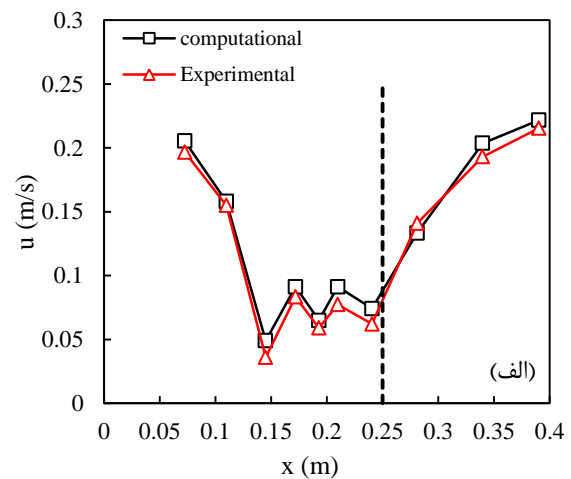
سیلابدشت‌های دارای پوشش گیاهی برابر با  $0.01$ ،  $0.012$ ،  $0.008$  و  $0.006$  متر جهت حساسیت‌سنجی تاثیر شبکه در نظر گرفته شد. با توجه به بررسی نتایج عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، اندازه شبکه  $0.06$  متر دارای خطای کمتر و دقت بیشتر نسبت به سایر اندازه شبکه‌ها بود.

جدول ۳- محاسبه خطای مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در پیش‌بینی سرعت متوسط عمقی در جهت جریان در مدل‌های تلاطمی مختلف

مدل تلاطمی	معیار خطا	RMSE	MAE	MAPE	R <sup>2</sup>
LES		۰/۰۴۵۴	۰/۰۴۱۰	۵۳/۳۰۰	۰/۸۱۲
RNG		۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۴۲	۱۷/۳۰۲	۰/۹۰۲
$k-\epsilon$		۰/۰۶۱۲	۰/۰۵۲۸	۸۳/۱۲۴	۰/۶۹۰

## نتایج و بحث

مقایسه مقادیر پارامترهای سرعت سطحی و سرعت متوسط عمقی در جهت جریان در مدل فیزیکی و مدل عددی در شکل (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده است. محور عمودی سرعت جریان و



شکل ۵-مقایسه نتایج مدل فیزیکی و مدل عددی (الف) سرعت سطحی (ب) سرعت متوسط عمقی در نیمه عرض کانال (خط چین‌ها محل شروع سیلابدشت را نشان می‌دهند)

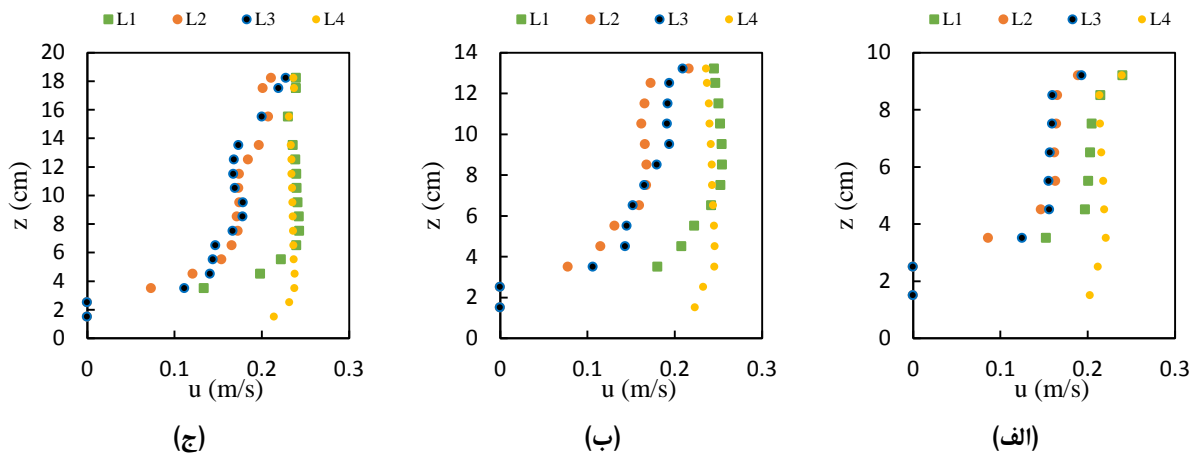
نواحی دارای پوشش گیاهی در سیلابدشت (L2-L3) مشاهده شد. همانطور که در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود سرعت جریان در هر دو چیدمان و در هر سه حالت شرایط جریان (غیرمستغرق، نیمه مستغرق و کاملا مستغرق) در نوار کناری سیلابدشت که دارای پوشش گیاهی است کاهش یافته، اما در ناحیه فاقد پوشش گیاهی سیلابدشت (L1) و ناحیه آبراهه اصلی (L4) بیشتر از مقدار سرعت در کناره‌ی سیلابدشت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حضور پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها بر توزیع سرعت اثر گذاشته و مقاومت

## پروفیل توزیع سرعت متوسط عمقی در جهت جریان

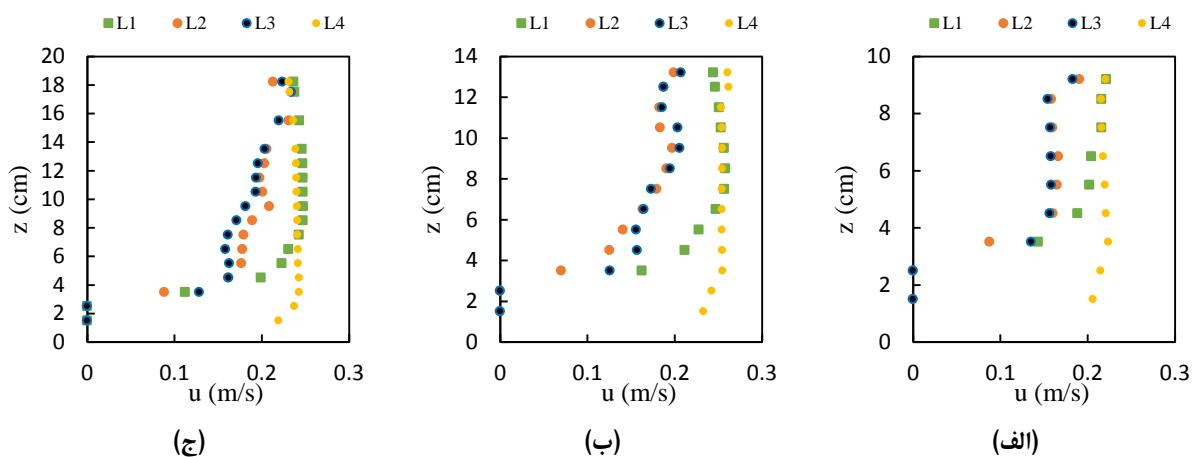
شکل‌های (۶) و (۷) پروفیل‌های توزیع سرعت متوسط عمقی در جهت جریان ( $u$ ) به ترتیب برای چیدمان‌های شماره ۱ و ۲ در شرایط جریان مختلف در نقاط کنترلی (L1 الی L4) را ارائه می‌دهند. محور افقی نشان‌دهنده سرعت جریان ( $u$ ) بر حسب متر بر ثانیه و محور عمودی نشان‌دهنده فاصله نقاط برداشت سرعت از کف کانال تا سطح آب بر حسب سانتی‌متر است. تفاوت‌های قابل توجهی بین سرعت در کانال اصلی (L4) و ناحیه فاقد پوشش گیاهی در سیلابدشت (L1) و

نشان می‌دهد و بعد از آن یک نقطه عطف بر بالای پوشش گیاهی کوتاه مستغرق رخ می‌دهد. این نقطه عطف در پروفیل‌های سرعت بالای پوشش گیاهی کوتاه مستغرق تا سطح آزاد آب به دلیل تبادل مومنتوم بین ناحیه بالای پوشش گیاهی کوتاه مستغرق و جریان عبوری تحت تاثیر پوشش گیاهی بلند است. با مشاهده شکل‌های (۶-ج) و (۷-ج) می‌توان دریافت که در شرایط جریان کاملا مستغرق در هر دو چیدمان، سرعت جریان از بستر کانال به سطح آزاد جریان افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز یک نقطه عطف بر روی پروفیل سرعت وجود دارد و توزیع سرعت هم تقریباً از یک الگوی S شکل در سیلابدشت‌ها پیروی می‌کند. اما در آبراهه اصلی یک پروفیل تقریباً لگاریتمی مشاهده می‌شود. این پروفیل‌ها با نتایج آزمایشگاهی رحیمی و همکاران و یانگ و همکاران مطابقت دارد (Yang et al., 2007; Rahimi et al., 2020a).

در برابر جریان را افزایش می‌دهد. این مقاومت ناشی از پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها در مطالعات پیشین نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (Takuya et al., 2014; Koftis & Prinios, 2018). با توجه به شکل‌های (۶-الف) و (۷-الف) می‌توان مشاهده کرد که در شرایط غیرمستغرق پروفیل سرعت مشابه پروفیل سرعت در جریان-های دارای پوشش گیاهی با یک ارتفاع ثابت می‌باشد و توزیع سرعت در بالای ناحیه بستر تا سطح آزاد در تمام نقاط تقریباً ثابت است. از آنجا که در این حالت هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند غیرمستغرق بودند، نیروی کشانه تقریباً ثابتی توسط استوانه‌های پوشش گیاهی به جریان وارد شد. پروفیل‌های سرعت در شرایط نیمه مستغرق در شکل‌های (۶-ب) و (۷-ب) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع سرعت در بالای منطقه بستر تا انتهای پوشش گیاهی کوتاه در چیدمان‌های شماره ۱ و ۲ تقریباً رفتار یکسانی را



شکل ۶- پروفیل عمودی توزیع سرعت چیدمان شماره ۱ در شرایط جریان الف) غیر مستغرق، ب) نیمه مستغرق و ج) کاملا مستغرق



شکل ۷- پروفیل عمودی توزیع سرعت چیدمان شماره ۲ در شرایط جریان الف) غیر مستغرق، ب) نیمه مستغرق و ج) کاملا مستغرق

همچنین با مشاهده نمودارها می‌توان دریافت که در پروفیل‌های سرعت در نواحی دارای پوشش گیاهی در سیلابدشت به دلیل اثر

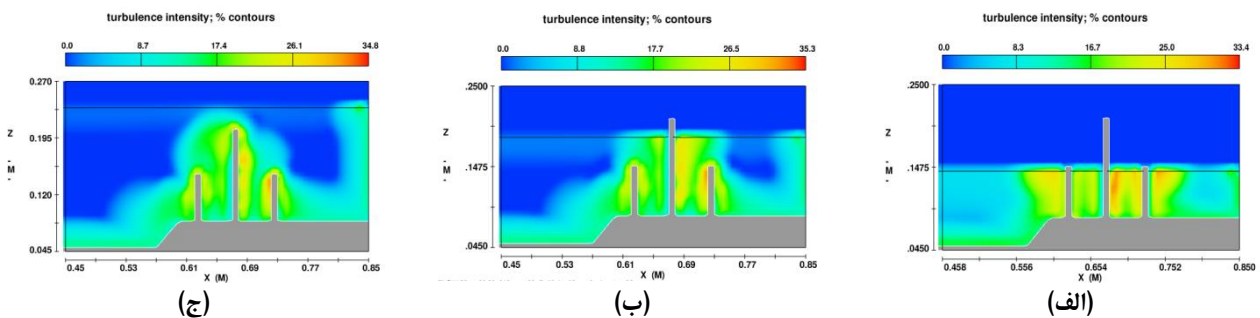
همچنین سرعت جریان عبوری از روی پوشش گیاهی بلندتر به دلیل مقاومت کمتر در مقابل جریان در این ناحیه افزایش یافته است.

دارای پوشش گیاهی می‌باشد بیشتر است، که نشان‌دهنده غیریکنواختی ساختار جریان در این مناطق است. در نتیجه درصد بیشتری از تلاطم در نوار کناری سیلابدشت مشاهده می‌شود که ناشی از وجود پوشش گیاهی در آن نواحی است. در شرایط جریان نیمه-مستغرق و غیرمستغرق (شکل ۸-ب و ۸-ج) و شکل (۹-ب و ۹-ج) در نواحی بالاتر از پوشش گیاهی با ارتفاع کوتاه، درصد تلاطم به دلیل کاهش تراکم پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش نیروی کشانه ناشی از آن به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در فصل مشترک کانال اصلی و سیلابدشت، تلاطم شدیدی در جریان مشاهده می‌شود که به دلیل ناپایداری جریان و تبادل مومنتوم در این ناحیه است. این تاثیر حضور پوشش گیاهی بر ناحیه فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی نیز در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است (Yang et al., 2007; Koftis and Prinos, 2018). در نواحی کناری سیلابدشت که پوشش گیاهی ناهمگون قرار گرفته است درصد شدت تلاطم دقیقا در پشت المان‌های پوشش گیاهی بیشتر است زیرا در این نواحی مقاومت در برابر جریان بیشتر است. اما در ناحیه انتهایی سیلابدشت فاقد پوشش گیاهی درصد تلاطم کاهش یافته است.

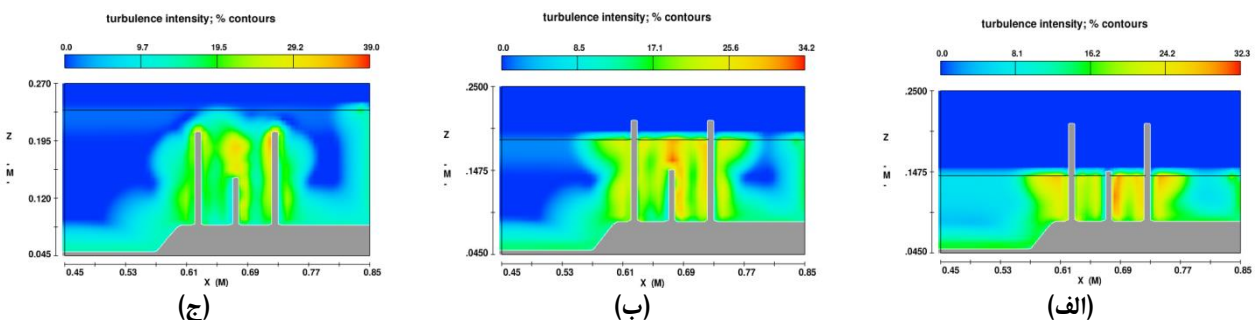
استوانه‌های پوشش گیاهی نوسانات سرعت رخ می‌دهد، در حالیکه در آبراهه اصلی (L4) و در ناحیه فاقد پوشش گیاهی در سیلابدشت (L1) هیچ نوسان سرعتی مشاهده نمی‌شود. این نوسانات در پروفیل‌های سرعت توسط آنجم و همکاران و آنجم و تاناکا نیز گزارش شده است (Anjum et al., 2018; Anjum & Tanaka, 2020).

### شدت تلاطم

در شکل‌های (۸) و (۹) کانتورهای توزیع شدت تلاطم (Turbulent Intensity) به ترتیب برای چیدمان شماره ۱ و ۲ در شرایط مختلف جریان نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت واضحی بین ناحیه سیلابدشت دارای پوشش گیاهی با ناحیه سیلابدشت فاقد پوشش گیاهی و ناحیه کانال اصلی وجود دارد. در نواحی نزدیک بستر کانال اصلی به ویژه در شرایط غیرمستغرق، درصد تلاطم نیز به دلیل مقاومت ناشی از بستر افزایش می‌یابد. همچنین در امتداد عمق جریان در نواحی بالای بستر کانال اصلی، میزان شدت تلاطم کاهش یافته و تقریبا یکنواخت است زیرا هیچگونه مقاومتی که ناشی از حضور پوشش گیاهی باشد در کانال اصلی وجود ندارد. تغییرات شدت تلاطم در کناره‌های سیلابدشت که



شکل ۸- توزیع درصد شدت تلاطم در نصف عرض کانال در چیدمان شماره ۱ در شرایط جریان الف) غیرمستغرق، ب) نیمه مستغرق و ج) کاملا مستغرق



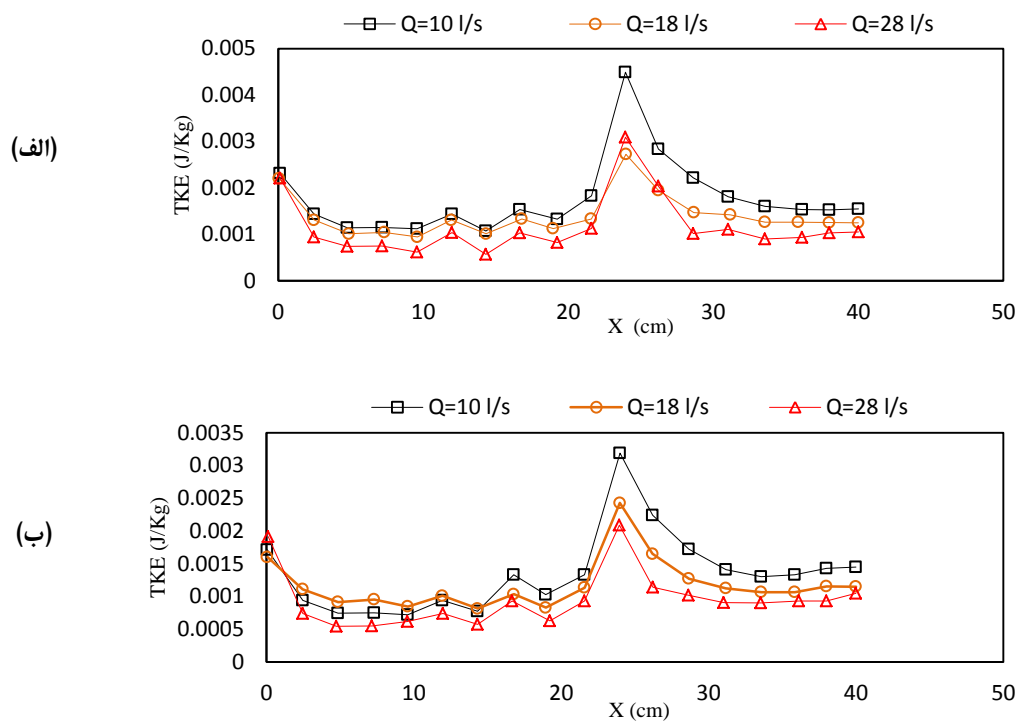
شکل ۹- توزیع درصد شدت تلاطم در نصف عرض کانال در چیدمان شماره ۲ در شرایط جریان الف) غیرمستغرق، ب) نیمه مستغرق و ج) کاملا مستغرق



### انرژی جنبشی تلاطم

در مطالعه جریان‌های متلاطم انرژی جنبشی تلاطم (Turbulent Kinetic Energy) از پارامترهای بسیار مهم به حساب می‌آید. انرژی جنبشی تلاطم معیاری از شدت تلاطم است و در واقع بیانگر میزان تبادل مومنتوم بین بخش‌های مختلف جریان می‌باشد. از آنجا که پخشیدگی (Diffusion) ذرات سیال به مقدار انرژی جنبشی آنها بستگی دارد (Hinze, 1959)، درک بهتر انرژی جنبشی تلاطم توانایی ما را برای درک میزان پخشیدگی و نرخ اتلاف تلاطم بهبود می‌بخشد زیرا این پارامترها تابع پارامتر TKE هستند. بر اساس تحقیق نیف و ویوونی در جریان تحت تاثیر پوشش گیاهی صلب بلند، دلیل مقاومت ایجاد شده توسط تنه و ساقه درختان، انرژی حرکتی متوسط به انرژی جنبشی متلاطم تبدیل می‌شود و باعث افزایش قابل توجه مقدار TKE می‌شود (Nepf and Vivoni, 2000). تغییرات انرژی جنبشی تلاطم (TKE) متوسط در عمق در امتداد مقطع  $x$  در

شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان تفاوت ساختار جریان متلاطم بین سیلابدشت دارای پوشش گیاهی و کانال اصلی بدون پوشش گیاهی را مشاهده کرد. در ناحیه دارای پوشش گیاهی سیلابدشت، نوسانات TKE متوسط عمقی را می‌توان مشاهده کرد که علت آن افزایش مقاومت در برابر جریان و تشکیل جریان‌های ثانویه در این ناحیه می‌باشد، که با نتایج تحقیقات قبلی مطابقت داشت (Zhao and Huai, 2016; Ghani et al., 2019). در امتداد فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی یعنی  $x \approx 25$  cm، برای هر دو چیدمان شماره ۱ و ۲ در شرایط مختلف جریان، یک اوج در TKE که به دلیل تاثیر جریان‌های ثانویه و تبادل مومنتوم شدید در این ناحیه می‌باشد، رخ داده است. اما در کانال اصلی و ناحیه فاقد پوشش گیاهی سیلابدشت، توزیع TKE یکنواخت می‌باشد. این امر وجود تلاطم را در ناحیه دارای پوشش گیاهی سیلابدشت در مقایسه با ناحیه کانال اصلی و سیلابدشت فاقد پوشش گیاهی بیشتر نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- تغییرات انرژی جنبشی تلاطم متوسط عمقی (TKE) در مقطع X چیدمان شماره ۱، (ب) چیدمان شماره ۲

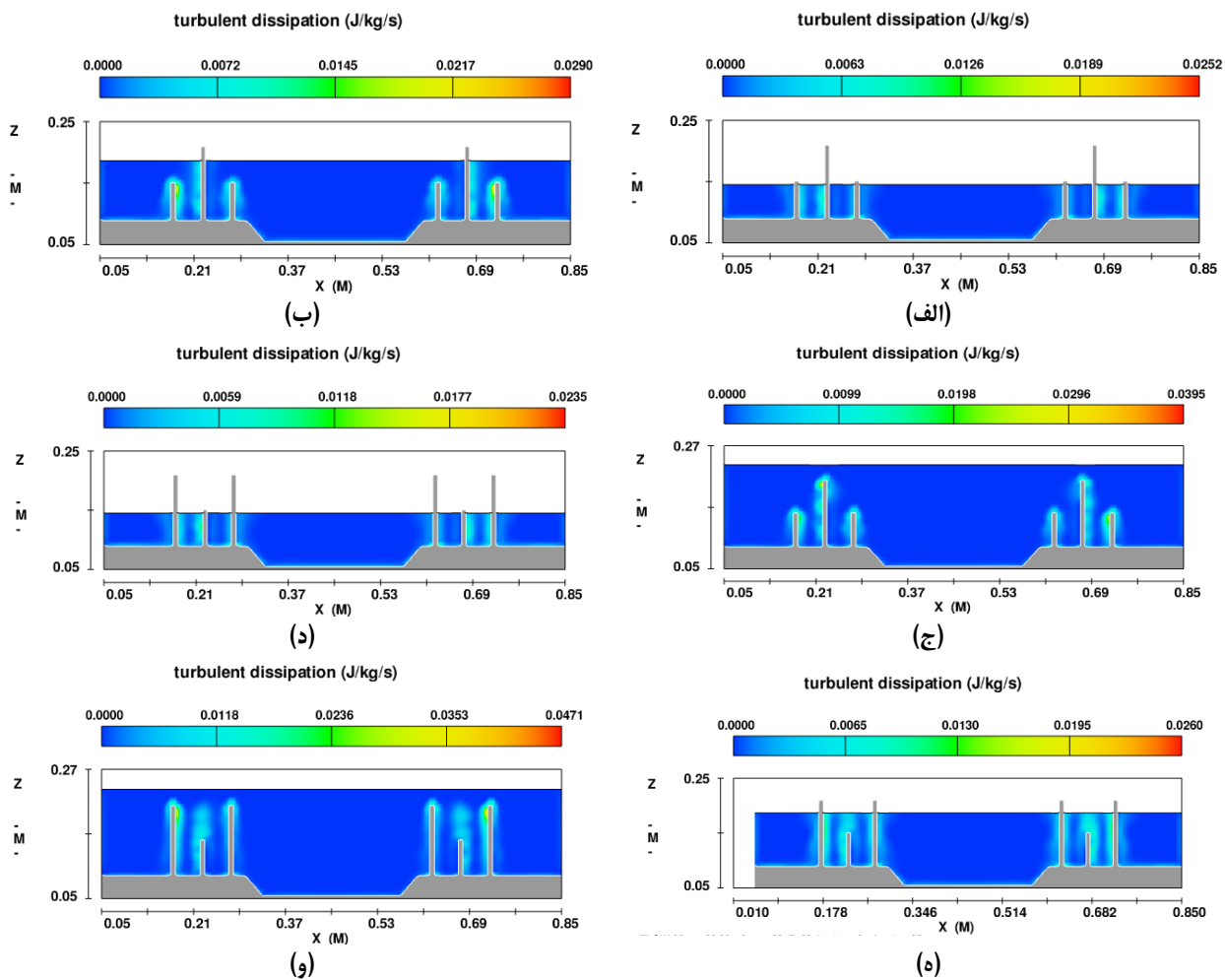
### نرخ اتلاف تلاطم

تغییرات نرخ اتلاف تلاطم (Turbulent dissipation rate) در عرض کانال در شکل (۱۱) برای چیدمان‌های شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است. اتلاف انرژی جنبشی تلاطم (انرژی مرتبط با گردابه‌های تلاطم در میدان جریان) مقداری است که در آن انرژی جنبشی تلاطم با تبدیل گردابه‌های بزرگتر به گردابه‌های کوچکتر و کوچکتر تقسیم

می‌شود تا در نهایت توسط نیروهای ویسکوزیته به گرما تبدیل شود. با توجه به شکل (۱۱) می‌توان مشاهده کرد که نرخ اتلاف انرژی هنگام عبور از ناحیه دارای پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها روند افزایشی دارد. اما در نواحی فاقد پوشش گیاهی در سیلابدشت و کانال اصلی نرخ اتلاف انرژی بسیار کم است. می‌توان مشاهده کرد که در چیدمان شماره ۲ در شرایط جریان نیمه مستغرق و کاملاً مستغرق (شکل ۱۱-)

نقش مهمی در اتلاف انرژی داشته باشد. نتایج مشابهی توسط گرینوالد و نیکورا به دست آمد و این فرضیه را اثبات کرد که حضور پوشش گیاهی در سیلابدشت که تأثیر قابل مشاهده آن شکستن گردابه‌ها و کاهش طول گردابه‌ها است، بر افزایش اتلاف انرژی تأثیر می‌گذارد (Grinvald and Nikora, 1988).

ه و ۱۱-و) نرخ اتلاف انرژی بالای پوشش گیاهی با ارتفاع کوتاه افزایش یافته است. در این شرایط، جریان هنگام عبور از پوشش گیاهی بلند در نزدیکی پوشش گیاهی بلند متلاطم می‌شود و سبب ایجاد گردابه می‌شود که تولید گردابه‌ها متناسب با اتلاف انرژی جنبشی تلاطم است (Raupach et al., 1996). بنابراین، تولید ساختارهای منسجم تلاطم در اطراف ناحیه لایه اختلاط می‌تواند



شکل ۱۱- نرخ اتلاف تلاطم در چیدمان شماره ۱ (الف-ج) و چیدمان شماره ۲ (د-و)

غیرمستغرق تقریباً یکنواخت است.

- یک نقطه عطف در پروفیل توزیع سرعت در شرایط سیلابی (پوشش گیاهی کوتاه مستغرق و پوشش گیاهی بلند بصورت نیمه مستغرق یا کاملاً مستغرق) رخ می‌دهد. به دلیل تبادل عمودی مومنوم بین تاج پوشش گیاهی و جریان عبوری از روی آن، یک لایه اختلاط قابل توجهی در بالای پوشش گیاهی مستغرق ایجاد می‌گردد.
- مقادیر اوج انرژی جنبشی تلاطم و شدت تلاطم در ناحیه فصل

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق ساختار جریان و تلاطم در یک آبراهه روباز مرکب مستقیم دارای پوشش گیاهی در نوار کناری سیلابدشت با دو چیدمان متفاوت پوشش گیاهی (خطی و زیگزاگی) به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار تجاری FLOW-3D بررسی شد. نتایج هم به صورت کیفی و هم کمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی به صورت زیر می‌باشد:

- پروفیل توزیع سرعت در عمق جریان در شرایط جریان

- Ghani, U., Anjum, N., Pasha, G. A. and Ahmad, M. 2019. Numerical investigation of the flow characteristics through discontinuous and layered vegetation patches of finite width in an open channel. *Environmental Fluid Mechanics*. 19(6): 1469-1495.
- Grinvald, D. I. and Nikora, V. I. 1988. *The turbulence of rivers*. Hydrometeoizdat: Leningrad, Russia
- Gu, J., Shan, Y., Liu, C. and Liu, X. 2019. Feedbacks of flow and bed morphology from a submerged dense vegetation patch without upstream sediment supply. *Environmental Fluid Mechanics*. 19(2): 475-493.
- Hinze JO. 1959. *Turbulence*. New York: McGraw-Hill. p. 586
- Khoshkonesh, A., Daliri, M., Riaz, K., Dehrashid, F. A., Bahmanpouri, F. and Di Francesco, S. 2022. Dam-break flow dynamics over a stepped channel with vegetation. *Journal of Hydrology*. 613: 128395. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128395.
- Koftis, T. and Prinos, P. 2018. Reynolds stress modelling of flow in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. 6(1): 17-27. doi: 10.1080/23249676.2016.1209437.
- Liu, D., Diplas, P., Hodges, C. C. and Fairbanks, J. D. 2010. Hydrodynamics of flow through double layer rigid vegetation. *Geomorphology*. 116(3-4): 286-296. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.11.024.
- Lopez, F. and Garcia, M. H. 2001. Mean Flow and Turbulence Structure of Open-Channel Flow through Non-Emergent Vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127: 392-402. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(2001)127:5(392)
- Nearly, V. S. 2003. Numerical Solution of Fully Developed Flow with Vegetative Resistance. *Journal of Engineering Mechanics*. 129: 558-563. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2003)129:5(558)
- Nepf, H. M. and Vivoni, E. R. 2000. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 105(C12): 28547-28557. doi: 10.1029/2000JC900145.
- Nepf, H. and Ghisalberti, M. 2008. Flow and Transport in Channels with Submerged Vegetation. *Acta Geophys*. 56: 753-777. https://doi.org/10.2478/s11600-008-0017-y
- Rahimi, H. R., Tang, X., & Singh, P. 2020a. Experimental and numerical study on impact of double layer vegetation in open channel flows. *Journal of Hydrologic Engineering*. 25(2): 04019064. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001865
- مشترک سیلابدشت و کانال اصلی رخ می‌دهد، که نشان‌دهنده تلاطم شدید بر روی این ناحیه به دلیل ناپایداری زیاد جریان است که می‌تواند تبادل جانبی مومنتوم را تقویت کند.
- حضور پوشش گیاهی در سیلابدشت که تاثیر قابل مشاهده آن شکستن گردابه‌ها و کاهش طول گردابه‌ها است، بر افزایش اتلاف انرژی تاثیر می‌گذارد.
- نتایج این مطالعه ممکن است به درک عمیق‌تر اثرات پوشش گیاهی بر الگوهای جریان در سواحل رودخانه‌ها و آبراهه‌های مرکب دارای پوشش گیاهی ناهمگون در کناره سیلابدشت و یا سیلابدشت کاملا پوشیده شده از پوشش گیاهی کمک کند. از آنجایی که رودخانه‌های طبیعی معمولا به صورت آبراهه‌های مرکب می‌باشند، تحقیقات محاسباتی بیشتری برای کارهای آینده برای درک مکانیسم‌های اساسی جریان در آبراهه‌های مرکب با سواحلی که دارای چنین الگوی پوشش گیاهی ساحلی هستند پیشنهاد می‌شود.

## منابع

- Anjum, N., Ghani, U., Ahmed Pasha, G., Latif, A., Sultan, T. and Ali, S. 2018. To investigate the flow structure of discontinuous vegetation patches of two vertically different layers in an open channel. *Water*. 10(1): p.75. https://doi.org/10.3390/w10010075
- Anjum, N. and Tanaka, N. 2020. Hydrodynamics of longitudinally discontinuous, vertically double layered and partially covered rigid vegetation patches in open channel flow. *River Research and Applications*. 36(1): 115-127. https://doi.org/10.1002/rra.3546.
- Carollo, F. G., Ferro, V. and Termini, D. 2002. Flow Velocity Measurements in Vegetated Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128: 664-673. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(664)
- Chembolu, V., Kakati, R. and Dutta, S. 2019. A laboratory study of flow characteristics in natural heterogeneous vegetation patches under submerged conditions. *Advances in Water Resources*. 133: 103418.
- Curran, J. C. and Hession, W. C. 2013. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system. *Journal of Hydrology*. 505: 364-376.
- Dehrashid, F.A., Heidari, M., Rahimi, H.R., Khoshkonesh, A., Yuan, S., Tang, X., Lu, C., Wang, X. (2022). CFD modeling the flow dynamics in an open channel with double-layered vegetation. *Modeling earth system and environment*. doi.org/10.1007/s40808-022-01513-4.

- Vegetation. Proceedings of the 38th IAHR World Congress, Panama City, 1-6 September 2019. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0513>
- Tang, X., Guan, Y., Zhang, Y., Zhang, W., Jiang, Y., Liu, T. and Yi, X. 2021a. Effect of Vegetation on the Flow of a Partially-Vegetated Channel. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 668, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.
- Tang, X., Rahimi, H., Guan, Y. and Wang, Y. 2021b. Hydraulic characteristics of open-channel flow with partially-placed double layer rigid vegetation. *Environmental Fluid Mechanics*, 21, pp.317-342.
- Yang, K., Cao, S. and Knight, D. W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(2): 148-159. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(148).
- Yang, F., Huai, W. and Zeng, Y. 2020. New Dynamic Two-Layer Model for Predicting Depth-Averaged Velocity in Open Channel Flows with Rigid Submerged Canopies of Different Densities. *Advances in Water Resources*. 138: 103553. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103553>
- Yan, C., Shan, Y., Sun, W., Liu, C. and Liu, X. 2020. Modeling the Longitudinal Profiles of Streamwise Velocity in an Open Channel with a Model Patch of Vegetation. *Environmental Fluid Mechanics*. 20: 1441-1462. <https://doi.org/10.1007/s10652-020-09747-5>
- Zeng, C. and Li, C. W. 2014. Measurements and Modeling of Open-Channel Flows with Finite Semi-Rigid Vegetation Patches. *Environmental Fluid Mechanics*. 14: 113-134. <https://doi.org/10.1007/s10652-013-9298-z>.
- Zhang, J., Wang, W., Li, Z., Wang, H., Wang, Q. and Mi, Z. 2022. Evaluation of a random displacement model for scalar mixing in ecological channels partially covered with vegetation. *Environmental Science and Pollution Research*. 1-13.
- Zhang, J., Huai, W. X., Shi, H. R. and Wang, W. J. 2021. Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using a two-zone model in a channel partially covered with artificial emergent vegetation. *Environmental Fluid Mechanics*. 21(1): 155-175.
- Zhao, F. and Huai, W. 2016. Hydrodynamics of Discontinuous Rigid Submerged Vegetation Patches in Open-Channel Flow. *Journal of Hydro-environment Research*. 12: 148-160. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2016.05.004>
- Rahimi, H., Tang, X., Singh, P., Li, M. and Alaghmand, S. 2020b. Analytical Model for the Vertical Velocity Profiles in Open Channel Flows with Two Layered Vegetation. *Advances in Water Resources*. 137: 103527. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103527>
- Raupach, M. R., Finnigan, J. J. and Brunet, Y. 1996. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. In *Boundary-layer meteorology 25th anniversary volume. 1970-1995*.
- Souliotis, D. and Prinos, P. 2011. Effect of a Vegetation Patch on Turbulent Channel Flow. *Journal of Hydraulic Research*. 49: 157-167. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.557258>.
- Stone, B. M. and Shen, H. T. 2002. Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128: 500-506. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(2002\)128:5\(500\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(2002)128:5(500))
- Takuya, U., Keiichi, K. and Kohji, M. 2014. Experimental and numerical study on hydrodynamics of riparian vegetation. *Journal of Hydrodynamic*. 26: 796-806. doi: 10.1016/S1001-6058(14)60088-3.
- Tang, X. and Knight, D. W. 2009. Lateral Distributions of Streamwise Velocity in Compound Channels with Partially Vegetated Floodplains. *Journal of Science in China Series E: Technological Sciences*. 52: 3357-3362. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0342-7>
- Tang, X. and Ali, S. 2013. Evaluation of Methods for Predicting Velocity Profiles in Open Channel Flows with Submerged Rigid Vegetation. In *Proceedings of the 35th IAHR World Congress, Chengdu, 8-13 September 2013, Vol. 4, 1-12*
- Tang, X., Rahimi, H., Singh, P., Wei, Z., Wang, Y., Zhao, Y. and Lu, Q. 2018. Experimental Study of Open-Channel Flow with Partial Double-Layered Vegetation. *Proceedings of the 1st International Symposium on Water Resource and Environmental Management (WREM 2018), Kunming, 28-29 November 2018, 1-7*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198101010>
- Tang, X. 2019. A Mixing-Length-Scale-Based Analytical Model for Predicting Velocity Profiles of Open Channel Flows with Submerged Rigid Vegetation. *Water and Environment Journal*. 33: 610-619. <https://doi.org/10.1111/wej.12434>
- Tang, X., Rahimi, H. R., Wang, Y., Zhao, Y., Lu, Q., Wei, Z. and Singh, P. 2019. Flow Characteristics of Open-Channel Flow with Partial Two-Layered

## Flow and Turbulence Characteristics in a Compound Channel with Partially Layered Vegetated Floodplains

F. Ahmadi Dehrashid<sup>1</sup>, M. Heydari<sup>2\*</sup>, M. Yasi<sup>3</sup>, A. Khoshkonesh<sup>4</sup>

Received: Dec.28, 2022

Accepted: Mar.09, 2023

### Abstract

Floodplain vegetation can alter the flow characteristics of a river through the application of redundant drag forces. In this study, turbulence characteristics and flow structure were investigated under the influence of partially double-layered vegetation in a compound channel. To investigate the phenomenon, a three-dimensional numerical model was used to solve the Navier-Stokes equations and track the evolution of the free surface. To ensure the model performance, the numerical results were validated using data from previous experimental studies. The validation results showed that this model captured the flow dynamics with high accuracy. In the next step, the model was used to predict the free surface fluctuations and velocity field of the steady flow in the layered vegetated floodplains. The modeling results showed that the formation of a velocity gradient at the interface between the main channel and the floodplain can lead to the development of secondary flows and the mass and momentum exchange at this interface. In addition, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation of the flow through vegetation in floodplains were observed in the numerical results. It was concluded that the layered vegetation can increase the flow turbulence and the dissipation rate of the flow energy. The maximum values of turbulence kinetic energy and turbulence intensity were observed at the interface between the floodplain and the main channel. Therefore, the flow disturbance at the interface between the floodplain and the main channel may increase the mass and momentum exchange in this region.

**Keywords:** Compound channel, Double-layer vegetation, Turbulent intensity, Turbulent kinetic energy, Velocity profile.

1- Ph.D. student in water structures, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Associate professor, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Associate professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, University of Tehran, Karaj Campus, Iran

4- Ph.D. in water structures, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(\*-Corresponding Author Email: mheydari@basu.ac.ir)