



Flow characteristics in a compound channel with double-layer vegetated floodplains: a numerical study

Fariba Ahmadi Dehrashid¹, Mehdi Yasi², Majid Heidari³✉

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Email: faribaahmadi91@gmail.com

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: m.yasi@ut.ac.ir

3. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: mheydari@basu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 7, 2022

Revised: Nov. 21, 2022

Accepted: Dec. 3, 2022

Published online: Jan. 22, 2022

Keywords:

Double-layered vegetation,
Mixing layer,
Numerical modeling,
Physical model,
Velocity profile.

ABSTRACT

Vegetation plays an essential role in modifying the flow characteristics of natural channels, such as rivers. Efficient hydraulic modeling of flow in compound channels with vegetated floodplains is necessary to understand and identify natural flow processes. In both natural and artificial channels, there are various types of vegetation with differing densities and heights. The main goal of this study is to investigate the effect of double-layered vegetation on flow characteristics in compound channels using the FLOW-3D model. The results of the numerical model have been calibrated and validated with the results of the physical model of the research of Takuya et al., 2014. Experiments were conducted in 2014 in the hydraulic laboratory of the Akashi National University of Technology in Japan, and in a straight trapezoidal channel with a length and width of 4.8 and 0.8 m respectively. During calibration, the model's estimation error for the depth-averaged velocity was within 4 to 6%, which was reduced to approximately 1.5% during validation. The average error in water depth estimation was around 3%. The numerical and physical models showed good agreement in simulating the flow pattern. The numerical model showed that, for larger floods when vegetation is submerged, the vertical profile of velocity in the floodplain is S-shaped. However, during smaller floods or when short and tall vegetation is emergent, the vertical velocity profile is relatively uniform or logarithmic. The resistance caused by the presence of vegetation in the floodplains leads to a decrease in the flow velocity in the floodplain area of the river and an increase in the capacity of flow transfer in the main channel.

Cite this article: Ahmadi Dehrashi, F., Yasi, M., & Heidari, M. (2023). Flow characteristics in a compound channel with double-layer vegetated floodplains: a numerical study, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2515-2531. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348361.669356>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348361.669356>

مطالعه عددی خصوصیات جریان در آبراهه روباز مرکب با پوشش گیاهی لایه‌ای ناهمگون در

سیلابدشت

فریبا احمدی دهرشید^۱، مهدی یاسی^۲، مجید حیدری^۳۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، ایمیل: faribaahmadi91@gmail.com۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: m.yasi@ut.ac.ir۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، ایمیل: mheydari@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

واژه‌های کلیدی:

پروفیل سرعت،

پوشش گیاهی لایه‌ای،

لایه اختلاط،

مدلسازی عددی،

مدل فیزیکی.

پوشش گیاهی نقش اساسی در تغییر خصوصیات جریان آبراهه‌های طبیعی مانند رودخانه‌ها دارد. مدل‌سازی کارآمد هیدرولیک جریان در آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های دارای پوشش گیاهی برای درک و تعیین فرآیندهای طبیعی جریان ضروری است. آبراهه‌های طبیعی و یا انسان‌ساخت اغلب دارای پوشش گیاهی گوناگون با تراکم و ارتفاع‌های متفاوت هستند. هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر پوشش گیاهی لایه‌ای بر خصوصیات جریان در آبراهه مرکب با استفاده از مدل FLOW-3D می‌باشد. نتایج مدل عددی با نتایج نظیر از مدل فیزیکی تحقیق Takuya et al. (۲۰۱۴) و انسجی و تایید شده است. آزمایش‌ها در سال ۲۰۱۴ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ملی فناوری آکاشی در ژاپن، و در یک کانال دوزنقه‌ای مستقیم به طول ۴/۸ متر و عرض ۰/۸ متر انجام یافت. خطای برآورد مدل برای سرعت متوسط عمقی بترتیب در مرحله و انسجی در دامنه ۴ تا ۶ درصد بود، که در مرحله تأیید مدل به حدود ۱/۵ درصد کاهش یافت. متوسط خطای برآورد عمق آب نیز در حدود ۳ درصد بوده است. در شبیه‌سازی الگوی جریان، تطابق خوبی بین نتایج مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد که برای شرایط سیلاب‌های بزرگتر که پوشش گیاهی در سیلابدشت مستغرق می‌شود، پروفیل عمودی سرعت در سیلابدشت بصورت S شکل است. در حالی که در شرایط سیلاب‌های کوچکتر یا زمانی که پوشش گیاهی کوتاه و بلند غیرمستغرق باشند، پروفیل سرعت عمودی دارای توزیع نسبتاً یکنواخت یا لگاریتمی است. مقاومت ناشی از حضور پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها سبب کاهش سرعت جریان در ناحیه سیلابدشت رودخانه، و همچنین افزایش ظرفیت انتقال بده جریان در آبراهه اصلی می‌گردد.

استناد: احمدی دهرشید؛ فریبا، یاسی؛ مهدی، حیدری؛ مجید، (۱۴۰۱). مطالعه عددی خصوصیات جریان در آبراهه روباز مرکب با پوشش گیاهی لایه‌ای ناهمگون در

سیلابدشت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۱)، ۲۵۳۱-۲۵۱۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348361.669356>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348361.669356>

مقدمه

پوشش گیاهی در سیلابدشت آبراهه‌های طبیعی مقاومت بالایی در برابر جریان ایجاد می‌کند و همچنین تأثیر زیادی بر ویژگی‌های جریان رودخانه‌ها به‌ویژه در هنگام سیل دارد. رودخانه‌ها به طور کلی شامل آبراهه اصلی (Main channel) برای انتقال جریان‌های پرآبی متناوب و سیلابدشت (Floodplain) دو طرف برای انتقال جریان سیلابی بزرگتر می‌باشند. مقاومت ناشی از پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها سبب کاهش بده جریان می‌شود که منجر به تغییرات قابل توجهی در فرآیندهای فیزیکی و بیولوژیکی در اکوسیستم‌های آبی شده و همچنین اختلاف سرعت بین آبراهه اصلی و سیلابدشت را افزایش می‌دهد. براساس راهبرد جدید بخش آب سازمان ملل (UN Water 2018)، مبنی بر "راه‌حل‌های طبیعی برای حل مسایل 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.

با توجه به اینکه شناخت بسیاری از مسائل مربوط به رودخانه‌ها نیازمند پیش‌بینی دقیق انتقال جریان در آبراهه‌های مرکب دارای پوشش گیاهی می‌باشد، مطالعات زیادی در مورد ویژگی‌های جریان عبوری از پوشش گیاهی وجود دارد. بر اساس مطالعات Chao *et al.* (2013) و Tsujimoto & Kitamura (1990)، در جریان در آبراهه‌های روباز بدون پوشش گیاهی، توزیع سرعت در عمق جریان به صورت لگاریتمی است. با این اوصاف، پوشش گیاهی سبب افزایش مقاومت در برابر جریان، افزایش نیروی برشی و تغییرات قابل توجهی در توزیع سرعت می‌شود.

پوشش گیاهی در بستر آبراهه می‌تواند غیرمستغرق یا مستغرق باشد. در حالت غیرمستغرق، توزیع سرعت در عمق جریان به صورت یکنواخت می‌باشد (Tang, 2019; Tang, 2021a-b). در حالت مستغرق، توزیع سرعت در عمق جریان از یک الگوی S شکل پیروی می‌کند (Kouwen *et al.*, 1969; Ikeda and Kanazawa, 1996; Carollo *et al.*, 2002). براساس مطالعات (Pasha *et al.*, 2018; Chembolu, 2019; Chatelain & Proust, 2021; Ren *et al.*, 2021; Sohrabi *et al.*, 2022)، وجود دارد که تأثیر پوشش گیاهی بر خصوصیات جریان در آبراهه‌های روباز را ارزیابی کرده‌اند، اما مدل‌سازی آن‌ها به شرایط واقعی در طبیعت نزدیک نیست و معمولاً الگوهای مختلف جریان و پیش‌بینی بده در یک کانال مرکب با پوشش گیاهی یک لایه (با یک ارتفاع ثابت) را مورد بررسی قرار داده‌اند (Rameshwaran & Shiono, 2007; Nezu & Sanjou, 2008; Sun & Shiono, 2009; Fathi-Moghadam *et al.*, 2011).

مطالعات بالا بیشتر بر روی پوشش گیاهی همگون با ارتفاع یکسان متمرکز بوده‌اند. در حالی که آبراهه‌های طبیعی و یا انسان‌ساخت اغلب دارای پوشش گیاهی گوناگون با تراکم و ارتفاع‌های متفاوت هستند. در این آبراهه‌ها، انواع مختلفی از توده‌های گیاهی، درختچه‌ها و یا درخت‌های با ارتفاع بلندتر نیز وجود دارند. در زمان سیلاب، گیاهان کوتاه‌تر (مانند بوته‌ها و علف‌ها) مستغرق شده، و پوشش گیاهی بلندتر (مانند درختچه و درختان) نیمه مستغرق یا غیرمستغرق هستند که منجر به پیچیدگی بیشتر ساختار جریان به دلیل تشکیل لایه برشی در بالای پوشش گیاهی مستغرق می‌شود (Takuya *et al.*, 2014). از طرف دیگر، زمانی که سطح آب در آبراهه پایین باشد، پوشش گیاهی کوتاه و همچنین پوشش گیاهی بلند غیرمستغرق می‌شوند. مروری بر پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که مطالعات اندکی در مورد جریان در آبراهه‌های دارای پوشش گیاهی ترکیبی کوتاه و بلند انجام شده است (Liu *et al.*, 2010; Anjum *et al.*, 2018; Sing *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2019; Rahimi *et al.*, 2020; Ahmadi Dehrashid *et al.*, 2022).

Ghani *et al.* (2019) از مدل تلاطمی تنش رینولدز سه‌بعدی برای بررسی پارامترهای تلاطم و خصوصیات جریان عبوری از میان بوته‌های گیاهی لایه‌ای ناپیوسته در یک کانال باز استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مقدار سرعت متوسط جریان در ناحیه پوشش گیاهی در مقایسه با مناطق بالای پوشش گیاهی کمتر است. همچنین سرعت پشت‌المان‌های پوشش گیاهی کاهش یافته و دارای نوسانات زیاد است. Zhao *et al.* (2017) از مدل تلاطمی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) برای بررسی خصوصیات جریان عبوری از میان پوشش گیاهی صلب ناپیوسته استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی آنها با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشت. همچنین نتایج آنها نشان داد که یک لایه برشی قوی بر روی تاج پوشش گیاهی ایجاد می‌شود که سبب تلاطم بیشتر و تبادل مومنوم می‌شود. بیشتر مطالعات پیشین اثر پوشش گیاهی بر ساختار جریان را در یک شرایط جریان (با پوشش گیاهی مستغرق یا غیرمستغرق) بررسی کرده‌اند و مطالعات اندکی هر دو شرایط جریان را به طور همزمان بررسی نموده‌اند. در این تحقیق رفتار جریان در یک کانال مرکب دوزنقه‌ای با سیلابدشت‌های دارای پوشش گیاهی لایه‌ای ناهمگون به صورت عددی بررسی شده است. هدف اصلی شبیه‌سازی ساختار سه‌بعدی جریان و بررسی دقیق

توزیع سرعت تحت شرایط استغراق مختلف و چیدمان و تراکم متفاوت پوشش گیاهی ناهمگون بر روی سیلابدشت است. مطالعه حاضر می‌تواند به درک بهتر هیدرودینامیک جریان در کانال‌های مرکب با پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها، مدیریت بهتر سواحل در صورت وقوع سیلاب و ایجاد زیستگاه مناسب از دیدگاه اکولوژیکی کمک کند.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نرم‌افزار تجاری FLOW-3D جهت شبیه‌سازی جریان در آبراهه مرکب دارای پوشش گیاهی لایه‌ای ناهمگون در سیلابدشت استفاده شد. برای طرح هندسه آبراهه مرکب با پوشش گیاهی و همچنین واسنجی و اعتبارسنجی مدل عددی، از مطالعات آزمایشگاهی (Takuya *et al.*, 2014) استفاده شده است، که در ادامه این نرم‌افزار معرفی و مراحل انجام کار ارائه شده است.

معرفی شبیه‌ساز FLOW-3D

نرم‌افزار FLOW-3D یک بسته نرم‌افزاری جامع در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط شرکت FLOW science, Inc صورت گرفته است. این نرم‌افزار معادله‌های حاکم بر حرکت سیال (معادلات ناویر-استوکس) را با به‌کارگیری تقریب احجام محدود حل می‌کند و از پنج مدل تلاطمی مختلف در حل خصوصیات جریان‌های متلاطم استفاده می‌کند. در این روش محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم می‌شود و برای هر کدام از این سلول‌ها مقادیرهای میانگین کمیت‌های وابسته تعریف می‌گردد. در نرم‌افزار FLOW-3D از دو تکنیک عددی روش حجم سیال (VOF) و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی هندسی با به‌کارگیری تقریب احجام محدود استفاده می‌شود. (Dehrashid *et al.*, 2022; Khoshkonesh *et al.*, 2022). این مدل معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس (معادلات (۱) تا (۵)) را به صورت همزمان حل می‌کند (Flow Science, 2016).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x - b_x \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_y + f_y - b_y \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z - b_z \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$V_F \frac{\partial F}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) \right) = 0 \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن VF: نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ : دانسیته سیال، RDIF: ترم دیفیوژن تلاطم، (u, v, w): مولفه‌های سرعت جریان در مختصات کارتزین، (Ax, Ay, Az): کسری از سطح برای جریان که در جهت‌های x, y, z باز هستند، (Gx, Gy, Gz): شتاب‌های بدنه، (fx, fy, fz): نشانه لزوجت و (bx, by, bz): تلفات جریان در محیط متخلخل هستند. F بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است، مقدار F اگر سلول پر از سیال، خالی از سیال و یا نیمه پر باشد، به ترتیب برابر با یک، صفر و بین صفر و یک می‌باشد. (Hirt & Nichols, 1981).

داده‌های آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی مدل عددی

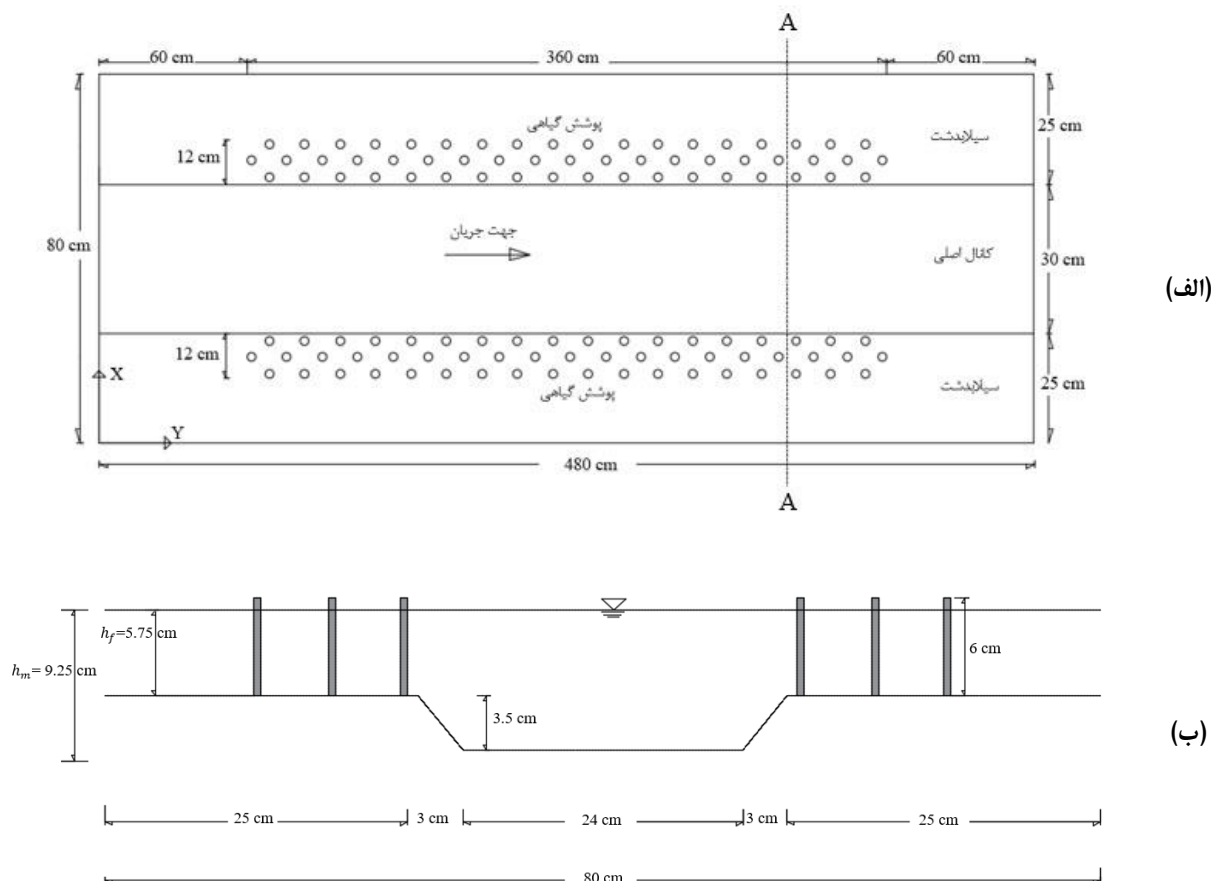
برای ساخت و آزمون مدل عددی، نیاز به داده‌های اندازه‌گیری شده از مدل‌های فیزیکی و یا آزمایشگاهی بود. برای اطمینان از درستی مدل عددی نیاز به سری داده‌ها از منابع مختلف است. ولی برای شرایط مورد نظر در این تحقیق (آبراهه اصلی بدون پوشش گیاهی، و سیلابدشت با پوشش گیاه)، تنها اطلاعات مدل آزمایشگاهی تاکیویا و همکاران (۲۰۱۴) قابل دسترس بود، و مطالعات مشابه دیگری یافت نگردید. در برخی مطالعات مشابه در موضوع "اثر پوشش گیاهی بر ساختار جریان" نیز ناچاراً از یک سری نتایج آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است (Anjum *et al.*, 2018; Ghani *et al.*, 2019). از اینرو مدل عددی برای شبیه‌سازی شرایط مدل فیزیکی تاکیویا و همکاران (۲۰۱۴) ساخته شد؛ با تنظیمات کاربری مورد آزمون قرار گرفت؛ و با محدوده قابل قبولی از خطاهای برآورد عمق و سرعت، تنظیم و اعتبار سنجی گردید.

مدل فیزیکی تاکیویا و همکاران در سال ۲۰۱۴ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ملی فناوری آکاشی در ژاپن، و در یک کانال نوزنقه‌ای مستقیم به طول ۴/۸ متر و عرض ۰/۸ متر انجام یافت. بازه آزمایشی (Test reach) به طول ۳/۶ متر در فاصله ۰/۶ متر از ابتدای کانال قرار داشت. شیب کف کانال ثابت و برابر با ۱/۱۰۰۰ است. عرض کف آبراهه اصلی ۰/۲۴ متر، عرض سطح آب (عرض بالای آبراهه اصلی) ۰/۳ متر و عرض سیلابدشت دو طرف آن ۰/۲۵ متر است. جنس کف آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها از ورق گالوانیزه و دیواره‌های فلوم شیشه‌ای بوده و همچنین بستر آبراهه اصلی صاف و بدون پوشش گیاهی است، و تنها سیلابدشت‌ها دارای پوشش گیاهی هستند. پوشش گیاهی مورد نظر در این تحقیق درخت بید بود، که با استوانه‌های صلب چوبی به قطر (D) ۰/۱۲ متر و با ارتفاع (h_v) ثابت ۰/۰۶ متر شبیه‌سازی شده‌اند و در نوار کناری سیلابدشت‌های کانال مرکب قرار داده شده‌اند. برای شبیه‌سازی پوشش درختی کناره رودخانه‌ها، توصیه (Nepf et al. (1997)، کاربرد استوانه‌های با قطر ۶-۱۲ میلی‌متر بوده است. در مدل فیزیکی تاکیویا و همکاران (۲۰۱۴)، قطر پوشش گیاهی ۱۲ میلی‌متر بوده، که در دامنه فوق قرار دارد. بهرحال، این استوانه‌ها می‌توانند معرف هر نوع پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها باشند و صرفاً درخت بید مورد نظر نیست. استوانه‌ها در یک آرایش زیگزاگی با تراکم $\lambda_{veg} = 1 \text{ m}^{-1}$ کنار هم قرار گرفته‌اند. تراکم پوشش گیاهی (λ_{veg}) به صورت رابطه (۶) محاسبه شده است:

$$\lambda_{veg} = \frac{DH}{\Delta S^2 H} = \frac{D}{\Delta S^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن D قطر استوانه‌ها بر حسب (m)، ΔS فاصله بین استوانه‌ها بر حسب (m) و H عمق جریان بر حسب (m) است. فاصله طولی و عرضی بین استوانه‌ها (ΔS) معادل ۰/۰۵۵ متر است.

نمای فلوم آزمایشگاهی و نحوه قرارگیری پوشش گیاهی در سیلابدشت در شکل (۱) ارائه شده است. یادآوری می‌گردد که راهبرد جدید در مدیریت و حفاظت رودخانه، ایجاد نوار سبز (با حضور درختان) در ساحل بالای آبراهه اصلی است. بر این اساس در مدل فیزیکی-آزمایشگاهی تاکیویا و همکاران (۲۰۱۴) مطابق شکل (۱)، چیدمان پوشش گیاهی در سراسر سیلابدشت نبوده، و تنها در نوار کناری بستر مرکب (بصورت نیمی با پوشش، و مابقی بدون پوشش) است.



شکل ۱- سیما و مشخصات مدل آزمایشگاهی، (الف) نمای بالای فلوم که در آن نصف سیلابدشت پوشیده از پوشش گیاهی است، و (ب) برش از مقطع (A-A) (Takuya et al., 2014)

در تحقیق (Takuya et al., 2014)، جریان آب صاف بررسی گردیده است. آزمایش‌ها با بده ۱۰ لیتر بر ثانیه که در آن پوشش گیاهی غیرمستغرق است، انجام یافت. در آزمایش‌های این تحقیق به منظور برقراری جریان یکنواخت و تامین عمق آب مورد نظر در سیلابدشت‌ها از یک دریچه پروانه‌ای انتهایی استفاده شد. در شروع آزمایش و در مراحل اولیه برقراری جریان، در محدوده دارای پوشش گیاهی و فاقد پوشش گیاهی، نوسانات جریان وجود دارد و جریان غیریکنواخت است. از اینرو داده‌ها پس از برقراری شرایط تعادلی (که تغییرات عمق و بده بسیار ناچیز گردید) برداشت شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. پروفیل‌های سرعت در یک مقطع از بازه آزمایشی با استفاده از سرعت‌سنج میکرو پروانه‌ای اندازه‌گیری شد. سرعت در سطح آب با استفاده از تکنیک PIV اندازه‌گیری شد (Ruonan et al., 2016). خلاصه‌ای از شرایط آزمایشگاهی در این مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول h_f عمق آب در سیلابدشت، h_m عمق آب در آبراهه اصلی، λ_{veg} تراکم پوشش گیاهی، D قطر پوشش گیاهی، h_v ارتفاع پوشش گیاهی، ΔS فاصله بین استوانه‌های پوشش گیاهی، Q بده، U سرعت متوسط، Fr عدد فرود و Re^* عدد رینولدز جریان است.

پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که در کانال مرکب بدون پوشش گیاهی، با افزایش عمق نسبی از یک سطح آستانه، رفتار کانال مرکب به کانال واحد (با مقطع ساده) نزدیک می‌گردد (Yonesi et al. 2013). عمق نسبی جریان بصورت $D = (H-h)/H$ تعریف می‌گردد ($H =$ عمق آب در آبراهه اصلی؛ $h =$ عمق لبریز). در مقاطع مرکب بدون پوشش گیاهی، محدوده مجاز برای جریان مرکب در عمق نسبی کمتر از ۰/۵ گزارش شده است. در کانال مرکب با سیلابدشت پوشیده از گیاه، در اعماق نسبی بالاتر نیز به دلیل افزایش نیروی برشی ناشی از اجزای پوشش گیاهی و زبری سطوح مرزی گرا دیان سرعت بین کانال اصلی و سیلابدشت قابل توجه است، که نشانگر تأثیر شدید پوشش گیاهی سیلابدشت بر هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب است. در نتیجه پوشش گیاهی در سیلابدشت باعث می‌شود که سطح آستانه عمق نسبی برای برقراری جریان مرکب افزایش یابد. در سناریوهای مختلف مدلسازی عددی در تحقیق حاضر، عمق نسبی جریان برابر با ۰/۳۷، ۰/۲۵ و ۰/۱۸ است، که کمتر از مقدار آستانه ۰/۵ می‌باشند.

خطای اندازه‌گیری در مدل فیزیکی تاکیویا و همکاران (۲۰۱۴) در حدود ۱/۳ گزارش شده است. در این تحقیق، سعی گردید تا مدل عددی با تنظیمات گوناگون کاربری بتواند با کمترین خطای ممکن شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی را شبیه‌سازی نماید.

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

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

تنظیمات مدل برای مطالعه حاضر

برای مدل‌سازی عددی FLOW-3D از نسخه ۱۱.۲ نصب شده بر روی سرور تحت ویندوز ۱۰ در دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با ۲۴ پردازنده استفاده شد. برای تهیه هندسه کانال مرکب دوزنقه‌ای دارای پوشش گیاهی در سیلابدشت، از نرم‌افزار AutoCad استفاده شد. در این تحقیق، ابعاد کانال مشابه ابعاد فلوم آزمایشگاهی تحقیق (Takuya et al., 2014) در نظر گرفته شد با این تفاوت که ۱ متر به ابتدای کانال جهت تامین فاصله دو برابر عرض کانال (۱/۶) متری جهت تامین توسعه یافتگی جریان قبل از رسیدن به ناحیه پوشش گیاهی و همچنین ۱ متر به انتهای کانال جهت جلوگیری از تأثیر جریان خروجی بر الگوهای جریان، بیشتر در نظر گرفته شد (شکل ۳). جهت بررسی تأثیر پوشش گیاهی ناهمگون با ارتفاع‌های مختلف بر سرعت جریان، پوشش گیاهی 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، در سیلابدشت‌ها با ۴ چیدمان مختلف قرار داده شد (شکل ۲). طراحی چیدمان‌های پوشش گیاهی بر اساس این واقعیت می‌باشد که پوشش گیاهی در آبراهه‌های طبیعی دارای ارتفاع‌های متفاوت هستند و معمولاً در لایه زیرین تراکم‌تر و در لایه بالایی پراکنده‌تر (تک‌تر) می‌باشند. علاوه بر این، پوشش گیاهی بلندتر اغلب در نزدیکی ساحل رودخانه، یعنی دیواره کانال در فلوم آزمایشگاهی، و پوشش گیاهی کوتاه‌تر بیشتر در قسمت داخلی آبراهه مشاهده می‌شوند (Nepf et al., 2007). بر اساس معیار (Nepf (2012) تمامی تراکم‌ها (به‌جز چیدمان شماره ۲) مترامک محسوب می‌شود، زیرا در تمامی حالت‌های مورد مطالعه $\lambda_{veg} \cdot h_v > 0/1$ است که در آن ارتفاع گیاه بر حسب متر می‌باشد.

به منظور بررسی رفتار پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها، شبیه‌سازی‌ها در سه حالت جریان کاملاً مستغرق برای در نظر گرفتن شرایط

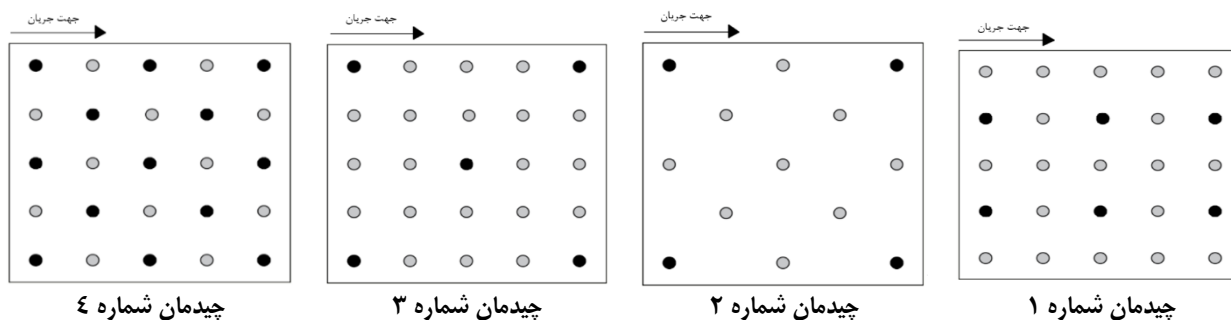
سیلابی (هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند کاملاً مستغرق)، نیمه مستغرق (پوشش گیاهی کوتاه مستغرق و پوشش گیاهی بلند غیر مستغرق) و غیر مستغرق جهت در نظر گرفتن پایین بودن سطح آب آبراهه (هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند غیر مستغرق) انجام شد. ابتدا شبیه-سازی‌های مربوط به مدل فیزیکی تحقیق تاکیویا و همکاران (۲۰۱۴) که در آن نصف سیلابدشت دارای پوشش گیاهی بوده، انجام شد و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس جهت تایید و کاربرد مدل عددی، شبیه‌سازی‌های مربوط به چیدمان‌های شکل (۲) با سیلابدشت‌های کاملاً پوشیده با پوشش گیاهی در دو لایه اجرا شد (شکل ۴). شرایط هیدرولیکی جریان در ساخت مدل عددی تحقیق حاضر در جدول (۲) و فاصله و نوع آرایش استوانه‌ها در چیدمان‌های شماره ۱ تا ۴ در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲- شرایط هیدرولیکی جریان در ساخت مدل عددی تحقیق حاضر

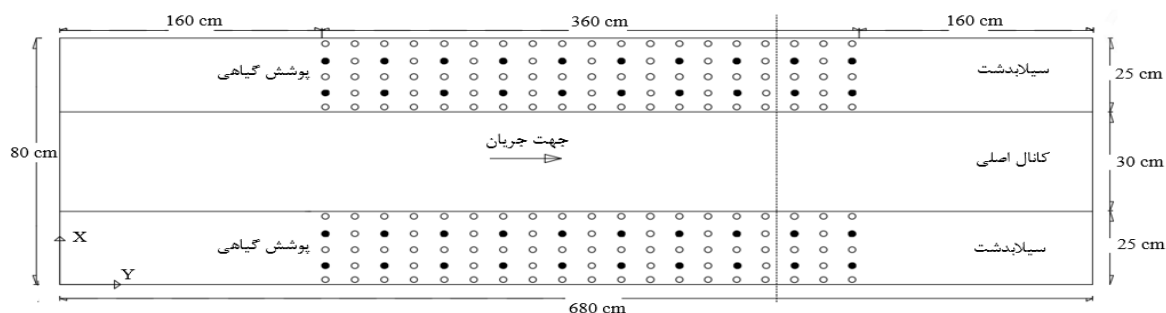
شرایط جریان	عمق آب در سیلابدشت h_f (cm)	عمق آب در آبراهه اصلی h_m (cm)	تراکم پوشش گیاهی λ_{veg} (m^{-1})	قطر پوشش گیاهی D (mm)	ارتفاع پوشش گیاهی کوتاه h_{vs} (cm)	ارتفاع پوشش گیاهی بلند h_{vt} (cm)	بده Q (l/s)	سرعت متوسط مقطع مرکب U (m/s)	عدد فرود مقطع مرکب Fr	عدد رینولدز جریان Re^*
غیر مستغرق	۵/۷۵	۹/۲۵	۱	۱۲	۶	۱۲	۱۰	۰/۱۸۱	۰/۲۲	۱۲۵۰۷
نیمه مستغرق	۱۰	۱۳/۵	۱	۱۲	۶	۱۲	۱۸	۰/۲۰۲	۰/۱۹۳	۲۲۵۰۳
کاملاً مستغرق	۱۵	۱۸/۵	۱	۱۲	۶	۱۲	۲۸	۰/۲۳	۰/۱۸	۴۰۲۳۶

جدول ۳- خلاصه‌ای از آرایش استوانه‌های کوتاه و بلند در تحقیق حاضر

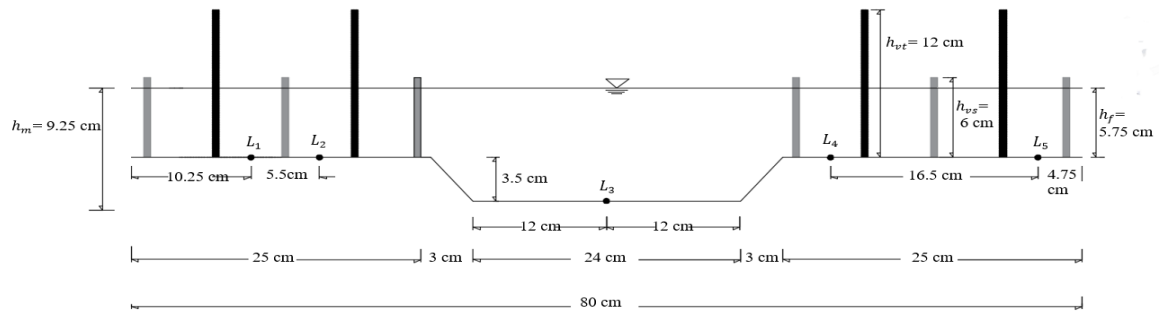
چیدمان	آرایش استوانه‌های پوشش گیاهی		ΔS (cm)	فاصله بین استوانه‌های پوشش گیاهی		ارتفاع پوشش گیاهی (cm)
	بلند	کوتاه		بلند	کوتاه	
چیدمان شماره ۱	خطی	خطی	۵/۵	خطی	خطی	۱۲
چیدمان شماره ۲	خطی	زیگزاگی	۱۱	زیگزاگی	خطی	۱۲
چیدمان شماره ۳	زیگزاگی	خطی	۵/۵	خطی	خطی	۱۲
چیدمان شماره ۴	زیگزاگی	زیگزاگی	۵/۵	زیگزاگی	زیگزاگی	۱۲



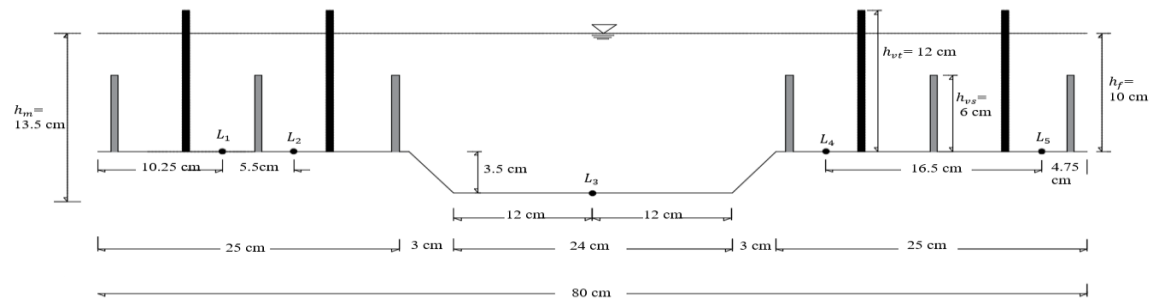
شکل ۲- چیدمان مختلف پوشش گیاهی سیلابدشت در مدل‌های شبیه‌ساز (دایره‌های توپر نشان‌دهنده استوانه‌های بلند و دایره‌های توخالی نشان‌دهنده استوانه‌های کوتاه می‌باشند)



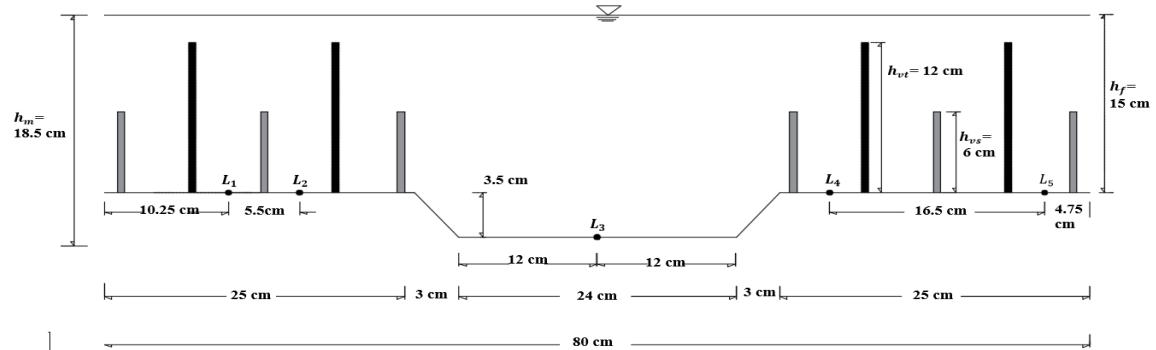
شکل ۳- نمای کانال با سیلابدشت‌های کاملاً پوشیده از پوشش گیاهی با چیدمان شماره ۱ در مدل شبیه‌ساز (دایره‌های توپر نشان‌دهنده استوانه‌های بلند و دایره‌های توخالی نشان‌دهنده استوانه‌های کوتاه می‌باشند)



الف) شرایط غیر مستغرق



ب) شرایط نیمه مستغرق



ج) شرایط کاملا مستغرق

شکل ۴- شرایط جریان در مدل شبیه‌ساز (چیدمان شماره ۱)

با توجه به شرایط مدل فیزیکی، شبیه‌سازی جریان در مدل عددی بصورت پایدار (یا ماندگار: Steady flow) مورد نظر قرار گرفت، و حدود ۲۰ سناریوی مدلسازی عددی برای شرایط جریان پایدار (با بده معین) طراحی گردید (جدول ۴). از نظر پایداری حل عددی مدل ریاضی (Stability of solution) آزمون‌های مقدماتی جهت تنظیمات کاربری مدل صورت یافت. براساس معیارهای مدلسازی ریاضی، از پایداری حل عددی مدل اطمینان حاصل گردید. همچنین، با تحلیل حساسیت و براساس دامنه خطای مجاز، اندازه شبکه محاسباتی و نوع مدل تلاطمی انتخاب گردیدند. آزمون‌های مدلسازی در سه مرحله واسنجی، تأیید و کاربرد مدل در جدول (۴) نمایش داده شده است. در تحقیق حاضر، سه مدل تلاطمی LES، RNG و $k - \epsilon$ مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده از مدل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (Takuya et al. (2014) مشاهده شد که مدل تلاطمی RNG دارای دقت بیشتر، زمان اجرای کوتاه‌تر و خطای کمتری نسبت به دو مدل تلاطمی LES و $k - \epsilon$ می‌باشد (جدول ۴)، از این‌رو مدل تلاطمی RNG برای سایر شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. 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. مدت زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ ثانیه بود. به منظور بررسی تأثیر شبکه محاسبات عددی بر روی نتایج، چهار اندازه شبکه مورد آزمون قرار گرفت. به این منظور در شبیه‌سازی‌های حساسیت‌سنجی سه بلوک با دو اندازه شبکه متفاوت در نظر گرفته شد، یعنی در بلوک اول و بلوک سوم که در مناطق فاقد پوشش گیاهی در نظر گرفته شده بودند اندازه شبکه بزرگتر و در بلوک دوم که محل قرارگیری پوشش گیاهی در سیلابدشت بود اندازه شبکه جهت شناسایی بهتر استوانه‌های پوشش گیاهی توسط مدل، کوچکتر در نظر گرفته شد (شکل ۵). از این‌رو اندازه شبکه در بلوک‌های اول و سوم برابر با ۰/۰۱ متر و در بلوک دوم

برابر با ۰/۰۱۲، ۰/۰۱، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۰۶ متر جهت حساسیت‌سنجی تاثیر شبکه در نظر گرفته شد. با توجه به بررسی نتایج عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، اندازه شبکه ۰/۰۰۶ متر دارای دقت بیشتر و خطای کمتری نسبت به سایر اندازه شبکه‌ها بود (جدول ۴). خطاهای محاسباتی با استفاده از معیار RMSE مورد بررسی قرار گرفت.

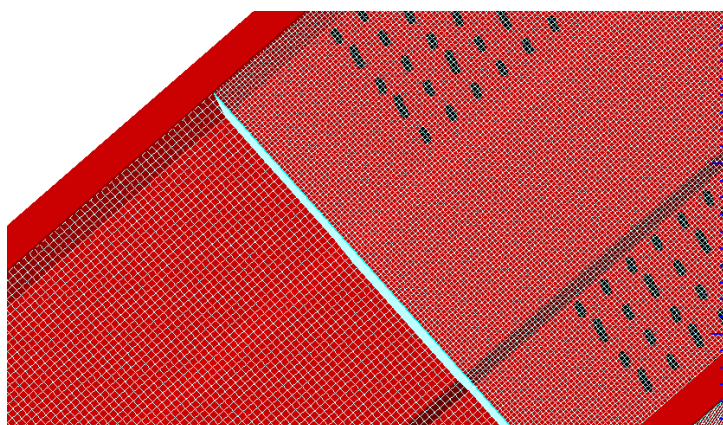
$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n ((obs_i - com_i)^2 / n)} \quad \text{رابطه ۷}$$

جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های جریان، نقاط کنترلی مهم (L1-L5) روی مقطع X انتخاب شدند (شکل ۴). این نقاط در ناحیه مرکزی سیلابدشت‌ها (L1 و L2)، در ابتدا و انتهای سیلابدشت‌ها (L4 و L5) و همچنین در خط مرکزی آبراهه اصلی در امتداد عرض کانال (L3) قرار دارند. Yang et al. (2007) نیز در تحقیق خود این نقاط کنترلی را بررسی کرده‌اند.

جدول ۴- مشخصات آزمون‌های عددی در تحقیق حاضر

RMSE (%)	حداکثر تعداد تکرارها (Ni)	مدل تلاطمی	اندازه شبکه d(m)			عمق آب در سیلابدشت h_f (cm)	عمق آب در آبراهه اصلی h_m (cm)	نوع آزمون بده (l/s)	کد آزمون
			محدوده بعد از محدوده پوشش گیاهی	محدوده پوشش گیاهی	محدوده قبل از محدوده پوشش گیاهی				
۶/۴	۳۳۵۸۸	LES	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	VM1T1
۵/۶	۳۸۱۵۰	LES	۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	VM2T1
۴/۶	۵۱۹۶۵	LES	۰/۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	VM3T1
۴/۱	۴۹۶۵۲	LES	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	VM4T1
۳/۸	۷۰۲۱۲	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	VM4T2
۶/۳	۵۷۸۳۲	K-ε	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	VM4T3
۱/۵	۶۵۱۵۹	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	PM4T2
۱/۶	۶۸۹۵۳	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	C1M4T2Q1
۲/۱	۵۰۷۰۵	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۰	۱۳/۵	۱۸	C1M4T2Q2
۲/۰	۵۵۷۹۰	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۵	۱۸/۵	۲۸	C1M4T2Q3
۱/۳	۴۷۹۸۶	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	C2M4T2Q1
۱/۹	۵۹۴۱۹	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۰	۱۳/۵	۱۸	C2M4T2Q2
۲/۵	۵۸۴۱۲	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۵	۱۸/۵	۲۸	C2M4T2Q3
۱/۵	۴۷۹۵۴	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	C3M4T2Q1
۱/۶	۷۵۸۷۸	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۰	۱۳/۵	۱۸	C3M4T2Q2
۱/۹	۶۴۴۰۹	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۵	۱۸/۵	۲۸	C3M4T2Q3
۱/۱	۴۵۹۲۹	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۵/۷۵	۹/۲۵	۱۰	C4M4T2Q1
۲/۱	۵۱۹۸۷	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۰	۱۳/۵	۱۸	C4M4T2Q2
۲/۶	۶۰۸۴۱	RNG	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۱۵	۱۸/۵	۲۸	C4M4T2Q3

تعریف کدهای آزمون در جدول (۴) به صورت، V: مدل فیزیکی، M: اندازه سلول شبکه، T: مدل تلاطمی، P: مدل تایید، Q: بده جریان، C1: چیدمان شماره ۱، C2: چیدمان شماره ۲، C3: چیدمان شماره ۳ و C4: چیدمان شماره ۴، می‌باشد.



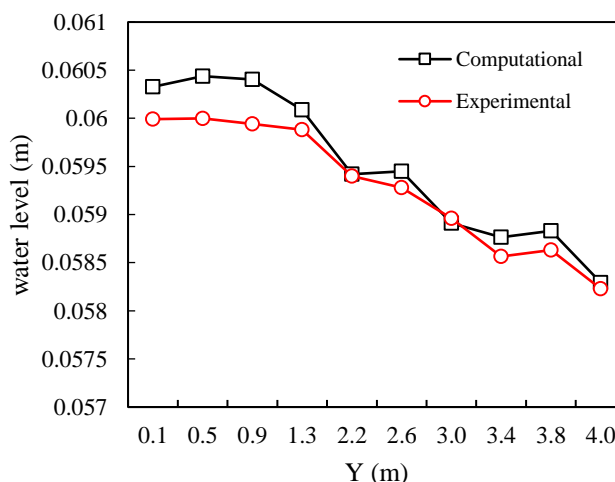
شکل ۵- شبکه‌بندی مدل و تفاوت اندازه سلول‌ها در بلوک ۱ (ناحیه فاقد پوشش گیاهی با اندازه شبکه ۰/۰۱ متر) و بلوک ۲ (محل قرار گیری پوشش گیاهی با اندازه شبکه ۰/۰۰۶)، چیدمان شماره ۱

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل عددی

جهت واسنجی و تأیید مدل از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق Takuya *et al.* (2014) استفاده شد. آزمون‌های مدل‌سازی در دو مرحله واسنجی و تأیید مدل در جدول (۴) نمایش داده شده است. شکل (۶) مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی عمق آب را نشان می‌دهد. محور عمودی عمق جریان و محور افقی طول کانال در جهت Y را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج می‌توان متوجه شد که نتایج مدل عددی تطابق خوبی با نتایج مدل فیزیکی دارد، ولی مقدار کمی بیش برآورد می‌کند. با وجود آزمون تنظیمات کاربری گوناگون و تکرار و دقت در روند مدل‌سازی، نتایج مدل نشانگر بیش برآورد بود، و این خطای سیستماتیک بر طرف نگردید، که باید از محدودیت‌های مدل‌سازی عددی این تحقیق بشمار آید. بهرحال، شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که میزان خطای برآورد برای نیمرخ سطح آزاد آب کمتر از ۱۰ درصد، برای سرعت متوسط عمقی در حدود ۱/۵ درصد، و برای عمق آب نیز در حدود ۳ درصد بوده است؛ که در محدوده مجاز خطای مدل‌سازی عددی هیدرولیک جریان قرار دارد.

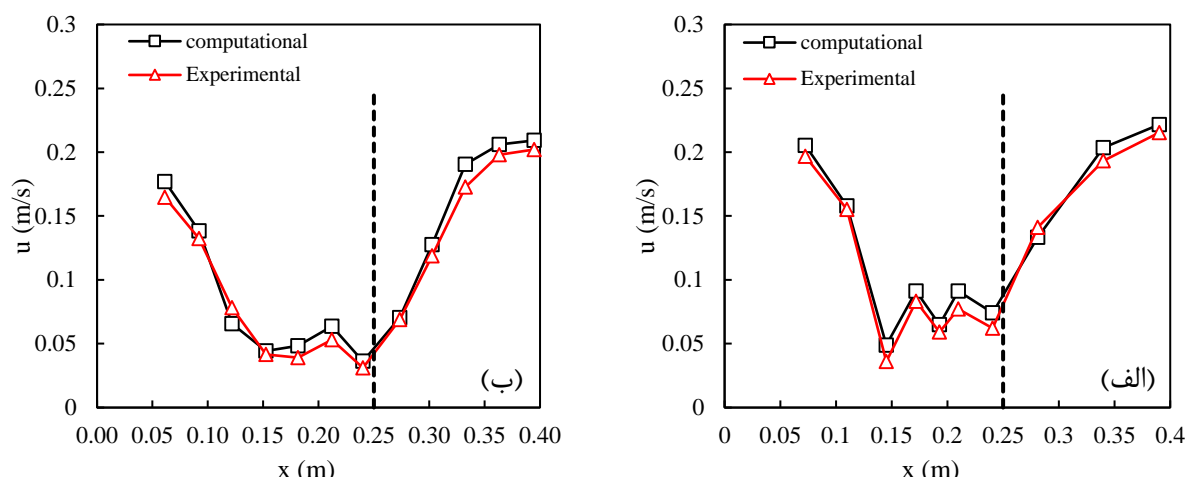
نتایج نشان می‌دهد که وجود پوشش گیاهی به طور کلی موجب افزایش سطح آب در بالادست پوشش گیاهی در طول کانال می‌گردد (Nikmanesh, 2011)، این افزایش عمق آب تا فاصله $Y = 1/3m$ ادامه یافته اما پس از آن، افت ناگهانی در سطح آب مشاهده می‌گردد. چنین افت ناگهانی در سطح آب با مشاهدات Osman (2003) نیز تطابق دارد، این روند کاهش سطح آب تقریباً تا انتهای منطقه پوشش گیاهی ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۶-مقایسه عمق آب در نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی (PM4T2)

شکل (۷-الف) و (۷-ب) مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی و سرعت سطحی را نشان می‌دهد. خروجی‌های مدل در نصف عرض کانال گرفته شد. محور عمودی سرعت جریان و محور افقی فاصله عرضی در جهت x را نشان می‌دهد. با مشاهده نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌توان دریافت که سرعت جریان به طور قابل توجهی در ناحیه دارای پوشش گیاهی در سیلابدشت (یعنی ناحیه $0/15 m < x < 0/25 m$) کاهش می‌یابد. سرعت‌ها در نواحی فاقد پوشش گیاهی در سیلابدشت (یعنی ناحیه $0/15 m < x < 0/25 m$) و همچنین در آبراهه اصلی (یعنی ناحیه $0/4 m < x < 0/25 m$) به طور قابل ملاحظه بیشتر است. این نشان می‌دهد که وجود پوشش گیاهی در لبه سیلابدشت‌های می‌تواند مقاومت قابل توجهی در برابر جریان ایجاد کند و می‌تواند بر ظرفیت انتقال بده مقطع اصلی تأثیر بگذارد.

نتایج نشان می‌دهد که داده‌های محاسباتی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد و مدل عددی حاضر اعتبار خوبی دارد. با این حال، نتایج محاسباتی یک تفاوت جزئی را با نتایج آزمایشگاهی در بیش‌برآورد کردن مقادیر سرعت نشان می‌دهد، که با توجه اینکه مقادیر RMSE کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد (جدول ۴) و نشان از دقت بالای مدل دارد، این مقدار خطا قابل قبول است.



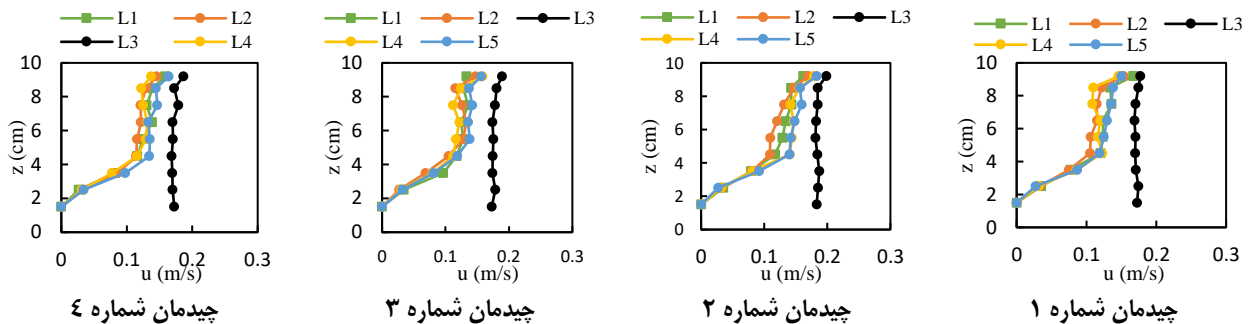
شکل ۷- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی (الف) سرعت سطحی (ب) سرعت متوسط عمقی در نیمه عرض کانال (خط چین‌ها محل شروع سیلابدشت را نشان می‌دهند)

پروفیل عمودی توزیع سرعت در جهت جریان

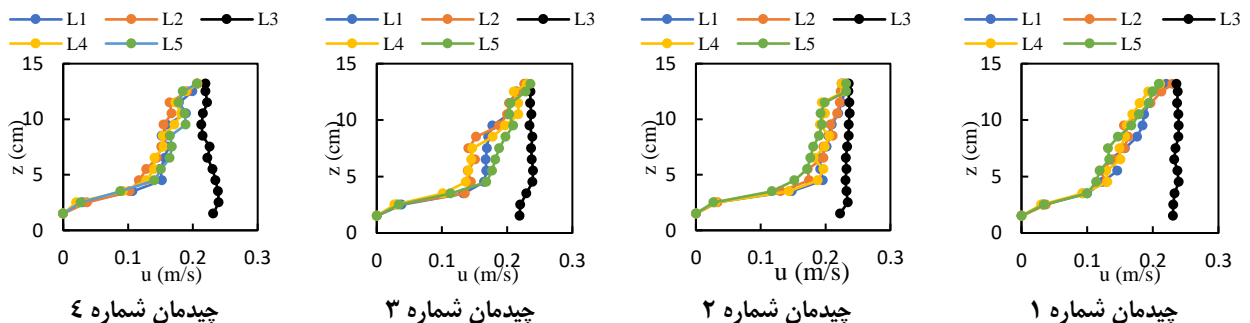
پروفیل عمودی توزیع سرعت در جهت جریان در نقاط کنترلی (L1, L2, L3, L4, L5) برای هر چهار چیدمان شماره ۱ الی ۴ در سه حالت شرایط جریان غیر مستغرق، نیمه مستغرق و کاملاً مستغرق در شکل (۸) نشان داده شده است. محور افقی نشان دهنده سرعت جریان (u) بر حسب متر بر ثانیه و محور عمودی نشان دهنده فاصله نقاط برداشت سرعت از کف کانال تا سطح آب بر حسب سانتی‌متر است. با توجه به شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که سرعت جریان در هر چهار چیدمان و در هر سه حالت شرایط جریان به طور قابل توجهی در منطقه سیلابدشت (L4-L5 و L1-L2) کاهش می‌یابد، و با مشاهده نمودارها می‌توان دریافت که تفاوت زیادی بین بزرگی سرعت محاسبه شده در نقاط کنترلی در ناحیه سیلابدشت‌ها وجود ندارد. اما مقدار سرعت در ناحیه آبراهه اصلی یعنی نقطه کنترلی L3 بیشتر از مقدار سرعت در سیلابدشت‌ها است. این نتیجه نشان‌دهنده این موضوع است که پوشش گیاهی در سیلابدشت‌های آبراهه‌های مرکب به طور قابل توجهی بر توزیع سرعت تأثیر می‌گذارد و مقاومت 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, 2016). از طرفی، سرعت جریان در آبراهه اصلی که فاقد پوشش گیاهی است، افزایش می‌یابد و این افزایش سرعت می‌تواند جبرانی برای کاهش سرعت ناشی از مقاومت ایجاد شده توسط پوشش گیاهی در برابر جریان در سیلابدشت‌ها باشد. در نتیجه افزایش سرعت در آبراهه اصلی می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت انتقال جریان شود. همچنین با مشاهده پروفیل‌های سرعت می‌توان دریافت که، سرعت جریان در نزدیکی بستر در هر سه حالت شرایط جریان، به دلیل مقاومت ایجاد شده توسط بستر و پوشش گیاهی به کمترین مقدار خود می‌رسد. با این حال، تفاوت‌هایی در پروفیل‌های سرعت مشاهده شده در شرایط جریان کاملاً مستغرق، نیمه مستغرق و غیر مستغرق وجود دارد. شکل (۸) پروفیل‌های توزیع سرعت در شرایط جریان غیر مستغرق را نشان می‌دهد. در این حالت با توجه به اینکه هر دو پوشش گیاهی با ارتفاع کوتاه و بلند غیر مستغرق هستند، پروفیل سرعت شبیه به پروفیل سرعت در جریان‌های دارای پوشش گیاهی یک لایه و با یک ارتفاع یکسان می‌باشد و توزیع سرعت در بالای ناحیه بستر تا سطح آزاد در تمام نقاط تقریباً ثابت است. این اتفاق به این دلیل است که هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند در این شرایط غیرمستغرق بودند و نیروی کشانه تقریباً ثابتی توسط مان‌های پوشش گیاهی به جریان وارد شد. این پروفیل توزیع سرعت تقریباً ثابت مشاهده شده با نتایج بدست آمده توسط محققان پیشین در بررسی ساختار جریان در پوشش گیاهی غیرمستغرق مطابقت دارد. (Tsujiimoto *et al.*, 1992; Nepf & Vivoni, 2000).

اما پروفیل‌های عمودی سرعت شبیه‌سازی شده در سیلابدشت‌ها برای شرایط جریان نیمه مستغرق ساختار متفاوتی را به دلیل مستغرق بودن پوشش گیاهی کوتاه و غیرمستغرق بودن پوشش گیاهی بلند نشان می‌دهد (شکل ۹). با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که توزیع سرعت در بالای منطقه بستر تا انتهای پوشش گیاهی کوتاه یعنی $z = 6 \text{ cm}$ در چیدمان‌های شماره ۱ الی ۴ تقریباً رفتار یکسانی را نشان می‌دهد و بعد از آن یک نقطه عطف بر بالای پوشش گیاهی کوتاه مستغرق تا ارتفاع $z = 12 \text{ cm}$ وجود دارد که با نتایج بدست‌آمده توسط مطالعات قبلی انجام شده بر روی ساختار جریان در پوشش گیاهی ناهمگون دو لایه مطابقت دارد (Liu *et al.*, 2010; Anjum &)

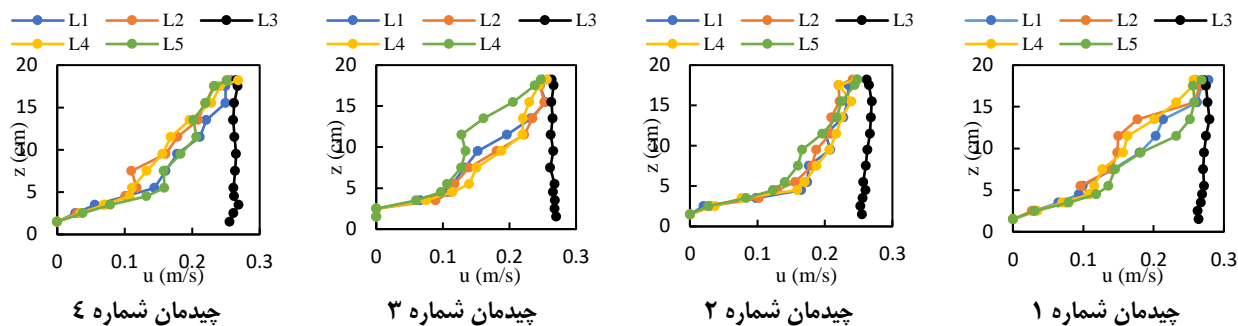
(Tanaka, 2019). این نقطه عطف در پروفیل‌های سرعت بالای پوشش گیاهی کوتاه مستغرق تا سطح آزاد آب به دلیل تبادل مومنوم بین ناحیه بالای پوشش گیاهی کوتاه مستغرق و جریان عبوری تحت تأثیر پوشش گیاهی بلند است. گرادیان سرعت تا ناحیه $z = ۱۲\text{cm}$ یعنی $۲/۵$ سانتی‌متر بالای ارتفاع پوشش گیاهی کوتاه ادامه یافت و سپس تا سطح آزاد آب به یک مقدار ثابت رسید. بنابراین، یک لایه اختلاط بر روی ناحیه بالای پوشش گیاهی مستغرق کوتاه ($z = ۶\text{cm}$ تا $z = ۱۲\text{cm}$) ایجاد می‌شود. این لایه اختلاط زمانی ایجاد می‌شود که تاج پوشش گیاهی، مومنوم کافی برای ایجاد یک نقطه عطف در پروفیل سرعت را ایجاد کند، مومنومی که برای ایجاد ناپایداری کلونین-هلمهولتز لازم است. بنابراین، گرداب‌های تولید شده ناشی از این ناپایداری در تبادل جرم و مومنوم بین تاج پوشش و جریان عبوری سبب ایجاد سرعت‌های منفی اطراف المان‌های پوشش گیاهی می‌گردد (Finnigan, 2000; Ghisalberti & Nepf, 2006). با توجه به شکل (۱۰) که پروفیل‌های توزیع سرعت در شرایط جریان کاملا مستغرق را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که در چیدمان‌های ۱ تا ۴، سرعت جریان با افزایش مقادیر z از پایین کانال به سطح آزاد جریان افزایش یافته است. در این حالت دو نقطه عطف به دلیل مستغرق بودن هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند، بر روی پروفیل سرعت وجود دارد. علاوه بر این، توزیع سرعت از یک الگوی S شکل در سیلابدشت‌ها پیروی می‌کند. اما عمدتاً، یک پروفیل تقریباً لگاریتمی در آبراهه اصلی یعنی نقطه کنترلی (L3) مشاهده می‌شود. این توزیع‌ها با نتایج آزمایشگاهی Rahimi *et al.* (2020) و Yang *et al.* (2007) مطابقت دارد. سرعت جریان عبوری از بالای پوشش گیاهی با ارتفاع بلندتر یعنی $z = ۱۵/۵\text{cm}$ افزایش می‌یابد. دلیل این امر مقاومت کمتر در مقابل جریان می‌باشد. همچنین، نوسانات سرعت در پروفیل‌های سرعت در نقاط کنترلی سیلابدشت‌ها (L1-L2 و L4-L5) به دلیل تأثیر المان‌های پوشش گیاهی مشاهده می‌شود، این در حالی است که هیچ نوسان سرعتی در پروفیل سرعت در نقطه کنترلی (L3) در آبراهه اصلی مشاهده نمی‌شود. این نوسانات در پروفیل‌های سرعت نیز توسط محققان پیشین مشاهده شده است (Anjum *et al.*, 2018; Anjum & Tanaka, 2019).



شکل ۸- پروفیل عمودی توزیع سرعت در شرایط جریان غیر مستغرق



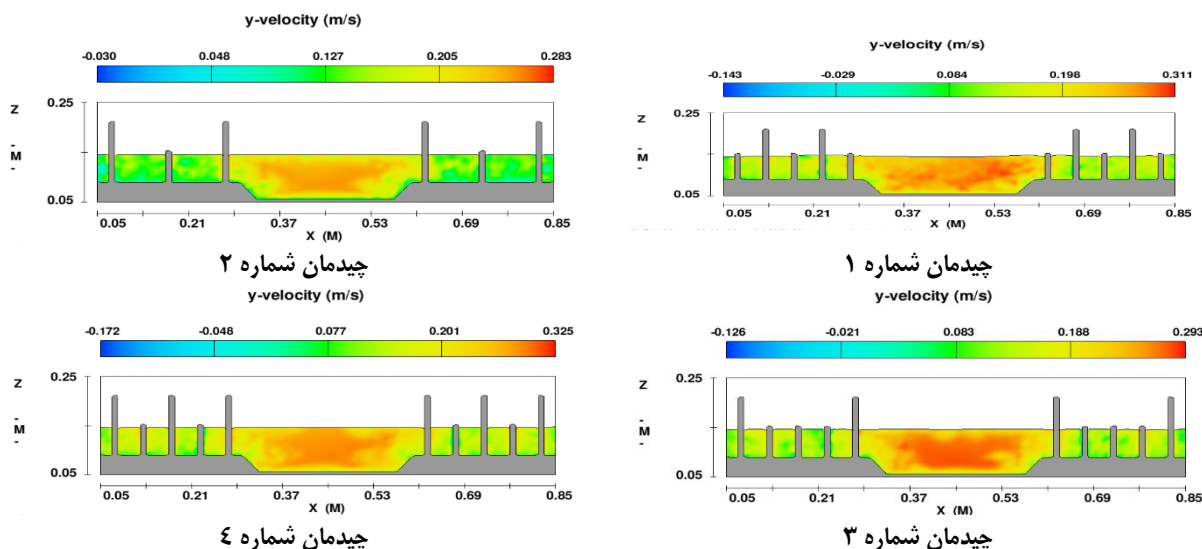
شکل ۹- پروفیل عمودی توزیع سرعت در شرایط جریان نیمه مستغرق



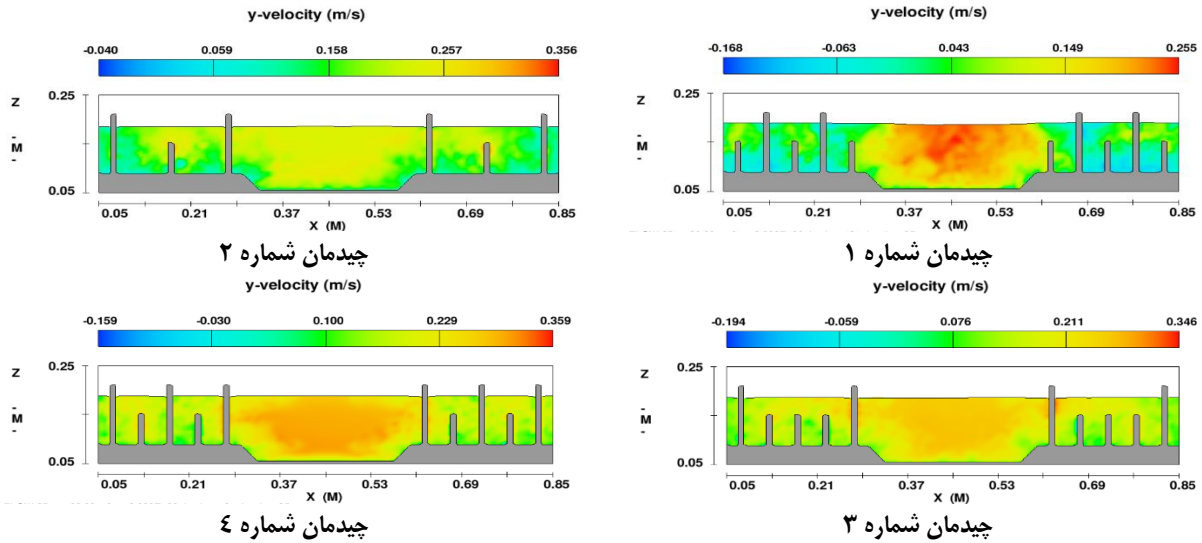
شکل ۱۰- پروفیل عمودی توزیع سرعت در شرایط جریان کاملا مستغرق

نواحی هم‌سرعت

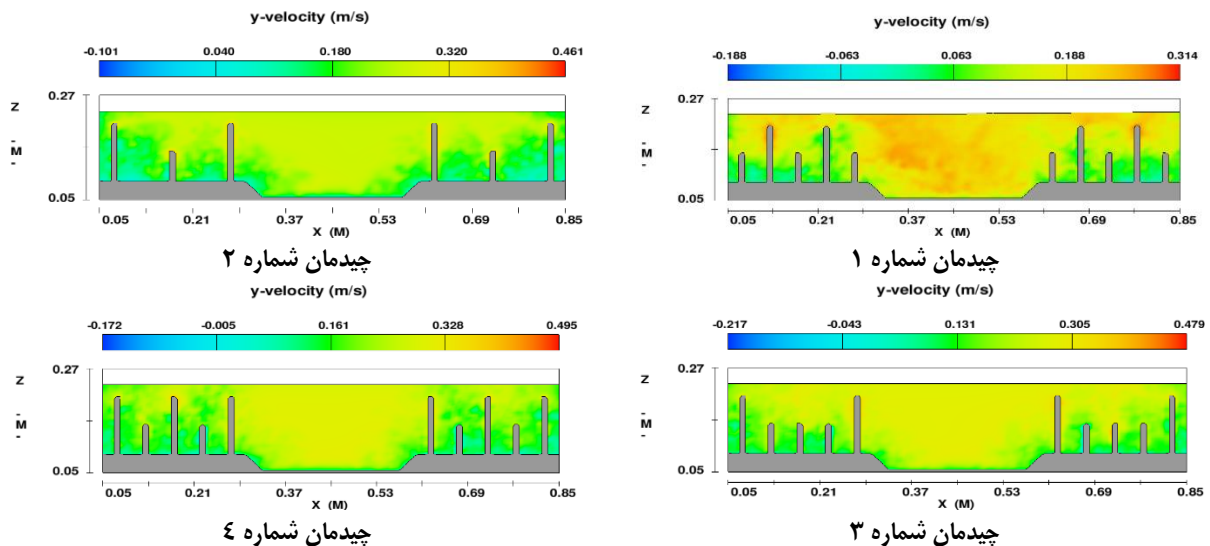
نواحی هم‌سرعت در عرض کانال (در امتداد X) و در $Y = 3/3 \text{ m}$ (۳/۳ متر فاصله از ابتدای کانال) در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) نشان شده است. با توجه به کانتورها می‌توان متوجه شد که سرعت‌ها نزدیک به بستر به دلیل مقاومت ایجاد شده توسط بستر و پوشش گیاهی کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تفاوت واضحی بین مقادیر سرعت در نواحی سیلابدشت‌ها و ناحیه آبراهه اصلی وجود دارد. مقادیر سرعت جریان در آبراهه اصلی یعنی $25 < X < 55$ سانتی‌متر، بیشتر از سیلابدشت‌ها است، به گونه‌ای که حداکثر مقادیر سرعت در ناحیه مرکزی آبراهه اصلی یعنی $X \approx 40$ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و نواحی سیلابدشت یعنی $X \approx 25$ سانتی‌متر و $X \approx 55$ سانتی‌متر، ناپایداری جریان در جهت عرضی به دلیل وجود پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت‌ها که توسط تنش برشی جریان ایجاد می‌شود، منجر به تشکیل گردابه‌های منسجم و تبادل مومنتوم می‌گردد (Huai et al., 2019; Tang et al., 2019). سرعت در نواحی سیلابدشت به دلیل نیروی کشانه ایجاد شده توسط المان‌های پوشش گیاهی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود تبادل مومنتوم بیشتری از آبراهه اصلی (دارای سرعت بالا) به سیلابدشت‌ها (دارای سرعت کم) رخ دهد. علاوه بر این، این نواحی با سرعت جریان کم می‌توانند به طور قابل توجهی سبب ته‌نشین شدن رسوبات در سیلابدشت‌های دارای پوشش گیاهی شوند. توزیع سرعت در شرایط جریان غیر مستغرق (شکل ۱۱) که در آن هر دو پوشش گیاهی کوتاه و بلند غیرمستغرق هستند، تقریباً ثابت است. اما یک لایه اختلاط عمودی در شرایط جریان نیمه مستغرق بر روی ناحیه پوشش گیاهی کوتاه مستغرق (شکل ۱۲) و در شرایط جریان کاملا مستغرق بر روی ناحیه پوشش گیاهی کوتاه و بلند مستغرق (شکل ۱۳) در نواحی سیلابدشت، نیز مشاهده می‌شود که به دلیل تبادل عمودی مومنتوم بر روی این نواحی از جریان، مطابقت با نتایج مشاهده شده در شکل (۸) را نشان می‌دهد. مقادیر سرعت منفی در پشت المان‌های پوشش گیاهی به دلیل چرخش جریان در اطراف پوشش گیاهی و ایجاد گردابه‌ها در پشت پوشش گیاهی می‌باشد. با این حال، جریان چرخشی در اطراف پوشش گیاهی بلند شدیدتر از اطراف پوشش گیاهی کوتاه است. دلیل آن می‌تواند مقاومت بیشتر پوشش گیاهی بلند در مقابل جریان نسبت به پوشش گیاهی کوتاه باشد.



شکل ۱۱- نواحی هم‌سرعت در شرایط جریان غیر مستغرق



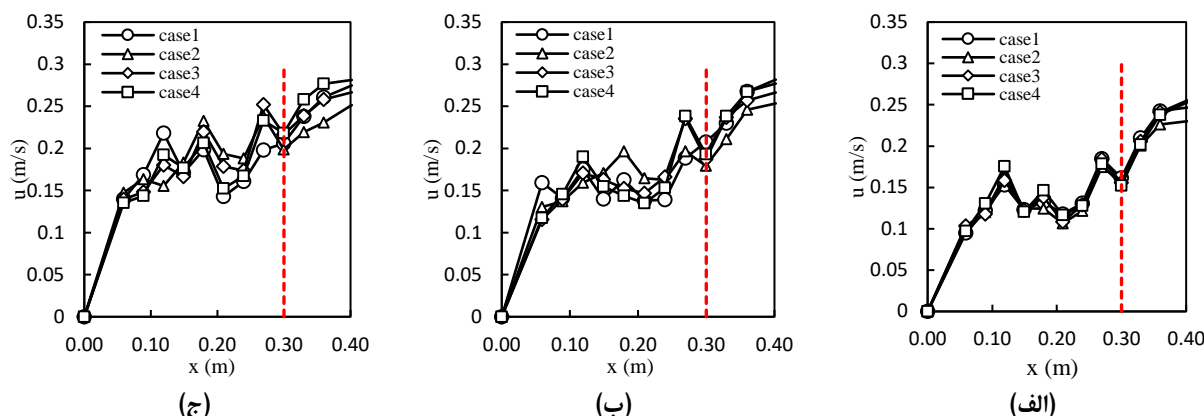
شکل ۱۲- نواحی هم‌سرعت در شرایط جریان نیمه مستغرق



شکل ۱۳- نواحی هم‌سرعت در شرایط جریان کاملا مستغرق

توزیع سرعت متوسط عمقی در عرض کانال

تغییرات توزیع سرعت متوسط عمقی در نصف عرض کانال در امتداد X (به دلیل تقارن) در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، در نواحی مجاور المان‌های پوشش گیاهی مقدار سرعت بیشتر است. در امتداد فصل مشترک آبراهه اصلی و سیلابدشت، افزایش شدیدی در سرعت متوسط عمقی را می‌توان در حین حرکت از ناحیه سیلابدشت به ناحیه آبراهه اصلی مشاهده کرد، که ناشی از عدم وجود مقاومت ناشی از پوشش گیاهی در برابر جریان در آبراهه اصلی (که فاقد پوشش گیاهی است) می‌باشد. این افزایش سرعت در آبراهه اصلی افزایش ظرفیت انتقال جریان در آبراهه اصلی را نیز به همراه دارد که در شرایط سیلابی بسیار کارآمد و مفید است و می‌توان از این مزیت جهت کنترل سیلاب در شرایط سیلابی بهره برد. در حالت شرایط جریان غیر مستغرق تفاوت سرعت قابل توجهی بین آبراهه اصلی و سیلابدشت دارای پوشش گیاهی مشاهده می‌شود، اما این اختلاف مقادیر سرعت در حالت‌های شرایط جریان نیمه مستغرق و کاملا مستغرق کمتر است. علاوه بر این، سرعت متوسط عمقی نیز در منطقه سیلابدشت برای شرایط جریان نیمه مستغرق (شکل ۱۴-ب) و کاملا مستغرق (شکل ۱۴-ج) در مقایسه با شرایط جریان غیر مستغرق (شکل ۱۴-الف)، بیشتر است. این اتفاق ممکن است به علت سرعت جریان اولیه بالاتر یا کاهش نیروی کشانه توسط آرایش پراکنده پوشش گیاهی با ارتفاع بلند در شرایط جریان نیمه مستغرق و کاملا مستغرق باشد. در شکل (۱۴) منظور از case همان چیدمان‌های شماره ۱ الی ۴ در شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۱۴- تغییرات توزیع سرعت متوسط عمقی در نصف عرض کانال در امتداد X در شرایط جریان الف) غیر مستغرق، ب) نیمه مستغرق، ج) کاملا مستغرق، (امتداد فصل مشترک آبراهه اصلی و سیلابدشت با خط چین قرمز نشان داده شده است)

نتیجه گیری

در مطالعه عددی حاضر تاثیر پوشش گیاهی دو لایه ناهمگون در سیلابدشت‌های یک آبراهه مرکب بر روی توزیع سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت‌های آن بررسی شد. برای این منظور، از نرم‌افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی سه‌بعدی خصوصیات جریان استفاده شد. مدل عددی با استفاده از داده‌های مدل فیزیکی واسنجی و تایید گردید. متوسط خطای برآورد مدل برای سرعت متوسط عمقی به ترتیب در مرحله واسنجی در دامنه ۴ تا ۶ درصد بود، که در مرحله تایید مدل به حدود ۱/۵ درصد کاهش یافت. همچنین متوسط خطای برآورد عمق آب نیز در حدود ۳ درصد بوده است. نتایج نشان داد که ساختار مدل عددی حاضر قابلیت بازتولید رفتار و خصوصیات جریان سه‌بعدی عبوری از یک آبراهه مرکب با پوشش گیاهی گوناگون در سیلابدشت‌های آن را دارد. نتایج خاص از مطالعه حاضر بشرح زیر است:

در شرایط جریان‌هایی که هر دو نوع پوشش گیاهی کوتاه و بلند در سیلابدشت رودخانه غیرمستغرق گردند، پروفیل‌های عمودی سرعت تقریباً توزیع یکنواختی در عمق جریان دارند.

در شرایط جریان‌های سیلاب‌های بزرگتر، هنگامی که پوشش گیاهی کوتاه مستغرق شود و یا پوشش گیاهی بلند بصورت نیمه مستغرق یا کاملا مستغرق گردد، در پروفیل عمودی توزیع سرعت یک نقطه عطف رخ می‌دهد. به دلیل تبادل عمودی مومنتوم بین تاج پوشش گیاهی و جریان عبوری از روی آن، یک لایه اختلاط قابل توجهی در بالای پوشش گیاهی مستغرق ایجاد می‌گردد. این لایه اختلاط زمانی ایجاد می‌شود که تاج پوشش گیاهی، مومنتوم کافی برای ایجاد یک نقطه عطف در پروفیل سرعت را ایجاد کند، مومنتومی که برای ایجاد ناپایداری کلونین-هلمهولتز لازم است. بنابراین، گرداب‌های تولید شده ناشی از این ناپایداری در تبادل جرم و مومنتوم بین تاج پوشش گیاهی و جریان عبوری سبب ایجاد سرعت‌های منفی اطراف المان‌های پوشش گیاهی می‌گردد.

مقاومت ناشی از حضور پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها سبب کاهش سرعت جریان در ناحیه سیلابدشت رودخانه، و افزایش سرعت و ظرفیت انتقال بده جریان در آبراهه اصلی می‌گردد.

نتایج پژوهش حاضر و مدل عددی آن می‌تواند به بررسی اثر مقاومت پوشش گیاهی بر روی جریان در سیلابدشت و برآورد ظرفیت انتقال بده جریان در آبراهه‌های مرکب کمک نماید. علاوه بر این، مقاومت پوشش گیاهی در ناحیه فصل مشترک نیز به طور قابل توجهی بر تبادل مومنتوم تاثیر می‌گذارد و در صورت اعمال هوشمندانه می‌تواند به جلوگیری از سیلاب و یا کنترل آن کمک کند. مدیریت صحیح و استفاده هوشمندانه از پوشش گیاهی، راهبرد جدیدی برای حفاظت پایدار دیواره و سیلابدشت رودخانه و احیای زیستگاه‌های اکولوژیکی است. مدل عددی حاضر ابزار مناسبی برای بررسی اثر ساختار و تراکم پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت آبراهه‌ها است، که برای مطالعات تکمیلی مورد نظر قرار گرفته است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ahmadi Dehrashid, F., 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.



- Anjum, N., & Tanaka, N. (2020). Study on the flow structure around discontinued vertically layered vegetation in an open channel. *Journal of Hydrodynamics*, 32(3), 454-467. doi: 10.1007/s42241-019-0040-2.
- Anjum, N., Ghani, U., Ahmed Pasha, G., Latif, A., Sultan, T., & Ali, S. (2018). To investigate the flow structure of discontinuous vegetation patches of two vertically different layers in an open channel. *Water*, 10(1), 75. doi: 10.3390/w10010075.
- Carollo, F. G., Ferro, V. I. T. O., & Termini, D. (2002). Flow velocity measurements in vegetated channels. *Journal of hydraulic Engineering*, 128(7), 664-673. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(664).
- Chao, L. I. U., Shan, Y. Q., Yang, K. J., & Liu, X. N. (2013). The characteristics of secondary flows in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 25(3), 422-429. doi.org/10.1016/S1001-6058(11)60381-9
- Chatelain, M., & Proust, S. (2021). Open-channel flows through emergent rigid vegetation: Effects of bed roughness and shallowness on the flow structure and surface waves. *Physics of Fluids*, 33(10), 106602. <https://doi.org/10.1063/5.0063288>
- Chembolu, V., Kakati, R., & Dutta, S. (2019). A laboratory study of flow characteristics in natural heterogeneous vegetation patches under submerged conditions. *Advances in Water Resources*, 133, 103418. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103418>.
- Dehrashid, F. A., Gohari, S., Asim, T., Mishra, R., Khoshkonesh, A., Bahamanpouri, F., & Nsom, B. (2022). Experimental and Numerical Study of Local Scouring Downstream of D-Type Piano Key Weir. *International Journal of COMADEM*, 25(1), 51-62.
- Fathi-Moghadam, M., Kashefipour, M., Ebrahimi, N., & Emamgholizadeh, S. (2011). Physical and numerical modeling of submerged vegetation roughness in rivers and flood plains. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(11), 858-864. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000381](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000381).
- Finnigan, J. (2000). Turbulence in plant canopies. *Annual review of fluid mechanics*, 32(1), 519-57. doi: 10.1146/annurev.fluid.32.1.519.
- Flow Science. (2016). FLOW-3D Documentation.
- Ghani, U., Anjum, N., Pasha, G. A., & 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. doi.org/10.1007/s10652-019-09669-x.
- Ghisalberti, M., & Nepf, H. (2006). The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies. *Environmental Fluid Mechanics*, 6(3), 277-30. doi: 10.1007/s10652-006-0002-4.
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Huai, W. X., Zhang, J., Wang, W. J., & Katul, G. G. (2019). Turbulence structure in open channel flow with partially covered artificial emergent vegetation. *Journal of Hydrology*, 573, 180-193. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.071.
- Ikeda, S., & Kanazawa, M. (1996). Three-dimensional organized vortices above flexible water plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(11), 634-640. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:11(634).
- Khoshkonesh, A., Daliri, M., Riaz, K., Dehrashid, F. A., Bahamanpouri, F., & 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., & 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.
- Kouwen, N., Unny, T. E., & Hill, H. M. (1969). Flow retardance in vegetated channels. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 95(2), 329-342. doi.org/10.1061/JRCEA4.0000652.
- Liu, D., Diplas, P., Hodges, C. C., & 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.
- Nepf, H. M., Sullivan, J. A., & Zavistoski, R. A. (1997). A model for diffusion within emergent vegetation. *Limnology and Oceanography*, 42(8), 1735-1745.
- Nepf, H. M., & 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., White, B., Lightbody, A., & Ghisalberti, M. (2007). Transport in aquatic canopies. In *Flow and transport processes with complex obstructions* (pp. 221-250). Springer, Dordrecht.

- Nepf, H. M. (2012). Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, 50(3), 262-279.
- Nikmanesh, M. (2011). Predict the impact of vegetation on the banks and riverbed hydraulic roughness coefficient in Shiraz River. *Journal of Science and Water Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Khozestan* (in Persian).
- Nezu, I., & Sanjou, M. (2008). Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows. *Journal of hydro-environment research*, 2(2), 62-90. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2008.05.003>
- Osman, E. A. (2003). The Hydraulic Behavior of Vegetated Channel. *M. Sc. Thesis, Ain Shams University, Cairo, Egypt*.
- Pasha, G. A., Tanaka, N., Yagisawa, J., & Achmad, F. N. (2018). Tsunami mitigation by combination of coastal vegetation and a backward-facing step. *Coastal Engineering Journal*, 60(1), 104-125. <https://doi.org/10.1080/21664250.2018.1437014>
- Rahimi, H. R., Tang, X., & Singh, P. (2020). 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](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001865)
- Rameshwaran, P., & Shiono, K. (2007). Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent. *Journal of Hydraulic Research*, 45(3), 302-315. doi: 10.1080/00221686.2007.9521765
- Ren, J. T., Wu, X. F., & Zhang, T. (2021). A 3-D numerical simulation of the characteristics of open channel flows with submerged rigid vegetation. *Journal of Hydrodynamics*, 33(4), 833-843.. <https://doi.org/10.1007/s42241-021-0063-3>.
- Ruonan, B., Liekai, C., Xingkui, W., & Danxun, L. (2016). Comparison of ADV and PIV measurements in open channel flows. *Procedia Engineering*, 154, 995-1001.
- Singh, P., Rahimi, H. R., & Tang, X. (2019). Parameterization of the modeling variables in velocity analytical solutions of open-channel flows with double-layered vegetation. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(3), 765-784. doi.org/10.1007/s10652-018-09656-8.
- Sohrabi, S., Afzalimehr, H., & Singh, V. P. (2022). Estimation of drag coefficient of emergent and submerged vegetation patches with various densities and arrangements in open channel flow. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/09715010.2022.2066482>
- Sun, X., & 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. doi: 10.1016/j.advwatres.2008.12.004.
- 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., Rahimi, H., Singh, P., Wei, Z., Wang, Y., Zhao, Y., & Lu, Q. (2019). Experimental study of open-channel flow with partial double-layered vegetation. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 81, p. 01010). EDP Sciences. doi.org/10.1051/e3sconf/20198101010
- Tang, X., Rahimi, H., Singh, P., Wei, Z., Wang, Y., Zhao, Y., & Lu, Q. (2019). Experimental study of open-channel flow with partial double-layered vegetation. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 81, p. 01010). EDP Sciences.
- Tang, X., Guan, Y., Zhang, Y., Zhang, W., Jiang, Y., Liu, T., & Yi, X. (2021, February). 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, doi:10.1088/1755-1315/668/1/012050
- Tang, X., Rahimi, H., Guan, Y., & Wang, Y. (2021). Hydraulic characteristics of open-channel flow with partially-placed double layer rigid vegetation. *Environmental Fluid Mechanics*, 21(2), 317-342. DOI: 10.1007/s10652-020-09775-1.
- Tsujimoto, T., & Kitamura, T. (1990). Velocity profile of flow in vegetated-bed channels. *KHL progressive report*, 1, 43e55.
- Tsujimoto, T. (1992). Turbulent open-channel flow over bed covered by rigid vegetation. *Journal of Hydr. sc and Hydr. Eng, Japan*, 10(2), 13-25.
- Yang, K., Cao, S., & 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).
- Yonesi, H. A., Omid, M. H., & Ayyoubzadeh, S. A. (2013). The hydraulics of flow in non-prismatic compound channels. *J Civil Eng Urban*, 3(6), 342-356.
- Zhao, F., Huai, W., & Li, D. (2017). Numerical modeling of open channel flow with suspended canopy. *Advances in Water Resources*, 105, 132-143. doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.05.001