Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 1-23

https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.581845.1133

The Effect of Rigid Semi-Submerged Vegetation Cover on Flow Velocity in Compound Channels

Mahdi Soltani Setoobadi[1], Ebrahim Asadi[2*], Tohid Omidpour Alavian[3], Aydin Asadpour[4]

[1]M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
[2]Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
[3]Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Maragheh University, Maragheh, Iran
[4]M.Sc., Department of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

Corresponding Author's E-mail: asadi@azaruniv.ac.ir

Received**: 17 May 2026** Accepted**: 01 Aug. 2026**
Revised**: 21 July 2026** Published**: 25 Mar. 2025**

Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Natural rivers typically consist of a deep main channel and one or two adjacent floodplains. During flood events, water overtops the main channel into the floodplains, creating complex hydraulic interactions between these regions. Vegetation is a key factor influencing flow resistance, velocity distribution, turbulence structure, and momentum exchange in compound channels. The presence of vegetation on floodplains increases their roughness relative to the main channel, intensifying velocity and momentum differences between the two regions. This leads to an increased transverse velocity gradient and generates apparent shear stress at their interface. While previous studies have mainly focused on vegetation in either the floodplain or the main channel separately, in natural rivers vegetation often exists simultaneously in both regions. Therefore, the novelty of the present study lies in investigating the simultaneous presence of rigid vegetation in the center of the main channel and on the floodplain, along with a detailed analysis of the vertical velocity distribution. The main objective is to evaluate the effect of this simultaneous vegetation on flow velocity using the FLOW-3D numerical model at three relative depths of 0.15, 0.20, and 0.25 m.

Keywords: Vegetation, Longitudinal Velocity Distribution, Floodplain, Relative Depth, Composite Channel

Introduction: Compound channels represent a common hydraulic configuration in natural river systems, consisting of a deep main channel flanked by one or two adjacent floodplains. During high-flow events such as floods, water overtops the main channel and spreads across the floodplains, generating complex hydraulic interactions between these two distinct regions. These interactions are characterized by significant differences in flow velocity, momentum transfer, and turbulence characteristics. Vegetation is widely recognized as one of the most critical factors influencing flow resistance, velocity distribution, turbulent structures, and momentum exchange in compound channels (Tsujimoto & Kitamura, 1992; Tang & Knight, 2009; Hamidifar et al., 2016).

Previous research has consistently demonstrated that vegetation substantially reduces flow velocity within vegetated zones while simultaneously redistributing momentum toward adjacent non-vegetated regions (Kang & Choi, 2006). This redistribution of flow alters the transverse velocity gradient and generates apparent shear stress at the interface between the main channel and the floodplain. However, the majority of existing studies have primarily concentrated on vegetation located exclusively in either the floodplain or the main channel, without considering their simultaneous presence. In natural river environments, vegetation commonly exists concurrently in both regions, leading to more intricate and complex flow interactions that remain poorly understood.

Although Wang et al. (2022) investigated the influence of floodplain vegetation in compound meandering channels, the present study fundamentally differs from their work in several key aspects. These differences include channel geometry (straight versus meandering), vegetation characteristics (rigid and flexible with specific mechanical arrangements versus generalized vegetation), and a detailed vertical velocity profile analysis employing an S-shaped approach. Furthermore, this study investigates diverging compound channels with mobile beds, a condition rarely addressed in prior research.

Consequently, the primary research gap lies in the absence of a comprehensive investigation into the simultaneous effects of rigid vegetation with defined longitudinal and transverse spacing on flow hydraulics, particularly concerning detailed vertical velocity distribution in diverging compound channels with mobile beds. The main objective of this study is to evaluate the simultaneous effect of rigid semi-submerged vegetation, located at the center of the main channel and on the floodplain, on flow velocity distribution using the FLOW-3D numerical model at three relative depths of 0.15, 0.20, and 0.25 m.

Materials and Methods: In this study, the hydraulic behavior of flow in a compound channel with rigid semi-submerged vegetation was investigated using numerical simulation. The FLOW-3D computational fluid dynamics (CFD) model was selected due to its robust capabilities in free-surface tracking through the Volume of Fluid (VOF) method, simulation of vegetation as porous obstacles, local mesh refinement, and advanced turbulence modeling. The governing equations of fluid motion, comprising the continuity equation and the Navier–Stokes momentum equations, were solved using the finite volume method. The free surface was modeled using the VOF technique (Hirt & Nichols, 1981). For turbulence closure, the RNG k-ε model was employed, as it provides superior performance for flows characterized by high strain rates and separation zones around vegetation stems (Kang & Choi, 2006; Razavi, 2023).

The geometric configuration of the compound channel was adopted from the experimental study of Trevor (2010), conducted in the hydraulic laboratory flume at Loughborough University. The main channel has a width of 0.12 m, while each floodplain is 0.15 m wide, resulting in a total flume length of 12 m with a longitudinal bed slope of 0.001. Vegetation was represented by rigid cylindrical elements placed simultaneously at the center of the main channel and on the floodplain areas. In the main channel, seven rigid cylinders with a diameter of 0.05 m and center-to-center spacing of 0.50 m were used. For the floodplain, cylinders with a diameter of 0.006 m and spacing of 0.048 m were employed.

The computational domain was discretized using four structured mesh blocks, with local mesh refinement applied around each vegetation stem to enhance accuracy. Boundary conditions included a velocity inlet at the upstream boundary, a pressure outlet at the downstream boundary, no-slip walls with wall functions, zero pressure at the free surface, and a no-slip condition at the bed with a roughness height of 0.001 m. The numerical solution was considered converged when normalized residuals decreased below 10^{-4} and velocity variation at a monitoring point (x = 7.35 m) over 500 time steps was less than 1%.

Model validation was performed by comparing simulated depth-averaged velocities with laboratory measurements from Trevor (2010), showing good agreement with a mean square error (MSE) of approximately 0.024. A grid independence study was conducted with three mesh resolutions, revealing a relative error of 2.3% between the medium (378,000 cells) and fine (650,000 cells) meshes. Following validation, simulations were carried out for three relative flow depths of 0.15, 0.20, and 0.25 m to analyze longitudinal velocity distribution and depth-averaged velocity across the compound channel.

Results and Discussion: The numerical simulations conducted using the FLOW-3D model revealed substantial effects of rigid semi-submerged vegetation on flow velocity distribution within the compound channel. The simultaneous presence of vegetation in both the main channel and floodplain significantly increased hydraulic resistance and fundamentally modified the velocity field throughout the entire channel cross-section. Velocity contours obtained from the simulations clearly indicated that vegetation elements acted as physical flow obstructions, effectively reducing longitudinal velocity in the vegetated zones while simultaneously redirecting flow toward less resistant adjacent areas. This observed behavior is consistent with the findings previously reported by Kang and Choi (2006), who documented similar redistribution patterns in vegetated compound channels.

The results demonstrate that vegetation caused a substantial reduction in flow velocity within the main channel across all three relative depths examined. Compared with the non-vegetated condition, the average longitudinal velocity in the main channel decreased by approximately 59% at a relative depth of 0.15 m, 58% at 0.20 m, and 55% at 0.25 m. This notable reduction occurs because the rigid vegetation elements increase both drag forces and turbulence intensity, effectively dissipating kinetic energy and decelerating the flow within the vegetated region. The observed decrease in velocity reduction with increasing relative depth, declining from 59% to 55%, can be attributed to the reduced relative roughness effect as water depth increases, a finding that aligns well with Wang et al. (2022), who reported a 55–60% reduction range.

In striking contrast to the main channel behavior, the presence of vegetation actually increased the flow velocity in the floodplain region. When vegetation is simultaneously placed in both the main channel and floodplain, the hydraulic resistance created in the central channel redirects a portion of the flow laterally toward the floodplain areas. As a direct consequence, the velocity in the floodplain becomes significantly higher compared to the case without vegetation. Analysis of the dimensionless velocity revealed that the velocity at relative depths of 0.20 m and 0.25 m was approximately 1.08 and 0.94 times the velocity observed at the relative depth of 0.15 m in the floodplain region. This flow redirection is physically explained by the principles of conservation of mass and the pressure gradient established between vegetated and non-vegetated zones.

The physical mechanisms governing these observations can be explained through two primary processes: (1) drag force generated by vegetation stems converts kinetic energy into turbulent kinetic energy and heat, thereby reducing mean velocity, and (2) increased shear stress at the interface between vegetated and non-vegetated zones enhances lateral momentum exchange. This lateral momentum exchange becomes more pronounced as vegetation density increases, which aligns with the findings of Hamidifar et al. (2016).

Depth-averaged velocity analysis further confirmed that vegetation strongly alters the distribution of flow energy across the compound channel. The interaction between the main channel and floodplain becomes more pronounced as vegetation increases flow resistance, thereby enhancing lateral momentum exchange between these regions. A quantitative comparison with previous studies demonstrates that the present results fall within the range of previously reported values (Kang & Choi, 2006: 20–30%; Wang et al., 2022: 55–60%). These findings collectively demonstrate that vegetation plays a critical role in controlling flow patterns in compound channels and must be carefully considered in hydraulic design and flood management studies.

Conclusion: This study investigated the effect of rigid semi-submerged vegetation on flow velocity distribution in compound channels using the FLOW-3D numerical model. After successful validation against experimental data, simulations were conducted at three relative depths (0.15, 0.20, and 0.25 m). The results demonstrate that vegetation significantly reduces flow velocity in the main channel while increasing velocity in the floodplain region. The average reduction in longitudinal velocity within the main channel reached 59%, 58%, and 55% at the respective relative depths. Conversely, flow velocity in the floodplain increased due to flow redistribution caused by vegetation resistance. Dimensionless velocity analysis showed that floodplain velocity at relative depths of 0.20 m and 0.25 m was approximately 1.08 and 0.94 times the velocity at 0.15 m depth. Overall, the presence of rigid vegetation significantly modifies the hydraulic behavior of compound channels by altering velocity distribution and flow interaction between the main channel and floodplain. These findings highlight the importance of considering vegetation effects in hydraulic modeling, river engineering design, and floodplain management, contributing to improved understanding of vegetated flow systems.

© 2025 University of Zabol, Zabol, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۲۳-۱
https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.581845.1133

تاثیر پوشش گیاهی صلب نیمه مستغرق بر سرعت جریان در کانال‌های مرکب

مهدی سلطانی ستوبادی[۱]، ابراهیم اسدی[۲]*، توحید امیدپور علویان[۳]، آیدین اسعدپور[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران
[۲] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران
[۳] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
[۴] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: asadi@azaruniv.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵
وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده: رودخانه‌های طبیعی معمولا از یک کانال اصلی عمیق و یک یا دو سیلاب‌دشت مجاور تشکیل شده‌اند. در زمان وقوع سیلاب، آب از کانال اصلی به سیلاب‌دشت سرریز می‌شود و اندرکنش هیدرولیکی پیچیده‌ای بین این دو ناحیه ایجاد می‌شود. پوشش گیاهی یکی از عوامل کلیدی موثر بر مقاومت جریان، توزیع سرعت، ساختار آشفتگی و تبادل مومنتوم در این کانال‌هاست. وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت باعث افزایش زبری آن نسبت به کانال اصلی شده و اختلاف سرعت و مومنتوم را تشدید می‌کند که به‌نوبه خود سبب افزایش گرادیان عرضی سرعت و ایجاد تنش برشی ظاهری در سطح مشترک این دو بخش می‌شود. پژوهش‌های پیشین عمدتا به بررسی مجزای پوشش گیاهی در کانال اصلی یا سیلاب‌دشت پرداخته‌اند، درحالی‌که در طبیعت، پوشش گیاهی اغلب به‌طور همزمان در هر دو منطقه وجود دارد. ازاین‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در بررسی همزمان پوشش گیاهی صلب در مرکز کانال اصلی و سیلاب‌دشت و تحلیل دقیق توزیع عمقی سرعت در کانال مرکب است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی تاثیر این پوشش گیاهی همزمان بر سرعت جریان با استفاده از مدل عددی FLOW-3D در سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ متر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: پوشش گیاهی، توزیع سرعت طولی، سیلاب‌دشت، عمق نسبی، کانال مرکب.

۱- مقدمه

دشت‌های سیلابی و رودخانه‌های آبرفتی به‌طورمعمول پوشیده از گیاهان مختلف هستند. درگذشته این پوشش‌های گیاهی برای کاهش مقاومت در مقابل جریان و افزایش ظرفیت انتقال آب در برخی موارد از مسیر جریان حذف می‌شدند. اما امروزه با توجه به آشکار شدن تاثیرات چشمگیر پوشش گیاهی بر مشخصات و الگوی جریان و نقش غیرقابل‌انکار آن‌ها در مواردی مانند کنترل سیلاب‌ها، پایداری آبراهه‌ها، بهبود

کیفیت آب و مسئله انتقال رسوب، پیش‌بینی رفتار جریان و بررسی مشخصه‌های مختلف آن به یک دغدغه اصلی برای مهندسان هیدرولیک تبدیل‌شده است (Esmaeili et al., 2016). رودخانه‌های طبیعی معمولا از یک کانال اصلی و یک یا دو سیلاب‌دشت تشکیل‌شده‌اند. اثر متقابل سیال با سرعت بیشتر در کانال اصلی و سرعت کمتر در دشت سیلابی، باعث ایجاد تنش‌های برشی در سطح مشترک مقطع می‌شود (Hamidifar et al., 2016). هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب به‌دلیل وجود این مکانیسم و تفاوت زبری، پیچیده‌تر از کانال ساده است (Hamidifar et al., 2016). به‌منظور مطالعه پوشش گیاهی، معمولا پوشش گیاهی در دشت سیلابی رودخانه به دودسته صلب و انعطاف‌پذیر تقسیم می‌شود (Derikvandi, 2012). ساقه گیاهان انعطاف‌پذیر توسط جریان تغییر شکل می‌یابند درحالی‌که ساقه گیاهان صلب در محل اصلی خود باقی می‌مانند (Derikvandi, 2012). همچنین پژوهش‌های جریان با پوشش گیاهی به دو گروه مستغرق و غیرمستغرق تقسیم می‌شوند(Daneshpajouh, 2012) .

در پژوهش‌های خارجی، تسوجیموتو و کیتامورا (Tsujimoto & Kitamura, 1992) با انجام آزمایش در کانال مستطیلی دارای پوشش گیاهی استوانه‌ای نشان دادند که در عمق آب کمتر از ۴/۵ سانتی‌متر، سرعت متوسط ۳۰ درصد کاهش و تنش رینولدز جانبی ۴۰ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش ۶ برابری تراکم پوشش گیاهی، تفاوت سرعت بین ناحیه گیاه‌دار و بدون گیاه افزایش می‌یابد. آرمانینیا و همکاران (Armaninia et al., 2005) با اندازه‌گیری میدانی مقاومت گیاهان در مقیاس واقعی نشان دادند که ضریب پسا[1] برای ساقه‌های دارای برگ بسیار بیشتر از ساقه لخت است و در محدوده عدد رینولدز ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰، ضریب پسا تقریبا برابر یک است. جیمز و مگوا (James & Makoa, 2006) با آزمایش در کانال ساده مستقیم دارای نوارهای گیاهی بیان کردند که مقاومت کلی با افزایش تعداد سطوح مشترک بین نواحی دارای پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. کانگ و چوی (Kang & Choi, 2006) با مدل‌سازی عددی به روش RSM نشان دادند که در حالت وجود پوشش گیاهی، ساختار جریان متوسط به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت با کانال مرکب مسطح است و سرعت متوسط جهت جریان در سیلاب‌دشت کاهش‌یافته و نقطه سرعت ماکزیمم با افزایش تراکم پوشش گیاهی به سمت راست حرکت می‌کند. جیمز و همکاران (James et al., 2008) با بررسی اثر شاخ و برگ گیاهان غیرمستغرق نتیجه گرفتند که شاخ و برگ بر مقاومت جریان تاثیر قابل‌توجهی دارد. تانگ و نایت (Tang & Knight, 2009) با ارائه روش تحلیلی مبتنی بر معادله RANS و استفاده از ترم مومنتم برای محاسبه نیروی پسا نشان دادند که می‌توان سرعت متوسط در عمق و تنش برشی بستر را محاسبه کرد نف (Nepf, 2012) در مروری جامع بر جریان و انتقال جرم در مناطق دارای پوشش گیاهی آبی، بیان کرد که در کانوپی‌های متراکم غوطه‌ور، ناپیوستگی درگ در بالای کانوپی باعث تشکیل لایه برشی حاوی گردابه‌های در مقیاس کانوپی می‌شود که تبادل جرم و مومنتوم بین کانوپی و جریان بالادست را کنترل کرده و تا عمق نفوذ مشخصی (δe) به درون کانوپی نفوذ می‌کنند؛ این طول مقیاس، کانوپی را به دو منطقه بالایی (با انتقال آشفته ناشی از گردابه‌های مقیاس کانوپی) و پایینی (با انتقال کاهش‌یافته ناشی از آشفتگی مقیاس ساقه) تقسیم می‌کند. احمدی ده‌رشید و همکاران (Ahmadi Dehrashid et al., 2022) تاثیر پوشش گیاهی دولایه بر مشخصات جریان در کانال‌های مرکب را موردمطالعه قرار دادند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2022) با شبیه‌سازی عددی بیان کردند که وجود پوشش گیاهی در هر دو سیلاب‌دشت و کانال اصلی منجر به کاهش سرعت جریان طولی به میزان ۵۵ تا ۶۰ درصد می‌شود. دولتی مهتاج و رضایی (Dolati Mahtaj & Rezaei, 2022) با شبیه‌سازی عددی جریان در کانال مرکب انحرافی با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و LES در نرم‌افزار FLOW-3D نشان دادند که مدل RNG نسبت به LES، توانایی بیشتری در پیش‌بینی توزیع سرعت عمق متوسط و تنش برشی بستر دارد و با افزایش عمق جریان، دقت مدل عددی افزایش می‌یابد.

[1] Drag Coefficient

همچنین، نتایج آن‌ها بیانگر حرکت نواحی با سرعت بیشتر به سمت سیلاب‌دشت واگرا و تشکیل گردابه ثانویه در کانال اصلی و نزدیک سیلاب‌دشت همگرا است که با حرکت در طول فلوم قوی‌تر می‌شود. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام‌شده است. دریکوندی (Derikvandi, 2012) به بررسی تاثیر تراکم و انعطاف‌پذیری پوشش گیاهی بر ضرایب زبری در کناره‌ها و سیلاب‌دشت‌های رودخانه در شرایط غیرمستغرق پرداخت. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2016) تاثیر پوشش گیاهی بستر آبراهه بر هیدرولیک جریان و فرم بستر را موردمطالعه قرار دادند. حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar et al., 2016) با آزمایش در کانال مرکب دارای پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت نشان دادند که ظرفیت انتقال جریان در حضور پوشش گیاهی تا ۳۱ درصد کاهش می‌یابد و با افزایش تراکم گیاهی، مقدار ضریب اختلاط عرضی بدون بعد در کانال اصلی و دشت سیلابی افزایش می‌یابد.

باوجود پژوهش‌های متعدد درزمینه تاثیر پوشش گیاهی بر هیدرولیک کانال‌های مرکب، اکثر پژوهش‌ها به بررسی پوشش گیاهی در یکی از دو بخش کانال اصلی یا سیلاب‌دشت به‌صورت مجزا پرداخته‌اند. محمودی منفرد و همکاران (Mahmoudi Monfared et al., 2024) با شبیه‌سازی عددی جریان در کانال مرکب با سیلاب‌دشت واگرا با استفاده از مدل FLOW-3D در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی، نشان دادند که حضور پوشش گیاهی باعث کاهش سرعت در سیلاب‌دشت نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی شده و بیشترین مقدار سرعت برشی و تنش برشی در مرز مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت رخ می‌دهد که با افزایش عمق نسبی، این مقادیر کاهش می‌یابد. همچنین، در حالت وجود پوشش گیاهی، بیشترین شدت آشفتگی در خط مرکزی سیلاب‌دشت و نزدیک سطح آزاد، درحالی‌که در حالت بدون پوشش گیاهی، بیشترین شدت آشفتگی نزدیک بستر سیلاب‌دشت مشاهده شد. رضایی و همکاران (Rezaee et al., 2025) در تحقیقی آزمایشگاهی بر روی کانال‌های مرکب واگرا با بستر متحرک نشان دادند که پوشش گیاهی سیلاب‌دشت (صُلب و انعطاف‌پذیر) به‌طور متوسط موجب کاهش ۶۳/۱ درصدی سرعت جریان در سیلاب‌دشت شده و گرادیان سرعت را در صفحه مشترک با کانال اصلی افزایش می‌دهد؛ همچنین، حضور پوشش گیاهی باعث تشکیل دو گردابه در خلاف جهت همدیگر در کانال اصلی می‌شود که شدت آن‌ها به فرم بستر وابسته است. ماجدی‌اصل و همکاران (Majedi Asl et al., 2026) با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Flow3D نشان دادند که استفاده از ضرایب تصحیح انرژی می‌تواند دقت برآورد دبی جریان در فلوم‌های SMBF را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. نوآوری پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین در بررسی هم‌زمان پوشش گیاهی صلب با آرایش مکانیکی خاص (قطر ۰/۰۵ متر در کانال اصلی و ۰/۰۰۶ متر در سیلاب‌دشت) و تحلیل دقیق توزیع عمقی سرعت در هر دو بخش کانال مرکب است. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، بررسی تاثیر هم‌زمان پوشش گیاهی صلب در مرکز کانال اصلی و سیلاب‌دشت بر توزیع سرعت جریان در یک کانال مرکب با استفاده از مدل عددی FLOW-3D در سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر است.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- معادلات حاکم بر حرکت سیال در نرم‌افزار FLOW-3D

معادله پیوستگی

در نرم‌افزار FLOW-3D، معادله پیوستگی برای سیالات غیرقابل تراکم مانند آب، به‌صورت رابطه (۱) است:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R\frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi\frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \qquad (1)$$

در رابطه فوق V_F کسر حجمی ρ دانسیته سیال، R_{SOR} چگالی منبع جرم هستند. مولفه‌های سرعت (u,v,w) در جهت (x,y,z) هستند. A_x، A_y و A_z کسرهای سطحی ۲ جریان به‌ترتیب در جهت‌های x، y و z است و مقدار ضریب ξ و R

بستگی به نوع سیستم مختصات دارد (Flow Science Inc, 2012).

معادله اندازه حرکت

معادلات حرکت برای مولفه‌های سرعت سیال (u,v,w) در سه جهت معادلات ناویر-استوکس با چند عبارت اضافه‌شده در رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_yR\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}- \xi\frac{A_yuv}{xV_F}=-\frac{1}{\rho}\left(R\frac{\partial p}{\partial x}\right)+G_y+f_y-b_y-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(v-v_w-\delta v_s) \quad (2)$$

در این رابطه (G_x, G_y, G_z) شتاب بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های لزجت، (b_x,b_y,b_z) افت جریان در محیط‌های متخلخل است. در ضمن $Uw=(u_w,v_w,w_w)$ سرعت مولفه منبع و $Us=(u_w,v_w,w_w)$ سرعت سیال در سطح منبع نسبت به خود منبع است (Flow Science Inc, 2012).

۲-۲- روش حجم سیال

روش حجم سیال برای مدل‌سازی جریان‌های سطح آزاد به‌کار می‌رود. نرم‌افزار FLOW-3D از این روش برای مدل‌سازی جریان‌های سطح آزاد استفاده می‌کند. زمانی که جریان داری سطح آزاد است، تمام سلول‌ها پر از سیال نیستند و تعدادی از سلول‌ها که در سطح جریان قرار دارند نیمه‌پر می‌باشند. وضعیت سیال به‌وسیله کمیت تابع حجم سیال F(x,y,z,t)، که بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پرشده است، بیان می‌شود و رابطه (۳) را ارضا می‌کند (Flow Science Inc, 2012).

$$\frac{\partial F}{\partial t}\frac{1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}(FA_xu)+R\frac{\partial}{\partial y}(FA_yv)+\frac{\partial}{\partial z}(FA_zw)\xi\frac{FA_xu}{x}\right]F_{DIF}+F_{SOR} \quad (3)$$

در رابطه فوق، F_{DIF} به‌وسیله رابطه (۴) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{DIF}=\frac{1}{V_F}\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(v_FA_x\frac{\partial F}{\partial x}\right)+R\frac{\partial}{\partial x}\left(v_FA_y\frac{\partial F}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(v_FA_z\frac{\partial F}{\partial z}\right)+\xi\frac{v_FA_xF}{x}\right\} \quad (4)$$

در زابطه فوق ضریب پخش به‌صورت $v_F=\frac{c_F\mu}{\rho}$ تعریف می‌شود. C_F یک ضریب ثابت است که معکوس آن معادل عدد آشفتگی اشمید[۲] است. تابع حجم سیال (F)، بین صفر و یک تغییر می‌کند. به دین ترتیب در مسائلی با وجود یک سیال، درصورتی‌که F=1 باشد در این صورت سلول محاسباتی به‌طور کامل شامل سیال است و درصورتی‌که F=0 شود سلول محاسباتی خالی از سیال است (Flow Science Inc, 2012).

۲-۳- معرفی مشخصات فیزیکی کانال مرکب موردپژوهش

در این پژوهش، جهت بررسی تاثیر حضور پوشش گیاهی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت یک کانال مرکب، از مدل آزمایشگاهی موردپژوهش توسط سان (۲۰۰۷) استفاده گردیده است. پژوهش آزمایشگاهی مذکور در فلوم جریان آزمایشگاهی دانشگاه لاگبورگ انجام‌شده است. شکل ۱ فلوم آزمایشگاه لاگبورگ را در جهات مختلف نمایش می‌دهد و مشخصات هندسی مقطع این فلوم در شکل ۲ آمده است. این کانال مرکب بزرگ با شیب کف ۱:۵، دارای ۸/۶ متر طول، ۰/۹۱۵ متر عرض و ۰/۸ متر عمق است. دیواره‌های کانال از جنس سنگ لوح ساخته‌شده و چهار پنجره شیشه‌ای برای مشاهده، در دو طرف کانال تعبیه‌شده است. شایان ذکر است که در مطالعه سان (۲۰۰۷)، با توجه به ابعاد بزرگ فلوم و دبی‌های اعمال‌شده، عدد رینولدز جریان در گستره آشفته کامل (Re > 10,000) قرار داشته و از آن‌جایی که در این رژیم، عدد رینولدز نقشی مستقل در تعیین مشخصات جریان ندارد، معیار تشابه هیدرولیکی بر مبنای عدد فرود (Froude Number) درنظر گرفته‌شده است که رویکردی استاندارد در مطالعات هیدرولیک کانال‌های مرکب محسوب می‌شود.

[2] Turbulent Schmidt Number

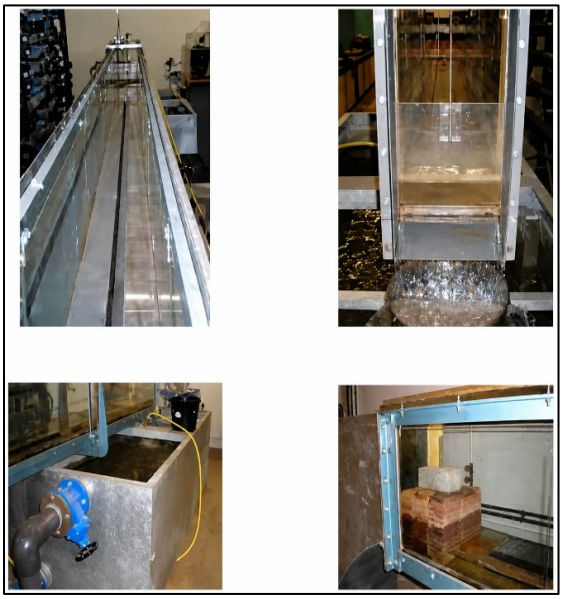


Fig. 1 Flow flume of the Hydraulic Laboratory at Loughborough University (Sun, 2007).

شکل ۱ فلوم جریان آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه لاگبورگ (سان، ۲۰۰۷).

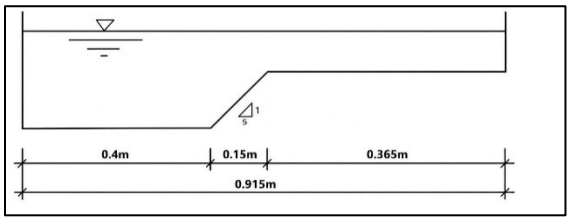


Fig. 2 Cross-section of the flow flume at the Hydraulic Laboratory of Loughborough University (Sun, 2007).

شکل ۲ مقطع فلوم جریان آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه لاگبورگ (سان، ۲۰۰۷).

۲-۴- مدل‌سازی عددی

جهت پژوهش اثرات حضور پوشش گیاهی در کانال مرکب بر روی مشخصات جریان، مدل عددی پژوهش آزمایشگاهی معرفی‌شده در بخش ۲-۵ در نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی‌شده است. نرم‌افزار FLOW-3D به‌دلیل قابلیت‌های ویژه‌ای ازجمله روش حجم سیال (VOF) برای مدل‌سازی دقیق سطح آزاد، قابلیت مدل‌سازی موانع تخلخل دار برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی، شبکه‌بندی محلی برای افزایش دقت در اطراف میله‌ها و مدل‌های آشفتگی متنوع برای این پژوهش انتخاب گردید. برای شبیه‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی RNG k-ε استفاده‌شده است، زیرا این مدل برای جریان‌های با نرخ کرنش بالا و نواحی جدایش جریان در اطراف موانع استوانه‌ای عملکرد بهتری دارد (Kang & Choi, Razavi, 2023). برای این منظور محدوده کلی محاسباتی که شامل ۴ بلوک مش است طبق جدول ۱ اعمال گردید. شرایط مرزی اعمال‌شده شامل ورودی با سرعت ثابت، خروجی با فشار اتمسفریک، دیواره‌ها با شرط عدم لغزش و تابع قانون دیواره، سطح آزاد با فشار صفر و بستر با شرط عدم لغزش و زبری ۰/۰۰۱ متر است. معیار همگرایی حل براساس کاهش باقیمانده‌های معادلات به مقدار کمتر از 10^{-4} درنظر گرفته شد. همچنین تحلیل استقلال شبکه با سه شبکه مختلف انجام شد که خطای نسبی بین شبکه متوسط (۳۷۸,۰۰۰ سلول) و شبکه ریز (۶۵۰,۰۰۰ سلول) حدود ۲/۳٪ بود، بنابراین شبکه متوسط برای شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید.

مدل‌های فیزیکی براساس سه عمق نسبی، دو قطر برای میله‌ها، سه نسبت میان قطر و فاصله میله‌ها و طی ۱۸ سری آزمایش انجام پذیرفته است. در پژوهش حاضر، برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی از اطلاعات مربوط به دو سری از آزمایش‌ها استفاده‌شده است. بدین‌ترتیب که دبی ورودی به محدوده محاسباتی طبق دو سری از مدل‌های فیزیکی در دو عمق نسبی ۰/۲۵ و ۰/۳۵ به‌ترتیب برابر ۲ و ۲/۷۹ لیتر بر ثانیه است. در هر دو سری آزمایش، قطر میله‌های استوانه‌ای d برابر ۰/۰۰۶ متر و نسبت فاصله مرکز تا مرکز میله‌ها به قطر S/d برابر ۸ درنظر گرفته‌شده است. به

جدول ۱ تعداد سلول‌های محاسباتی به تفکیک بلوک مش

Table 1 The number of computational cells for each mesh block.

Block specifications	Block dimensions (meters)	Number of computational cells
Block 1	5.000 × 0.306 × 0.100	54,000
Block 2	5.000 × 0.306 × 0.100	378,000
Block 3	2.000 × 0.306 × 0.100	21,600
Block 4	5.000 × 0.020 × 0.081	197,202

راین اساس، فاصله مرکز تا مرکز میله‌ها S برابر ۸ × ۰/۰۰۶ = ۰/۰۴۸ متر محاسبه می‌گردد.

۲-۵- صحت‌سنجی نتایج عددی

پس از اتمام فرآیند شبیه‌سازی، نتایج مربوط به شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی مقایسه شدند. شکل ۳ مقایسه نتایج مربوط به آنالیزهای عددی انجام‌شده با استفاده از شبکه محاسباتی مطابق جدول ۱ و نتایج تجربی حاصل از کار آزمایشگاهی سان (۲۰۰۷)، مربوط به‌سرعت متوسط‌گیری شده در عمق برای عمق نسبی معادل ۰/۲۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، نتایج عددی با میانگین خطای مربعات ۰/۰۲۴ نسبت به نتایج تجربی، تطابق خوبی با یکدیگر دارند. بنابراین با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت که می‌توان برای بررسی موضوع اثر پوشش گیاهی بر رفتار جریان در کانال مرکب از نرم‌افزار Flow-3D استفاده نمود. اگرچه عرض فلوم مورداستفاده در پژوهش سان (۲۰۰۷) ۰/۱۵ متر برای سیلاب‌دشت و ۰/۱۲ متر برای کانال اصلی) نسبتا محدود بوده و ممکن است اثرات دیواره‌ای و چالش‌هایی درزمینه توسعه کامل جریان آشفته ایجاد نماید، با توجه به تطابق قابل‌قبول نتایج عددی و تجربی (MSE ≈ 0.024) و همچنین پژوهش‌های متعددی که با ابعاد مشابه در ادبیات فنی وجود دارد (Knight & Shiono, 1990; Myers, 2005; Kang & Choi, 2006)، این موضوع تاثیری بر اعتبار صحت‌سنجی و نتایج نهایی این پژوهش ندارد؛ چراکه هدف اصلی از صحت‌سنجی، تایید توانایی مدل FLOW-3D در شبیه‌سازی کیفی پدیده بوده است.

تحلیل عدم قطعیت عددی: برای ارزیابی عدم قطعیت نتایج عددی، خطای مدل براساس مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی محاسبه گردید. میانگین مربعات خطا (MSE) برابر ۰/۰۲۴ به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول مدل عددی است. همچنین تاثیر اندازه شبکه بر نتایج با انجام تحلیل استقلال شبکه بررسی شد که خطای نسبی ۲/۳٪ بین شبکه متوسط (۳۷۸,۰۰۰ سلول) و شبکه ریز (۶۵۰,۰۰۰ سلول) نشان‌دهنده استقلال نتایج از اندازه شبکه و دقت مناسب شبیه‌سازی‌ها است. علاوه‌براین، عدم قطعیت ناشی از انتخاب مدل آشفتگی و شرایط مرزی با مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین (Kang & Choi, 2006; Wang et al., 2022) مورد ارزیابی قرار گرفت که تطابق قابل‌قبول نتایج، بیانگر صحت رویکرد عددی اتخاذشده است. با توجه به خطای کم مدل (MSE ≈ 0.024) و تطابق نتایج با پژوهش‌های معتبر، عدم قطعیت نتایج عددی در سطح قابل قبولی قرار دارد. برای بررسی تاثیر پارامترهای هندسی پوشش گیاهی بر نتایج، تحلیل حساسیت برای سه پارامتر اصلی انجام شد: (۱) قطر میله‌ها (d) با سه مقدار ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۷ متر، (۲) تراکم پوشش گیاهی نسبت S/d با سه مقدار ۶، ۸ و ۱۰ و (۳) فاصله میله‌ها (S) با سه مقدار ۰/۳۰، ۰/۵۰ و ۰/۷۰ متر. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که قطر میله‌ها بیشترین تاثیر را بر کاهش سرعت در کانال اصلی دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش قطر از ۰/۰۳ به ۰/۰۷ متر، کاهش سرعت از ۴۲ درصد به ۶۸ درصد افزایش‌یافته است.

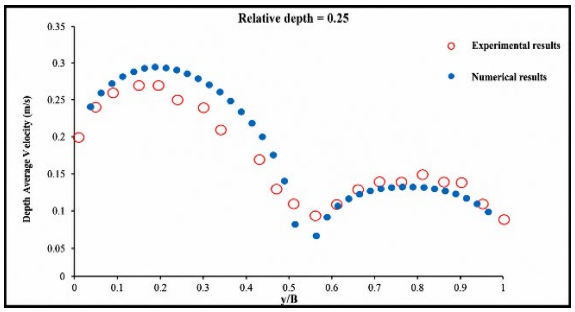


Fig. 3 Comparison of numerical and experimental results of depth-averaged velocity across the channel width for a relative depth of 0.25.

شکل ۳ مقایسه نتایج عددی و تجربی سرعت متوسط‌گیری شده در عرض کانال برای عمق نسبی معادل ۰/۲۵

۲-۶- مدل‌سازی وجود هم‌زمان پوشش گیاهی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت

با توجه به نتایج صحت‌سنجی، مدل وجود هم‌زمان پوشش گیاهی در مرکز کانال اصلی و سیلاب‌دشت برای بررسی اثرات آن بر روی جریان شبیه‌سازی‌شده است. برای این منظور دبی ورودی ۰/۰۰۲ مترمکعب بر ثانیه در سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ استفاده‌شده است. برای شبیه‌سازی وجود هم‌زمان پوشش گیاهی در مرکز کانال اصلی و سیلاب‌دشت،

میله‌های با قطر ۰/۰۵ متر و به فاصله مرکز تا مرکز ۰/۵ متر از همدیگر به‌عنوان پوشش گیاهی کانال اصلی در مرکز فلوم قرارداده شده است. درمجموع ۷ استوانه به‌عنوان پوشش گیاهی در کانال اصلی قرارداده شده است. همچنین میله‌های با قطر ۰/۰۰۶ متر با فواصل ۰/۰۴۸ متر به‌عنوان پوشش گیاهی بخش سیلاب‌دشت کانال مدل گردیده است تا تاثیر آن بر روی مشخصات جریان ارزیابی شود. شکل ۴ نمای جانبی از مقطع کانال در حضور میله‌های استوانه‌ای به‌عنوان پوشش گیاهی در مرکز کانال اصلی و سیلاب‌دشت را نشان می‌دهد. طول میله‌ها طوری درنظر گرفته‌شده است تا همواره قسمتی از آن‌ها بالای تراز آب قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

سرعت جریان، یکی از مهم‌ترین پارامترهای یک جریان یا سیلاب است. سرعت طولی از مشخصات اساسی در ارزیابی یک جریان است که بررسی تاثیر هرگونه مانع در مسیر جریان بر روی سرعت آن را بیش از پیش جلوه می‌دهد. شکلهای ۵ تا ۷ ، شمارگرهای سرعت طولی جریان را در کل کانال و نیز در محدوده وجود پوشش گیاهی به‌ترتیب برای عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر نشان می‌دهند. در شکل ۵، شمارگرهای سرعت طولی جریان برای عمق نسبی ۰/۱۵ متر در دو نمای (الف) کل کانال و (ب) محدوده قرارگیری پوشش گیاهی ارائه‌شده است. طیف رنگی به‌کاررفته در این شکل از آبی (نمایانگر سرعت‌های پایین) تا قرمز (نمایانگر سرعت‌های بالا) متغیر است. واحد سرعت در این شمارگرها متر بر ثانیه (m/s)بوده و محدوده سرعت نشان داده‌شده بین ۰ تا ۰/۸ متر بر ثانیه است. محور افقی نشان‌دهنده طول کانال (متر) و محور عمودی نشان‌دهنده عرض کانال (متر) است. ناحیه سیلاب‌دشت در دو طرف و کانال اصلی در مرکز تصویر قابل‌تشخیص است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، محل قرارگیری پوشش گیاهی و تاثیر آن بر شمارگرهای سرعت جریان در کانال به‌وضوح مشهود است. در راستای قرارگیری میله‌ها (هم در سیلاب‌دشت و هم در کانال اصلی)، سرعت به‌طور محسوسی کاهش‌یافته است. به‌طوری‌که سرعت طولی در محدوده پوشش گیاهی کانال اصلی از حدود ۰/۶ متر بر ثانیه به ۰/۲ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهشی معادل ۶۷ درصد است. در مقابل، در طرفین میله‌ها و نواحی بدون پوشش، سرعت جریان افزایش‌یافته و به مقادیر حدود ۰/۷ متر بر ثانیه می‌رسد که بیانگر انحراف جریان از نواحی پرتراکم پوشش گیاهی به سمت نواحی با مقاومت کمتر است. در نمای (ب) که محدوده قرارگیری پوشش گیاهی را با بزرگ‌نمایی بیشتر نشان می‌دهد، تاثیر موضعی هر میله بر کاهش سرعت در اطراف آن و تشکیل نواحی با سرعت پایین (رنگ آبی) در پشت میله‌ها به‌وضوح قابل‌مشاهده است. این پدیده ناشی از تشکیل ناحیه جدایش جریان در پشت موانع استوانه‌ای است که منجر به ایجاد گردابه‌هایی در پشت هر میله و کاهش سرعت در آن ناحیه می‌شود.

در شکل ۶، شمارگرهای سرعت طولی جریان برای عمق نسبی ۰/۲ متر در دو نمای (الف) کل کانال و (ب) محدوده قرارگیری پوشش گیاهی ارائه‌شده است. طیف رنگی به‌کاررفته در این شکل از آبی (نمایانگر سرعت‌های پایین) تا قرمز (نمایانگر سرعت‌های بالا) متغیر است. واحد سرعت در این شمارگرها متر بر ثانیه (m/s) بوده و محدوده سرعت نشان داده‌شده بین ۰ تا ۰/۸ متر بر ثانیه است. محور افقی نشان‌دهنده طول کانال (متر) و محور عمودی نشان‌دهنده عرض کانال (متر) است. ناحیه سیلاب‌دشت در دو طرف و کانال اصلی در مرکز تصویر قابل‌تشخیص است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود،

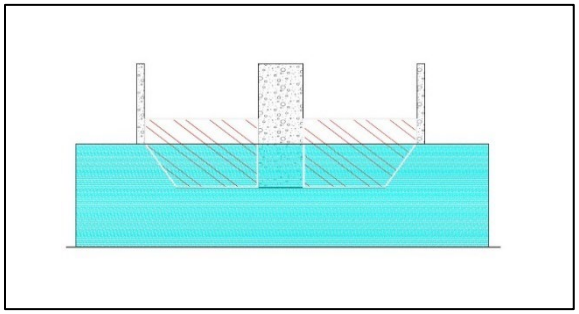
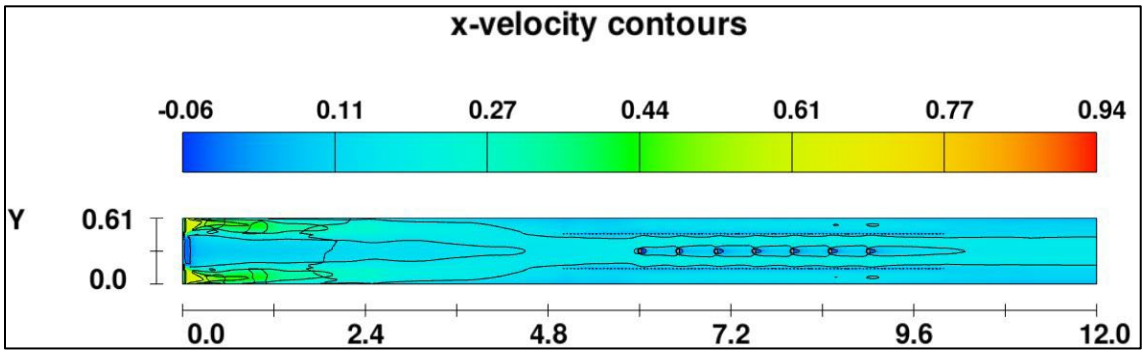
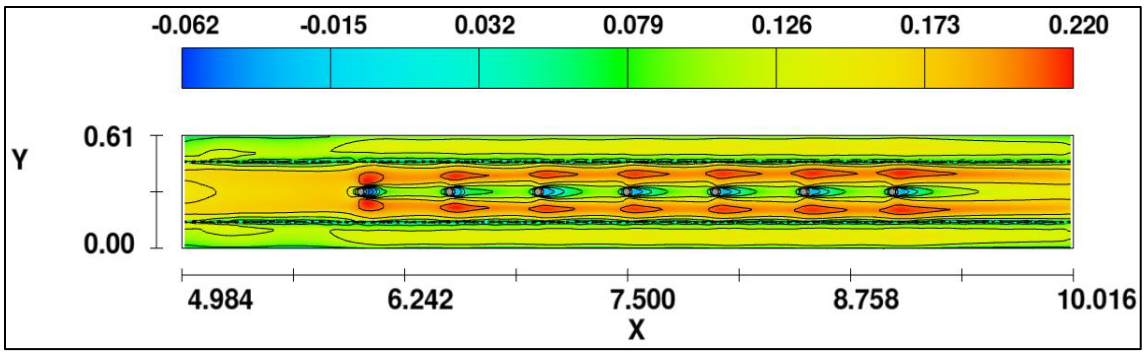


Fig. 4 Side view of the simulated bed and vegetation model.

شکل ۴ نمای جانبی مدل شبیه‌سازی‌شده بستر و پوشش گیاهی



(a)



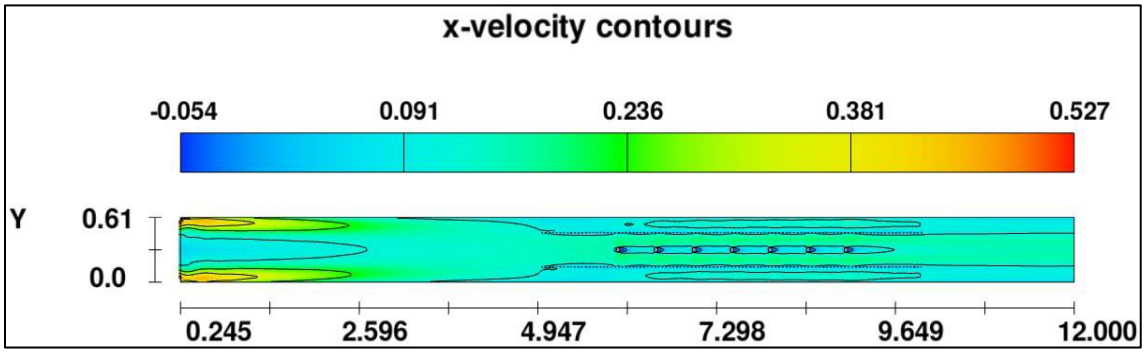
(b)

Fig. 5 Contours of longitudinal flow velocity in the compound channel for a relative depth of 0.15. (a) Entire channel, (b) Vegetated region.

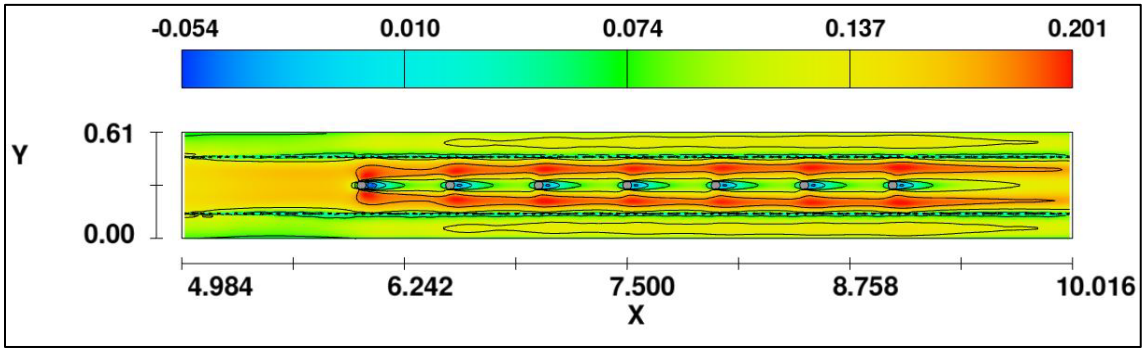
شکل ۵ شمارگرهای سرعت طولی جریان در کانال مرکب برای عمق نسبی ۰/۱۵. الف) کل کانال، ب) محدوده قرارگیری پوشش گیاهی

با افزایش عمق نسبی به ۰/۲ متر، الگوی توزیع سرعت مشابه حالت عمق نسبی ۰/۱۵ است، اما مقادیر سرعت به‌طورکلی کاهش‌یافته است. در راستای خط مستقیم قرارگیری میله‌ها (هم در سیلاب‌دشت و هم در کانال اصلی)، سرعت به‌طور محسوسی کاهش داشته است. به‌طوری‌که سرعت در مرکز کانال اصلی و در محدوده پوشش گیاهی به حدود ۰/۱۷ متر بر ثانیه می‌رسد که نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی، کاهشی معادل ۵۸ درصد را نشان می‌دهد. این کاهش ناشی از افزایش نیروی پسا[3] در اثر استغراق بیشتر میله‌ها است. در مقابل، در طرفین میله‌ها و نواحی بدون پوشش، سرعت جریان افزایش‌یافته و به مقادیر حدود ۰/۶۵ تا ۰/۷ متر بر ثانیه می‌رسد که نشان‌دهنده انحراف جریان از نواحی پوشش گیاهی به سمت نواحی با مقاومت کمتر است. همچنین در سیلاب‌دشت، سرعت جریان در مقایسه با عمق نسبی ۰/۱۵ افزایش‌یافته است که نشان‌دهنده انتقال جریان از کانال اصلی به سیلاب‌دشت است. در نمای (ب) که محدوده قرارگیری پوشش گیاهی را با بزرگ‌نمایی بیشتر نشان می‌دهد، تاثیر موضعی هر میله بر کاهش سرعت در اطراف آن و تشکیل نواحی با سرعت پایین (رنگ آبی) در پشت میله‌ها به‌وضوح قابل‌مشاهده است. الگوی شمارگرها در این عمق نسبی منظم‌تر از حالت قبل شده است که نشان‌دهنده تاثیر بیشتر پوشش گیاهی بر یکنواخت‌سازی توزیع سرعت در عرض کانال است.

[3] Drag Force



(a)



(b)

Fig. 6 Contours of longitudinal flow velocity in the compound channel for a relative depth of 0.20. (a) Entire channel, (b) Vegetated region.

شکل ۶ شمارگرهای سرعت طولی جریان در کانال مرکب برای عمق نسبی ۰/۲۰. الف) کل کانال، ب) محدوده قرارگیری پوشش گیاهی

در شکل ۷، شمارگرهای سرعت طولی جریان برای عمق نسبی ۰/۲۵ متر در دو نمای (الف) کل کانال و (ب) محدوده قرارگیری پوشش گیاهی ارائه‌شده است. طیف رنگی به‌کاررفته در این شکل از آبی (نمایانگر سرعت‌های پایین) تا قرمز (نمایانگر سرعت‌های بالا) متغیر است. واحد سرعت در این شمارگرها متر بر ثانیه (m/s) بوده و محدوده سرعت نشان داده‌شده بین ۰ تا ۰/۸ متر بر ثانیه است. محور افقی نشان‌دهنده طول کانال (متر) و محور عمودی نشان‌دهنده عرض کانال (متر) است. ناحیه سیلاب‌دشت در دو طرف و کانال اصلی در مرکز تصویر قابل‌تشخیص است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در عمق نسبی ۰/۲۵ متر، سرعت در محدوده پوشش گیاهی به حدود ۰/۱۵ متر بر ثانیه کاهش‌یافته است که نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی، کاهشی معادل ۵۵ درصد را نشان می‌دهد. با افزایش عمق نسبی، تاثیر پوشش گیاهی بر کاهش سرعت اندکی کمتر شده است که به‌دلیل افزایش سطح مقطع جریان و کاهش نسبی اثر زبری است. همچنین با توجه به نحوه توزیع و قرارگیری پوشش گیاهی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت، شمارگرهای سرعت طولی در کانال به‌صورت منظم و متقارن درآمده است. در طرفین میله‌ها، سرعت جریان به حدود ۰/۶ تا ۰/۶۵ متر بر ثانیه افزایش‌یافته است که نشان‌دهنده ادامه الگوی انحراف جریان از نواحی پوشش گیاهی به سمت نواحی با مقاومت کمتر است. در نمای (ب) که محدوده قرارگیری پوشش گیاهی را با بزرگ‌نمایی بیشتر نشان می‌دهد، تاثیر موضعی هر میله بر کاهش سرعت در اطراف آن و تشکیل نواحی با سرعت پایین (رنگ آبی) در پشت میله‌ها همچنان مشهود است. شکل

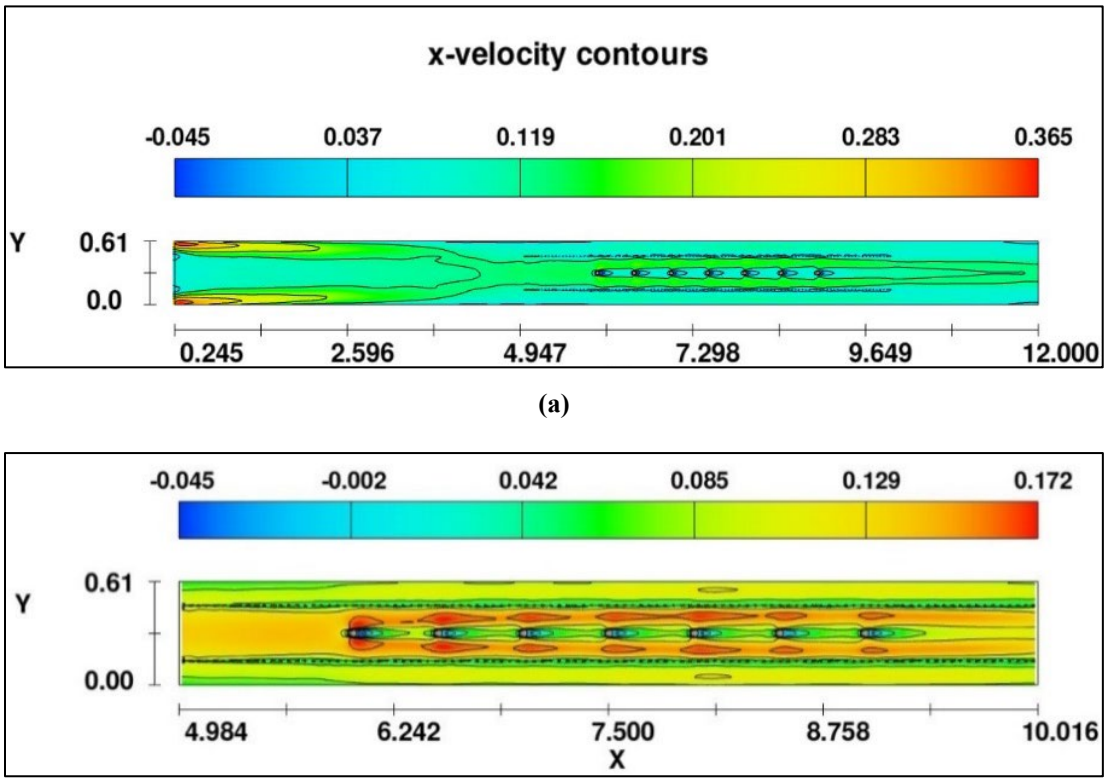


Fig. 7 Contours of longitudinal flow velocity in the compound channel for a relative depth of 0.25. (a) Entire channel, (b) Vegetated region.

شکل ۷ شمارگرهای سرعت طولی جریان در کانال مرکب برای عمق نسبی ۰/۲۵. الف) کل کانال، ب) محدوده قرارگیری پوشش گیاهی

شمارگرهای سرعت طولی جریان در هر سه حالت عمق نسبی (۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵) به‌صورت مشابه با یکدیگر است که می‌تواند نشان‌دهنده توزیع سرعت براساس شکل و نحوه توزیع قرارگیری پوشش گیاهی در کانال باشد. این شباهت الگو در هر سه عمق نسبی نشان می‌دهد که ساختار کلی جریان تحت تاثیر آرایش هندسی پوشش گیاهی قرار دارد و تغییرات عمق نسبی صرفا بر مقادیر عددی سرعت تاثیر می‌گذارد، نه بر الگوی کلی توزیع آن. مقایسه سه عمق نسبی: با توجه به شکلهای ۵ تا ۷، مقایسه سه عمق نسبی نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی از ۰/۱۵ به ۰/۲۵ متر، سرعت در کانال اصلی به‌طور متوسط از ۰/۶۱ به ۰/۵۲ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد (کاهشی حدود ۱۵ درصد).

بیشترین افت سرعت در محدوده استقرار پوشش گیاهی رخ می‌دهد و پس از عبور جریان از این ناحیه، سرعت دوباره افزایش می‌یابد، اما به مقدار اولیه نمی‌رسد. همچنین در سیلاب‌دشت، با افزایش عمق نسبی، سرعت جریان افزایش‌یافته است که نشان‌دهنده انتقال بخشی از جریان از کانال اصلی به سیلاب‌دشت در اثر مقاومت ایجادشده توسط پوشش گیاهی است. تحلیل فیزیکی مکانیسم‌های حاکم بر جریان: کاهش سرعت در محدوده پوشش گیاهی را می‌توان به دو مکانیسم اصلی نسبت داد: (۱) نیروی پسا (Drag Force) ناشی از برخورد جریان به میله‌های استوانه‌ای که منجر به تبدیل انرژی جنبشی جریان به انرژی آشفتگی و حرارت می‌شود. این نیرو با افزایش قطر میله‌ها و تراکم پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. (۲) افزایش تنش برشی در سطح مشترک بین نواحی گیاهی و غیرگیاهی که منجر به انتقال

مومنتوم از نواحی با سرعت بالا به نواحی با سرعت پایین می‌گردد. با افزایش عمق نسبی، تاثیر نیروی پسا کاهش می‌یابد زیرا نسبت ارتفاع میله‌ها به عمق جریان کاهش‌یافته و زبری نسبی پوشش گیاهی کمتر می‌شود. این موضوع کاهش درصد کاهش سرعت از ٪۵۹ در عمق ۰/۱۵ متر به ٪۵۵ در عمق ۰/۲۵ متر را توجیه می‌کند. همچنین تشکیل ناحیه جدایش جریان در پشت هر میله منجر به ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که با افزایش فاصله میله‌ها از یکدیگر، شدت آن‌ها کاهش می‌یابد. این گردابه‌ها نقش مهمی در تبادل مومنتوم بین لایه‌های مختلف جریان و افزایش میزان اختلاط دارند.

۳-۱- مقایسه کمی با پژوهش‌های پیشین:

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج پژوهش حاضر، مقایسه کمی با پژوهش‌های پیشین در جدول ۲ ارائه‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج پژوهش حاضر در محدوده نتایج گزارش‌شده توسط Wang و همکاران (۲۰۲۲) قرار دارد، اما با توجه به تفاوت در هندسه کانال، آرایش مکانیکی گیاهان و تحلیل توزیع عمقی سرعت، دارای نوآوری‌های خاص خود است. کاهش سرعت در کانال اصلی در پژوهش حاضر (۵۵-٪۵۹) با نتایج Wang و همکاران (۲۰۲۲) (۵۵-٪۶۰) همخوانی خوبی دارد. همچنین افزایش سرعت در سیلاب‌دشت در پژوهش حاضر (۸-٪۱۰) با نتایج Wang و همکاران (۲۰۲۲) (۵-٪۱۰) مطابقت دارد. این مقایسه نشان‌دهنده قابلیت اطمینان نتایج مدل عددی و تطابق آن با پژوهش‌های معتبر پیشین است. همچنین تفاوت در مقادیر دقیق کاهش سرعت را می‌توان به تفاوت در ابعاد هندسی کانال، قطر و آرایش میله‌های پوشش گیاهی نسبت داد. پژوهش‌های Kang و Choi (2006) که عمدتا بر روی پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت متمرکز بوده‌اند، کاهش سرعت کمتری (۲۰-٪۵۰) را گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده تاثیر قابل‌توجه پوشش گیاهی در کانال اصلی بر کاهش سرعت جریان است.

۳-۲- بررسی سرعت جریان در کانال اصلی

مطابق انتظار، حضور پوشش گیاهی در مرکز کانال اصلی، کاهش سرعت جریان را در کانال اصلی در پی داشت. شکل ۸ اثر وجود پوشش گیاهی را بر روی تغییرات سرعت طولی جریان در عمق و در مرکز کانال اصلی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، وجود پوشش گیاهی صلب در مرکز کانال اصلی در برابر جریان، منجر به کاهش سرعت طولی جریان در آن می‌شود که این امر در تمامی عمق‌های نسبی (۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر) اتفاق افتاده است. تحلیل شکل ۸ (الف تا د): شکل ۸ نتایج را در چهار بخش مجزا نمایش می‌دهد. در شکل ۸ (الف) مربوط به عمق نسبی ۰/۱۵ متر، مشاهده می‌شود که در حالت بدون پوشش گیاهی، سرعت طولی در نزدیکی سطح (نسبت y/h نزدیک به ۱) به حدود ۰/۷۵ متر بر ثانیه می‌رسد، درحالی‌که در حضور پوشش گیاهی، این مقدار به حدود ۰/۳ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد (کاهشی معادل ۶۰ درصد). در شکل ۸ (ب) مربوط به عمق نسبی ۰/۲ متر، سرعت در حالت بدون پوشش گیاهی حدود ۰/۷ متر بر ثانیه و در حالت با پوشش گیاهی حدود ۰/۲۹ متر بر ثانیه است (کاهش ۵۹ درصدی). در شکل ۸ (ج) مربوط به عمق نسبی ۰/۲۵ متر، سرعت در حالت بدون پوشش گیاهی حدود ۰/۶۵ متر بر ثانیه و در حالت با پوشش گیاهی حدود ۰/۲۹ متر بر ثانیه است (کاهش ۵۵ درصدی).

شکل ۸ (د) نیز مقایسه سه عمق نسبی را در حالت با پوشش گیاهی نشان می‌دهد که بیانگر کاهش سرعت با افزایش عمق نسبی است. این کاهش سرعت با افزایش عمق نسبی به‌دلیل افزایش سطح مقطع جریان و کاهش نسبی تاثیر زبری پوشش گیاهی بر کل مقطع است. بیشترین کاهش سرعت در نزدیکی سطح رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تاثیر مستقیم میله‌های پوشش گیاهی بر لایه‌های فوقانی جریان است.

تحلیل تکمیلی شکل ۸: علاوه‌بر کاهش کلی سرعت، سه نکته قابل‌توجه در شکل ۸ مشاهده می‌شود: (۱) بیشترین کاهش سرعت در نزدیکی سطح جریان (نسبت y/h نزدیک به ۱) رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تاثیر مستقیم میله‌های پوشش گیاهی بر لایه‌های فوقانی جریان است. به‌طوری‌که در عمق نسبی

جدول ۲ مقایسه کمی نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین

Table 2 Comparing the results of the present study with previous studies

Research	Type of vegetation	Vegetation location	Speed reduction in the main channel (%)	Speed increase in Silabdasht (%)	Relative depth (m)
Kang & Choi (2006)	Rigid	Floodplain	20-30	-	0.10-0.30
Tang & Knight (2009)	Rigid	Floodplain	25-35	-	0.15-0.35
Hamidifar et al. (2016)	Rigid	Floodplain	30-40	-	0.15-0.30
Wang et al. (2022)	Rigid	Main Channel and Floodplain	55-60	5-10	0.15-0.25
The present study	Rigid	Main Channel and Floodplain	55-59	8-10	0.15-0.25

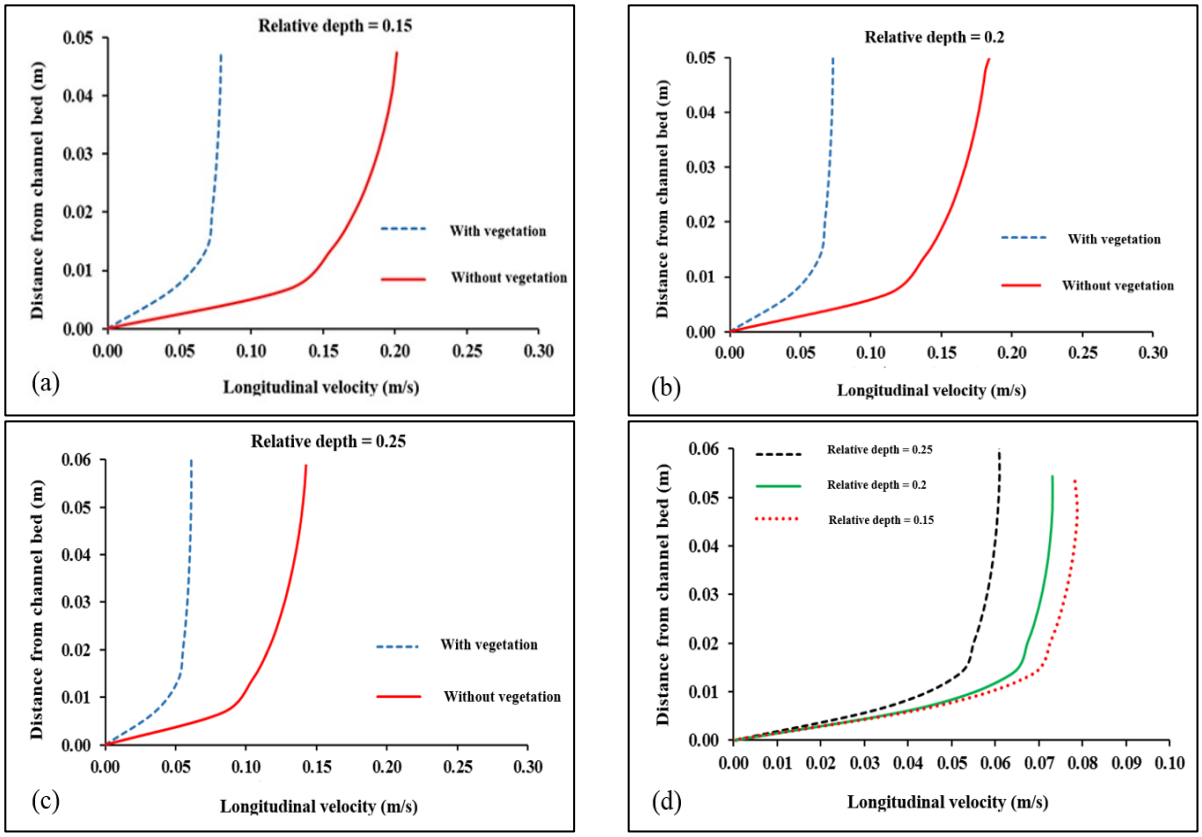


Fig. 8 Effect of vegetation presence on longitudinal velocity at the center of the main channel: (a) relative depth 0.15, (b) relative depth 0.20, (c) relative depth 0.25, (d) comparison of the effect of relative depth.

شکل ۸ تاثیر حضور پوشش گیاهی بر سرعت طولی در مرکز کانال اصلی الف) عمق نسبی ۰/۱۵، ب) عمق نسبی ۰/۲۰، ج) عمق نسبی ۰/۲۵، د) مقایسه تاثیر عمق نسبی

۰/۱۵ متر، سرعت در نزدیکی سطح از حدود ۰/۷۵ به ۰/۳ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد (کاهش ۶۰ درصدی) درحالی‌که این کاهش در نزدیکی بستر بسیار کمتر است. (۲) در نزدیکی بستر (نسبت y/h نزدیک به صفر)، اختلاف سرعت بین حالت

با و بدون پوشش گیاهی کمتر است که نشان می‌دهد تاثیر پوشش گیاهی بر لایه‌های نزدیک بستر محدود است. این موضوع به‌دلیل وجود ناحیه آرام جریان در نزدیکی بستر و تاثیر غالب زبری بستر بر رفتار جریان در این ناحیه است. (۳) با افزایش عمق نسبی، اختلاف سرعت بین دو حالت کاهش می‌یابد که به‌دلیل افزایش سطح مقطع جریان و کاهش نسبی اثر زبری است. به‌عنوان‌مثال، کاهش سرعت در نزدیکی سطح از ٪۶۰ در عمق ۰/۱۵ متر به ٪۵۵ در عمق ۰/۲۵ متر کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش تاثیر نسبی پوشش گیاهی با افزایش عمق جریان است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق نسبی، میزان سرعت طولی جریان کمتر می‌شود. میانگین کاهش سرعت جریان طولی در کانال اصلی در اعماق مختلف و در حالت وجود پوشش گیاهی در آن نسبت به حالت بدون حضور پوشش گیاهی، در سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر به‌ترتیب ۵۹، ۵۸ و ۵۵ درصد است.

۳-۳- پارامتر بی‌بعد سرعت در کانال اصلی

برای ارزیابی بهتر اثر وجود پوشش گیاهی بر روی سرعت طولی جریان، پارامترهای نمودار عمق-سرعت طولی جریان به‌صورت بی‌بعد موردبررسی قرارگرفته است. به‌این‌منظور، سرعت برشی (U) مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود. سرعت‌های به‌دست‌آمده از آنالیزهای عددی به راین مقدار تقسیم می‌شوند تا پارامتر سرعت طولی جریان بی‌بعد (U/U) گردد. همچنین کمیت عمق (y) نیز به مقدار عمق کل جریان (h) تقسیم می‌شود تا کمیت بی‌بعد عمق (y/h) به‌دست آید.

$$U^* = \sqrt{gRS} \qquad (5)$$

در رابطه فوق، g شتاب گرانش زمین (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، S شیب بستر (۰/۰۰۱) و R شعاع هیدرولیکی کانال است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{A}{P} \qquad (6)$$

که در آن A مساحت مقطع جریان و P محیط مرطوب شده است.

کاربرد سرعت برشی: سرعت برشی (U*) پارامتری است که تنش برشی وارد بر بستر را نمایش می‌دهد و برای بی‌بعدسازی پروفیل سرعت در جریان‌های با سطح آزاد استفاده می‌شود. با استفاده از این پارامتر، می‌توان نتایج مربوط به عمق‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد و تاثیر عمق نسبی بر ساختار جریان را به‌طور دقیق‌تری بررسی نمود. در این پژوهش، از سرعت برشی برای بی‌بعدسازی سرعت طولی استفاده‌شده است تا بتوان تاثیر پوشش گیاهی بر روی پروفیل سرعت را مستقل از شرایط جریان (مانند دبی و عمق) مورد ارزیابی قرار داد. در این قسمت، برای بررسی تاثیر پوشش گیاهی صلب بر روی سرعت جریان، مقادیر سرعت طولی جریان در ۳ نقطه از مرکز کانال اصلی شامل پیش از شروع پوشش گیاهی نقطه (A)، در میان پوشش گیاهی نقطه (B) و در انتهای پوشش گیاهی نقطه (C) مورد ارزیابی قرارگرفته است. شکل ۹ بررسی سرعت جریان طولی در نقاط مذکور را در سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر نشان می‌دهد.

تحلیل شکل ۹ (الف تا د): شکل ۹ نتایج را در چهار بخش مجزا نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکلهای ۹ مشاهده می‌شود، پوشش گیاهی در تمامی عمق‌های نسبی تاثیر مستقیم بر سرعت جریان گذاشته و باعث کاهش آن در راستای قرارگیری پوشش گیاهی شده است. بیشترین تاثیر در نقطه (B) در میان پوشش گیاهی رخ‌داده است؛ به‌طوری‌که در عمق نسبی ۰/۱۵ متر، سرعت بی‌بعد (U/U*) از حدود ۸/۵ در نقطه (A) به حدود ۳/۵ در نقطه (B) کاهش‌یافته است (کاهشی معادل ۵۹ درصد). این کاهش برای عمق‌های نسبی ۰/۲ و ۰/۲۵ متر به‌ترتیب ۵۸ و ۵۵ درصد است. پس از اتمام پوشش گیاهی نقطه (C)، سرعت جریان دوباره شروع به افزایش می‌کند و به حدود ۵/۵ تا ۶ می‌رسد، اما به مقدار قبل از شروع پوشش گیاهی نقطه (A) نمی‌رسد. این موضوع نشان‌دهنده تاثیر پایدار پوشش گیاهی بر کاهش سرعت

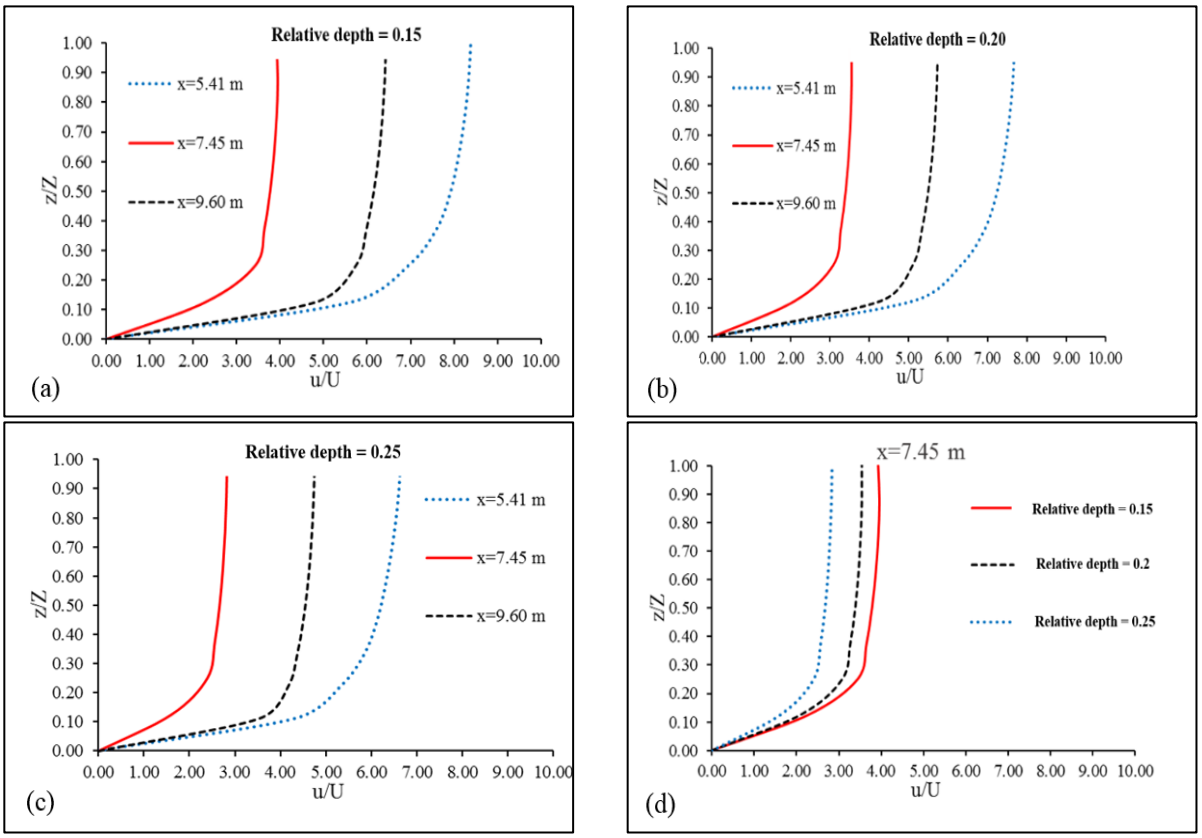


Fig. 9 Imensionless parameter of longitudinal flow velocity in the main channel. (a) Relative depth 0.15, (b) relative depth 0.20, (c) relative depth 0.25, (d) comparison of the effect of relative depth.

شکل ۹ پارامتر بی‌بعد سرعت طولی جریان در کانال اصلی. الف) عمق نسبی ۰/۱۵، ب) عمق نسبی ۰/۲۰، ج) عمق نسبی ۰/۲۵، د) مقایسه تاثیر عمق نسبی

جریان حتی پس از عبور از منطقه گیاهی است.

مقایسه سه عمق نسبی: با توجه به شکل ۹ (د)، با افزایش عمق نسبی، سرعت بی‌بعد طولی جریان در کانال اصلی کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که سرعت بی‌بعد طولی جریان (U/U*) در حالت عمق نسبی ۰/۲ و ۰/۲۵ به‌ترتیب ۰/۹ و ۰/۷۲ برابر سرعت در عمق نسبی ۰/۱۵ است. این کاهش با افزایش عمق نسبی به‌دلیل افزایش سطح مقطع جریان و کاهش نسبی تاثیر زبری پوشش گیاهی بر کل مقطع است. همچنین مشاهده می‌شود که الگوی کاهش سرعت در هر سه عمق نسبی مشابه است، که نشان‌دهنده تاثیر یکسان آرایش پوشش گیاهی بر ساختار جریان در عمق‌های مختلف است

تحلیل تکمیلی شکل ۹: علاوه‌بر موارد فوق، سه نکته قابل‌توجه در شکل ۹ مشاهده می‌شود: (۱) بیشترین کاهش سرعت بی‌بعد در نقطه (B) در میان پوشش گیاهی رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تاثیر مستقیم موانع بر کاهش سرعت موضعی است. (۲) با وجود افزایش سرعت پس از اتمام پوشش گیاهی نقطه (C)، سرعت بی‌بعد به مقدار اولیه (نقطه (A) نمی‌رسد که نشان‌دهنده تاثیر پایدار پوشش گیاهی بر ساختار جریان حتی در فاصله دور از منطقه گیاهی است. این پدیده نشان می‌دهد که اثر پوشش گیاهی بر جریان فراتر از ناحیه بلافصل آن است. (۳) الگوی کاهش و افزایش سرعت در هر سه عمق نسبی مشابه است که نشان‌دهنده استقلال الگوی کلی توزیع سرعت از عمق نسبی است و تغییرات عمق صرفا بر مقادیر عددی تاثیر می‌گذارد.

۳-۴- بررسی سرعت جریان در سیلاب‌دشت

شکل ۱۰ نتایج توزیع سرعت طولی جریان در عمق و مرکز

سیلاب‌دشت را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که وجود پوشش گیاهی صلب در کانال اصلی و سیلاب‌دشت، در محل آن افزایش سرعت جریان در سیلاب‌دشت را موجب می‌شود. تحلیل شکل ۱۰ (الف تا د): شکل ۱۰ نتایج را در چهار بخش مجزا نمایش می‌دهد. در شکل ۱۰ (الف) مربوط به عمق نسبی ۰/۱۵ متر، مشاهده می‌شود که در حالت بدون پوشش گیاهی، سرعت طولی در سیلاب‌دشت حدود ۰/۰۳۸ متر بر ثانیه است، درحالی‌که در حضور پوشش گیاهی، این مقدار به حدود ۰/۰۳۳ تا ۰/۱ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد (نزدیک به سطح). در شکل ۱۰ (ب) مربوط به عمق نسبی ۰/۲ متر، سرعت در حضور پوشش گیاهی به حدود ۰/۰۳۳ تا ۰/۱۱۰ متر بر ثانیه می‌رسد و در شکل ۱۰ (ج) مربوط به عمق نسبی ۰/۲۵ متر، سرعت به حدود ۰/۰۳۳ تا ۰/۱۲ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت در سیلاب‌دشت به‌دلیل انتقال بخشی از جریان از کانال اصلی به سیلاب‌دشت در اثر مقاومت ایجادشده توسط پوشش گیاهی است. شکل ۱۰ (د) نیز مقایسه سه عمق نسبی را در حالت با پوشش گیاهی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، می‌توان دریافت که تغییرات سرعت در حضور پوشش گیاهی در هر سه عمق نسبی موردپژوهش تقریبا برابر بوده و مستقل از عمق نسبی است. به‌عبارت‌دیگر، الگوی افزایش سرعت در سیلاب‌دشت در هر سه عمق نسبی مشابه است و اختلاف چندانی بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود.

این موضوع نشان‌دهنده آن است که پوشش گیاهی در کانال اصلی، صرف‌نظر از عمق جریان، باعث انحراف جریان به سمت سیلاب‌دشت می‌شود و این پدیده در اعماق مختلف به یک اندازه رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که در نزدیکی بستر سیلاب‌دشت (نسبت y/h نزدیک به صفر)، سرعت در هر سه عمق نسبی تقریبا یکسان (حدود ۰/۰۳۳ متر بر ثانیه) است و اختلاف سرعت عمدتا در لایه‌های فوقانی جریان رخ می‌دهد. تحلیل تکمیلی شکل ۱۰: سه نکته مهم در شکل ۱۰ قابل‌مشاهده است: (۱) افزایش سرعت در سیلاب‌دشت عمدتا در لایه‌های فوقانی جریان (نزدیک به سطح) رخ می‌دهد و در نزدیکی بستر، تغییرات سرعت ناچیز است که نشان می‌دهد اثر پوشش گیاهی بر انتقال جریان به سیلاب‌دشت عمدتا در نواحی نزدیک به سطح متمرکز است. (۲) با افزایش عمق نسبی از ۰/۱۵ به ۰/۲ متر، حداکثر سرعت در سیلاب‌دشت از ۰/۱ به ۰/۱۱ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد که بیانگر انتقال بیشتر جریان به سیلاب‌دشت در عمق‌های بالاتر است. (۳) با افزایش عمق نسبی از ۰/۲ به ۰/۲۵ متر، حداکثر سرعت به ۰/۱۲ متر بر ثانیه می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش پیوسته انتقال جریان به سیلاب‌دشت با افزایش عمق نسبی است

شکل ۱۱، نتایج پارامتر بی‌بعد سرعت طولی جریان در سیلاب‌دشت را نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی نشان‌دهنده نسبت بی‌بعد سرعت (u/U) و محور عمودی نشان‌دهنده نسبت بی‌بعد عمق (z/Z) است. با توجه به شکل، مقدار کمیت بی‌بعد سرعت در مرکز سیلاب‌دشت و در موقعیت ۷/۵۱ متری از ابتدای کانال، در سه عمق نسبی موردپژوهش تفاوت آشکاری باهم ندارند. تحلیل شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در عمق نسبی ۰/۱۵ متر، پروفیل بی‌بعد سرعت (u/U) در سیلاب‌دشت از حدود ۱/۸ در نزدیکی سطح به حدود ۰/۵ در نزدیکی بستر کاهش می‌یابد. در عمق نسبی ۰/۲ متر، این مقادیر به‌ترتیب حدود ۱/۹ و ۰/۵۵ و در عمق نسبی ۰/۲۵ متر حدود ۱/۷ و ۰/۴۵ است. به‌طورکلی، سرعت جریان در عمق نسبی ۰/۲ و ۰/۲۵ به‌ترتیب ۱/۰۸ و ۰/۹۴ برابر سرعت در عمق نسبی ۰/۱۵ است. این مقادیر نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی از ۰/۱۵ به ۰/۲ متر، سرعت در سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر عمق به ۰/۲۵ متر، سرعت کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به افزایش سطح مقطع جریان و کاهش نسبی تاثیر زبری پوشش گیاهی در عمق‌های بالاتر نسبت داد. همچنین شباهت پروفیل‌های سرعت در هر سه عمق نسبی نشان‌دهنده تاثیر غالب آرایش هندسی پوشش گیاهی بر ساختار جریان در سیلاب‌دشت است .تحلیل تکمیلی شکل ۱۱: نکات زیر از شکل ۱۱ قابل‌استخراج است: (۱) با وجود شباهت کلی پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در سه عمق نسبی، مقدار U/U* در عمق نسبی ۰/۲ متر (حدود ۱/۹) بیشتر از دو عمق دیگر است که نشان‌دهنده انتقال موثرتر جریان به سیلاب‌دشت در این عمق نسبی است. (۲) کاهش سرعت از سطح به بستر در

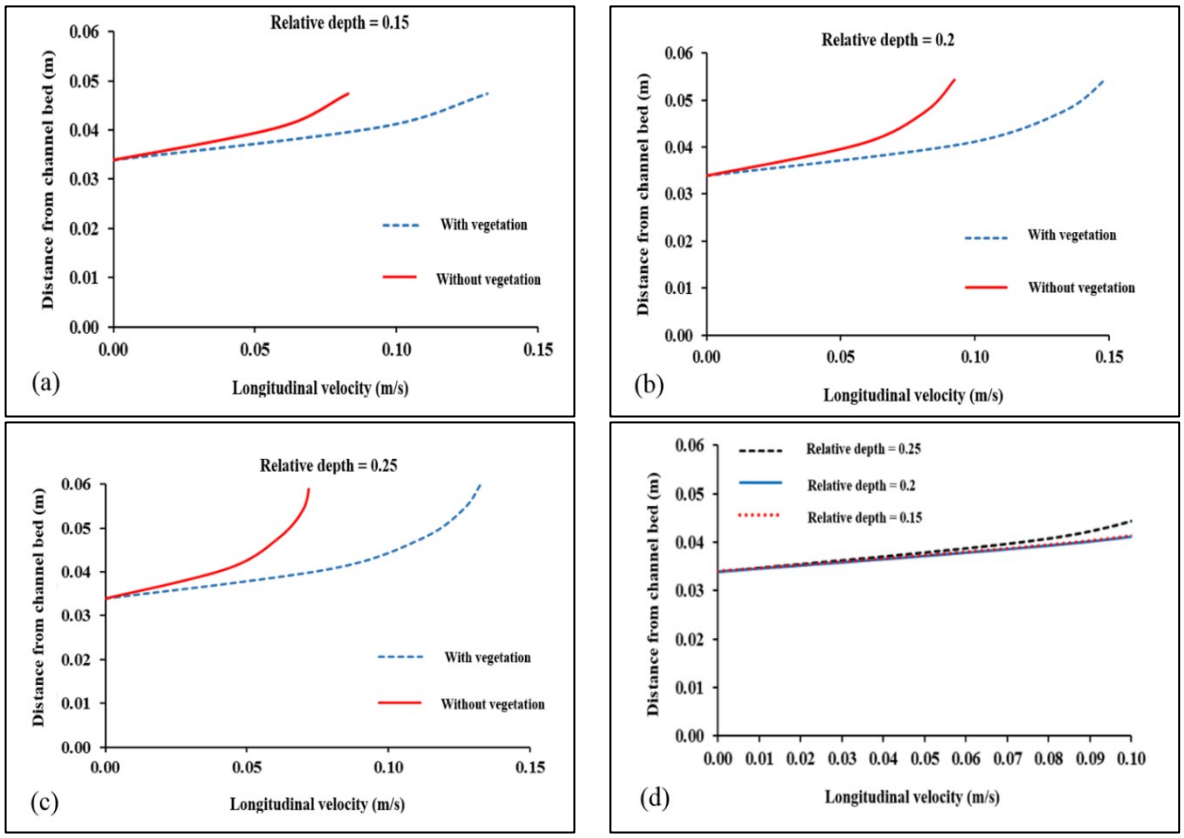


Fig. 10 Effect of vegetation presence on the distribution of longitudinal velocity in the floodplain: (a) relative depth 0.15, (b) relative depth 0.20, (c) relative depth 0.25, (d) comparison of the effect of relative depth.

شکل ۱۰ تاثیر وجود پوشش گیاهی بر توزیع سرعت طولی در سیلابدشت الف) عمق نسبی ۰/۱۵، ب) عمق نسبی ۰/۲۰، ج) عمق نسبی ۰/۲۵، د) مقایسه تاثیر عمق نسبی.

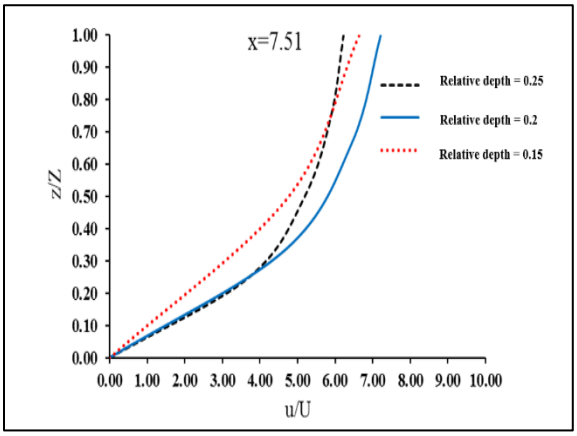


Fig. 11 Comparison of the dimensionless parameter of longitudinal flow velocity in the floodplain.

شکل ۱۱ مقایسه پارامتر بی‌بعد سرعت طولی جریان در سیلابدشت.

هر سه عمق نسبی مشابه است و شیب تقریبا یکسانی دارد که نشان‌دهنده تاثیر یکسان آرایش پوشش گیاهی بر ساختار عمقی جریان در سیلابدشت است. (۳) اختلاف بین پروفیل‌ها عمدتا در لایه‌های میانی و فوقانی جریان مشاهده می‌شود و در نزدیکی بستر، هر سه پروفیل به مقدار حدود ۰/۴۵-۰/۵ همگرا می‌شوند.

۳-۵- بررسی تاثیر پوشش گیاهی بر سرعت متوسط‌گیری شده در عمق

شکل ۱۲ توزیع سرعت متوسط‌گیری شده در عمق را در موقعیت x = 7.35 متر و در مقطع عرض کانال نشان می‌دهد. مطابق شکل، سرعت متوسط‌گیری شده در عمق جریان در محل وجود پوشش گیاهی تحت تاثیر قرارگرفته و کاهش می‌یابد. همچنین در اطراف پوشش گیاهی در کانال اصلی،

میزان سرعت جریان نسبت به حالت بدون حضور پوشش گیاهی افزایش پیدا می‌کند، ولی این افزایش در هر سه عمق نسبی (۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر) در این بخش از کانال فراوان نیست. این در حالی است که سرعت متوسط‌گیری شده در عمق جریان در بخش سیلاب‌دشت کانال نسبت به حالت بدون وجود پوشش گیاهی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است که این مورد در بخش قبلی نیز اشاره شد. لازم به ذکر است که سرعت در محل وجود پوشش گیاهی نه‌تنها در کانال اصلی بلکه در سیلاب‌دشت نیز کاهش زیادی داشته است.

تحلیل تکمیلی شکل ۱۲: شکل ۱۲ اطلاعات مهمی را در مورد تاثیر پوشش گیاهی بر توزیع عرضی سرعت ارائه می‌دهد: (۱) در کانال اصلی (مرکز مقطع)، کاهش سرعت متوسط در حضور پوشش گیاهی بسیار چشمگیر است و با افزایش عمق نسبی، این کاهش کمتر می‌شود (از حدود ۰/۰۸ متر بر ثانیه در عمق ۰/۱۵ به حدود ۰/۰۶ متر بر ثانیه در عمق ۰/۲۵ متر). (۲) در سیلاب‌دشت (دو طرف مقطع)، افزایش سرعت متوسط در حضور پوشش گیاهی قابل‌مشاهده است که تاییدکننده انتقال جریان از کانال اصلی به سیلاب‌دشت است. این افزایش در عمق نسبی ۰/۲ متر بیشترین مقدار را دارد که با نتایج شکل ۱۱ همخوانی دارد. (۳) پروفیل سرعت در حالت با پوشش گیاهی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی دارای شیب عرضی بیشتری است که نشان‌دهنده افزایش گرادیان سرعت عرضی و به‌تبع آن افزایش تنش برشی ظاهری در سطح مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت است. این موضوع با پژوهش‌های Hamidifar و همکاران (۲۰۱۶) که افزایش ضریب اختلاط عرضی را در حضور پوشش گیاهی گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. (۴) با افزایش عمق نسبی، تفاوت بین حالت با و بدون پوشش گیاهی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش اثر نسبی پوشش گیاهی در عمق‌های بالاتر است.

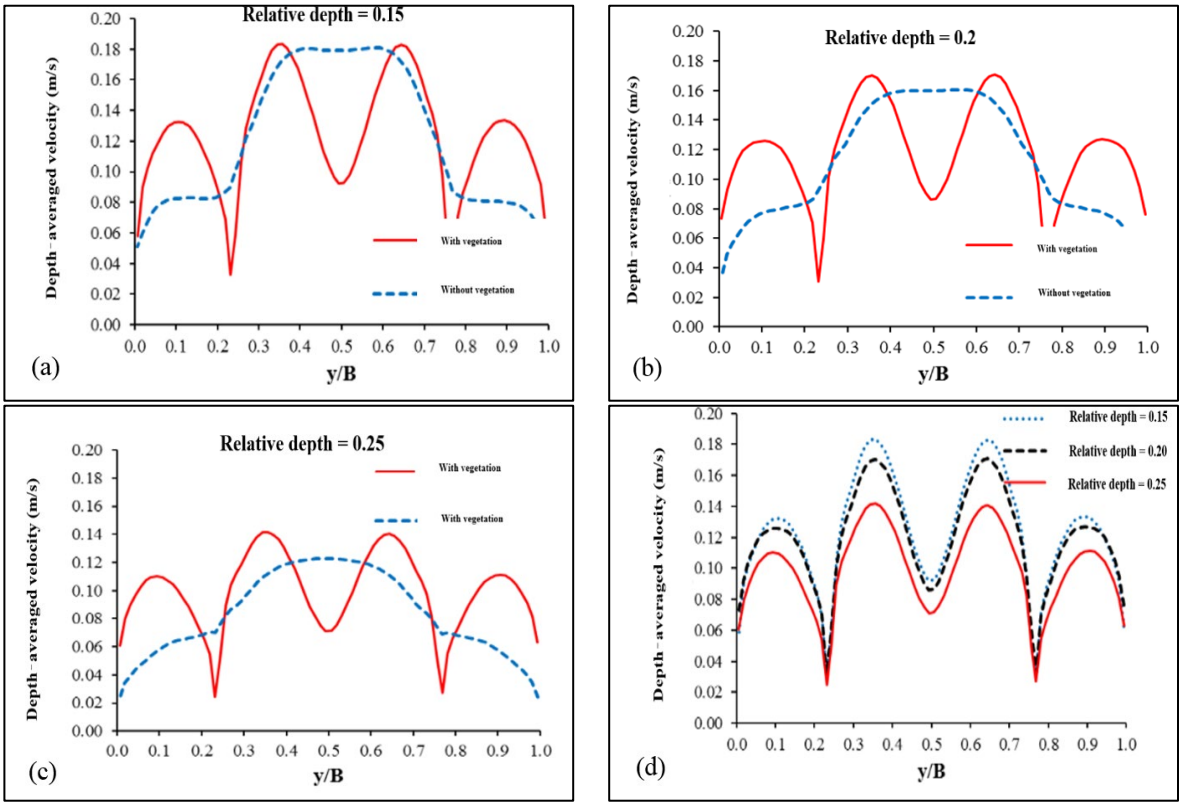


Fig. 12 Comparison of the effect of vegetation on depth-averaged velocity across the cross-section of the compound channel: (a) relative depth 0.15, (b) relative depth 0.20, (c) relative depth 0.25, (d) comparison of the effect of relative depth.

شکل ۱۲ مقایسه تاثیر پوشش گیاهی سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در مقطع عرض کانال مرکب الف) عمق نسبی ۰/۱۵، ب) عمق نسبی ۰/۲۰، ج) عمق نسبی ۰/۲۵، د) مقایسه تاثیر عمق نسبی

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر هم‌زمان حضور پوشش گیاهی صلب در مرکز کانال اصلی و سیلاب‌دشت یک کانال مرکب بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D انجام شد. نوآوری اصلی این مطالعه نسبت به تحقیقات پیشین، شبیه‌سازی هم‌زمان پوشش گیاهی در هر دو بخش کانال مرکب است؛ در حالی‌که اغلب مطالعات گذشته تنها یکی از این دو ناحیه را بررسی کرده‌اند. این رویکرد، بازنمایی دقیق‌تری از شرایط طبیعی رودخانه‌ها فراهم می‌کند. شبیه‌سازی‌های عددی برای سه عمق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ متر انجام شد.

نتایج نشان داد که وجود پوشش گیاهی در مرکز کانال اصلی موجب افزایش مقاومت هیدرولیکی و کاهش محسوس سرعت جریان در این ناحیه می‌شود؛ به‌طوری‌که میانگین کاهش سرعت طولی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی در عمق‌های نسبی یادشده به‌ترتیب حدود ۵۹، ۵۸ و ۵۵ درصد بود. بیشترین افت سرعت در محدوده استقرار پوشش گیاهی مشاهده شد و پس از عبور جریان از این ناحیه، سرعت مجددا افزایش یافت، اما به مقدار اولیه نرسید. همچنین با افزایش عمق نسبی، سرعت بی‌بعد طولی (U/U*) در کانال اصلی کاهش یافت. در سیلاب‌دشت، انتقال بخشی از جریان از کانال اصلی در اثر مقاومت ایجادشده توسط پوشش گیاهی، سبب افزایش نسبی سرعت شد و این الگو در هر سه عمق نسبی مشابه بود.

محدودیت‌های پژوهش: اعتبارسنجی مدل عددی تنها با یک مجموعه داده آزمایشگاهی انجام شد و نتایج به پوشش گیاهی صلب و هندسه خاص محدود است. همچنین اثر تراکم، آرایش و ارتفاع گیاهان به‌صورت جامع بررسی نشد.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده: بررسی پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر، آرایش‌های مختلف گیاهی، تراکم‌های متفاوت، اثر بر تنش برشی و انتقال رسوب، و نیز شبیه‌سازی سه‌بعدی با مدل‌های آشفتگی پیشرفته‌تر مانند LES و DES پیشنهاد می‌شود.

5- List of symboles

V (m/s)	Flow velocity
$\bar{V}$ (m/s)	Depth-averaged velocity
U (m/s)	Longitudinal velocity component
H (m)	Flow depth
H (m)	Total water depth
Y (m)	Vertical coordinate
X (m)	Longitudinal coordinate
Z (m)	Transverse coordinate
Fr (–)	Froude number
Re (–)	Reynolds number
g (m/s²)	Gravitational acceleration
ρ (kg/m³)	Fluid density
μ (Pa·s)	Dynamic viscosity
N (m²/s)	Kinematic viscosity
T 9N/m²)	Shear stress
D_v (m)	Vegetation stem diameter
h_v (m)	Vegetation height
a (m^{-1})	Vegetation density (frontal area per unit volume)
C_d (–)	Drag coefficient
A_f (m^2)	Frontal area of vegetation
Q (m^3/s)	Discharge
A (m^2)	Flow cross-sectional area
VOF (–)	Volume of Fluid function
MSE (–)	Mean square error (validation index)
RD (m)	Relative depth

Acknowledgments

We express our sincere thanks and appreciation to the esteemed staff of Azarbaijan Shahid Madani University.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.S.S, T.O.A., E.A. and A.A.; Methodology, A.A, and E.A. Software, M.S.S., E.A., and T.O.A.; Data analysis, M.S.S., E.A., and T.O.A.; Writing-Original Draft Preparation, M.S.S., and T.O.A.; Writing-review and editing, M.S.S., E.A., and T.O.A.

All authors have read and approved the published

version of the manuscript.

Funding

All simulation steps were done of Azarbaijan Shahid Madani University and it should be noted that no contract was signed with any government institution.

Data Availability Statement

Data access is available on a limited basis if needed.

Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest.

References

Ahmadi Dehrashid, 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

Armanini, A., Righetti, M., & Grisenti, P. (2005). Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale. Journal of Hydraulic Research, 43(5), 481–487. https://doi.org/10.1080/00221680509500146

Dolati Mahtaj, M., & Rezaei, B. (2022). Numerical investigation of flow field in the skewed compound channel. *Journal of Hydraulics*, *17*(1), 67–87.

Drikvaandi, Kh. Fathi-Moghadam, M., Masjedi, A., & Bina, M. (2012). Evaluation effect of density and flexibility of non-submerged vegetation on river banks and floodplains on the friction factors. Iran-Water Resources Research, *8*(2), 24-35. https://www.iwrr.ir/article_17451.html

Ebrahimi, N. G., Shirdel, A., Javan Nikkhah, E., & Hosseini, M. (2016). The impact of waterways bed's vegetation on flow hydraulic and bed form. Journal of Watershed Engineering and Management, 8(2), 182–192.

Esmali Ouri, A., Kavian, A., Jafarian, Z., & Kavianpoor, A. H. (2015). Effect of vegetation covers on decreasing runoff and soil loss using rainfall simulation in Nesho rangeland, Mazandaran province. *Journal of Geography and Environmental Planning, 26*(58), 179–190.

Flow Science Inc. (2012). FLOW-3D Theory Manual (Release 10.1.0). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

Hamidifar, H., Omid, M. H., Bahrami, M., & Amiri, K. J. (2016). Study of transverse mixing coefficient in compound channels with non-submerged vegetation on the floodplain. Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology), *30*(3), 857-867.

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

James, C. S., & Makoa, M. J. (2006). Conveyance estimation for channels with emergent vegetation boundaries. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 159*(4), 235–243. https://doi.org/10.1680/wama.2006.159.4.235

James, C. S., Goldbeck, U. K., Patini, A., & Jordanova, A. A. (2008). Influence of foliage on flow resistance of emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Research, 46*(4), 536–542. https://doi.org/10.3826/jhr.2008.3177

Kang, H., & Choi, S. U. (2006). Turbulence modeling of compound open-channel flows with and without vegetation on the floodplain using the Reynolds stress model. *Advances in Water Resources, 29*(11), 1650–1664. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.12.004

Mahmoudi Monfared, F., Younesi, H., & Rostamabadi, M. (2024). Numerical study of flow field and turbulence in a compound channel with diverging floodplain with vegetation. *Journal of Hydraulics*, *18*(4), 667–682.

Majedi Asl, M., Momeni, M. R., Nikmehr, S., Omidpour Alavian, T., & Sohrabi, F. (2026). *Laboratory and numerical investigation of flow rate in SMBF flumes using Flow3D and comparison with energy equations*. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment, 5*(1), 1–20. https://doi.org/10.22034/nawee.2025.517806.1152

Nepf, H. M. (2012). Flow and transport in regions with aquatic vegetation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *44*, 123–142. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-20710-101048

Rezaee, B., Hosseini, S. A., Yonesi, H., & Mohajeri, S. H. (2025). Characteristics of secondary currents and flow field in non-prismatic compound channels with vegetative cover. *Journal of Hydraulics*, *20*(1), 127–143. https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.449424.1697

Sun, X. (2007). Flow characteristics in compound channels with and without vegetation (Doctoral dissertation, Loughborough University). Loughborough University. URL

Tang, X., & Knight, D. W. (2009). Lateral

distributions of streamwise velocity in compound channels with partially vegetated floodplains. *Science in China Series E: Technological Sciences, 52*(11), 3357–3362. https://doi.org/10.1007/s11431-009-0342-7

Tsujimoto, T., Shimizu, Y., Kitamura, T., & Okada, T. (1992). Turbulent open-channel flow over bed covered by rigid vegetation. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 10*(2), 1–15. (Note: The full reference information is not provided in the text; the above is based on the available metadata)

Wang, Y., Yang, Z., Liu, M., & Yu, M. (2022). Numerical study of flow characteristics in compound meandering channels with vegetated floodplains. *Physics of Fluids*, *34*(11), 115107. https://doi.org/10.1063/5.0122089