

Characteristics of Secondary Currents and Flow Field in Non-Prismatic Compound Channels with Vegetative Cover

Bijan Rezaie¹, Seyyed Abbas Hoseini^{2*}, Hojjatallah Yonesi^{3*}, Seyyed Hossein Mohajeri⁴

1- Ph.D Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- College of Agriculture and Natural Resources, Water Engineering Department, Lorestan University.

4- Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

* abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir & yonesi.h@lu.ac.ir

Received: 31 March 2024

Accepted: 3 August 2024

Discussion: 22 June 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: During floods in many rivers, the flow exits its main section and inundates the vicinity floodplains. Flow in compound sections differs significantly from single channels. In such conditions, due to the changes in flow section shape and the roughness difference between the main channel and floodplains, the flow structure in compound channels becomes highly complex (Yang et al., 2007; 2013). Vegetation in natural rivers is typically classified into rigid (trees) and flexible (grasses) plant. The stems of flexible plants can change shape with the movement of water flow, whereas the trunks of rigid trees remain unchanged against the flow without deformation (Terrier, 2010). The vegetation presence in floodplain is one of the main components that can influence the velocity distribution in compound channels (Samadi Rahim et al., 2021; Hamidifar et al., 2016). This study, has investigated the flow field and the formation of secondary currents resulting from rigid and flexible vegetation in divergence compound channels with a mobile bed.

Methodology: To investigate the effects of the vegetation presence in floodplain on the flow structure and the formation of secondary currents, solid cylindrical plastic rods with a diameter (D) of 10 mm were used to model the vegetation of trees and artificial grass with a height of 3 cm as flexible vegetation. They were placed in floodplains with a width of 0.36 cm. The distance between the rows of rods (lx) was constant and equal to 75 mm. Moreover, to change the vegetation density, the transverse distance between two rods (ly) was set at three distances of 50, 75 and 100 mm. In the main channel with a width of 0.24 meters and a height of 0.15 meters, siliceous sediments with a mean diameter (D50) of 1 mm created a mobile bed. In the floodplain, three divergence angles of 3.8, 5.7 and 11.3 degrees were set in such a way that in three relative depths of flow equal to 0.25, 0.35 and 0.45 and three densities of vegetation with the space ratio to 5, 7.5 and 10 were performed in a total of 36 experiments. The components of the local flow velocity in the middle section and at the end of the floodplain divergence were measured using the Vectrino Profiler 3D velocimeter.

Results and Discussion: In the non-prismatic compound channels with vegetation, the vertical iso velocity in the common area between the main channel and the floodplain indicates a strong velocity gradient in this area and confirms the formation of a free shear layer due to the Kelvin-Helmholtz phenomenon. Due to the presence of grass vegetation in the floodplain bed, the flow in floodplain is divided into two separate regions: the flow

within the grass vegetation and the flow top of the grass vegetation. In divergent compound sections without vegetation, the transverse velocity of the flow in the main channel and the floodplain is significant and its positive. In the presence of vegetation, because the crest of the dune has reached the middle range of the divergence reach, the vertical component of the velocity in the main channel has become negative. As the distance from the floodplain bed increases, the drag force caused by the trees dominates and the contribution of the bed roughness in controlling the flow decreases. Therefore, the velocity profile in floodplain does not follow the logarithmic distribution and almost assumes an S shape. Vegetation has caused the formation of very weak secondary currents in the floodplain, especially in the reach of the end of the divergence. Also, the increase in vegetation density has caused the strength of eddies to decrease in the main channel. The transverse gradient shows that the greatest effect of the secondary currents was in the common area between the main channel and floodplain, so that the increase in vegetation density confirms the formation of a stronger shear layer in this area. Vegetation on the floodplain weakens the secondary currents in this area. These results agree well with the studies of researchers such as Yang et al. (2007), Hamidifar et al. (2016) and Samadi Rahim et al. (2023). Also, the movement of eddies direction is constantly changing and the flow is very complicated. Therefore, local erosion is observed in the bed of the main channel and close to the common side wall, and on the other side, the height of the dune is increased. While in the main channel, there are two eddies in opposite directions.

Conclusion: The Kelvin-Helmholtz instability causes the generation of a free shear layer in the intersection area. Additionally, the presence of points with near-zero velocity on the floodplains indicates the excessive resistance of both flexible and rigid vegetation compared to findings in the literature. The periodic fluctuations of positive and negative transverse flow velocity in the floodplain suggest the interference of Von Kármán vortex streets in the space between vegetation elements. In the divergent compound channel with the vegetated floodplain, too weak secondary currents are generated, especially in the end of the divergence reach.

Keywords: Divergent compound channel, Vegetation Reynolds number, Large scale eddies, Vegetation density.

خصوصیات جریان ثانویه و میدان جریان در کانال‌های مرکب غیر منشوری با پوشش گیاهی

بیژن رضایی^۱، سیدعباس حسینی^{۲*}، حجت الله یونسی^{۳*}، سید حسین مهاجری^۴


۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشیار دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان.

۴- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

* abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir & yonesi.h@lu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: هدف از این تحقیق بررسی اثر پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر سیلابدشت بر روی الگوی جریان و نحوه تشکیل جریان‌های ثانویه در کانال‌های مرکب واگرا با بستر متحرک می‌باشد. به همین دلیل کلیه آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی انجام شد که در آن از میله‌های پلاستیکی با قطر ۱۰ میلی‌متر بعنوان پوشش گیاهی درخت استفاده شد و چمن‌های مصنوعی به ارتفاع ۳ سانتی‌متر در بستر سیلابدشت ساختار پوشش گیاهی علفزار را بوجود آوردند. نتایج نشان می‌دهد که پوشش گیاهی (صلب و انعطاف‌پذیر)، گرادیان سرعت جریان را در صفحه عمودی مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت افزایش می‌دهد. حضور پوشش گیاهی سیلابدشت بطور متوسط موجب کاهش ۶۳/۱ درصدی سرعت جریان در سیلابدشت شده است. همچنین، در تمامی تراکم‌های پوشش گیاهی مشاهده گردید که پروفیل‌های قائم مؤلفه طولی سرعت در جهت جریان اندازه‌گیری شده با حرکت از دیواره کانال اصلی به سمت ناحیه مشترک تقریباً از یک پروفیل S شکل تبعیت می‌کنند. علاوه بر این، در کانال مرکب با سیلابدشت واگرا حضور پوشش گیاهی موجب تشکیل دو گردابه در خلاف جهت همدیگر در محدوده کانال اصلی خواهد شد، بطوریکه یک گردابه پادساعتگرد نسبتاً ضعیف تحت تأثیر دیواره مشترک عمودی در تراز پایین‌تر از ارتفاع لبریزی و گردابه‌ای ساعتگرد و نسبتاً قوی در محدوده بالای تراز لبریزی شکل می‌گیرد که میزان و شدت آن‌ها به نحوه شکل‌گیری فرم بستر در کانال اصلی بستگی دارد.

کلیدواژگان: مقطع مرکب واگرا، پوشش گیاهی، سیلابدشت، میدان جریان.

۱- مقدمه

نتیجه در بسیاری از آبراهه‌ها هنگام رخداد سیل، جریان از مقطع اصلی خود خارج شده و سیلابدشت‌های پیرامونی را فرا می‌گیرد. هیدرولیک جریان در مقطع‌های مرکب تا اندازه زیادی با آبراهه‌ها با مقطع واحد^۱ تفاوت دارد. در چنین شرایطی، به دلیل تغییر شکل مقطع جریان و تفاوت زبری آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها، ساختار جریان در مقطع‌های مرکب بسیار پیچیده خواهد شد (Yang et al., 2007; Yang et al., 2013). هنگام عبور جریان از مقطع‌های باریک و با کاهش شیب بستر رودخانه به

پیدایش و شکل‌گیری آبراهه‌های طبیعی متأثر از عامل‌های مهمی همچون شدت جریان رودخانه، مقاومت بستر در برابر فرسایش، شکل هندسی و ویژگی‌ها و مقدار رسوب انتقالی می‌باشد. شکل و ابعاد رودخانه پس از تشکیل آن تا هنگامی که تغییر عمده‌ای در یک یا چند عامل بالا صورت نگیرد، به نسبت ثابت است. چنانچه رودخانه‌ها در سازندهای مصالح آبرفتی فرسایش‌پذیر تشکیل شوند، گرایش همیشگی برای تغییر پیوسته موقعیت و هندسه رودخانه‌ها بواسطه فرسایش و رسوب‌گذاری وجود دارد. در

1. Single channel

سیلابدشت‌ها با پوشش گیاهی ساختار هیدرولیکی پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند که در طی دو دهه اخیر توجه بسیاری از محققان مسئله‌های رودخانه را به خود معطوف ساخته است. (Yang *et al.* (2007) اثر پوشش گیاهی (درخت، درختچه و علفزار) را بر روی الگوی جریان در آبراهه مرکب منشوری بررسی کردند. آنان دریافتند که، در حالت بدون پوشش گیاهی، همگی توزیع سرعت‌های جریان اندازه‌گیری شده از توزیع لگاریتمی سرعت پیروی می‌کنند، در حالی که در سیلابدشت با پوشش گیاهی توزیع عمودی سرعت جریان از یک نیمرخ S شکل پیروی می‌کند. جریان‌های ثانویه در محدوده آبراهه اصلی در عمق‌های نسبی بالای جریان (نسبت عمق جریان در سیلابدشت به عمق جریان در آبراهه اصلی برابر ۰/۷) چندان قوی نبوده و در ناحیه سیلابدشت با پوشش گیاهی اثر آنان ضعیف می‌باشد. Sanjou *et al.* (2010) و (Sanjou and Nezu (2011) ساختار آشفتگی جریان در آبراهه‌های مرکب منشوری با پوشش گیاهی تک ردیفه درختان را ارزیابی کردند. آنان مشاهده کردند که، در حالت درختان نامستغرق سرعت عرضی جریان به صورت موضعی در ناحیه مشترک عمودی کاهش یافته و پس از آن جریان‌های ثانویه بزرگ مقیاس در هر دو سمت جریان بالارونده مایل در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی وجود دارند.

(Vojoudi Mehrabani (2020) رفتار جریان را در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری همگرا با پوشش گیاهی صلب مستغرق بررسی کردند. نتایج آنان نشان می‌دهد که بیشینه سرعت جریان در محور میانی آبراهه اصلی رخ می‌دهد و با افزایش عمق نسبی و گسترش جریان‌ثانویه به سمت میانه آبراهه‌ها جابه‌جا می‌شود. Mohseni and Tavakoli Nezhad Allah Abadi (2020) پژوهش‌های خود نیمرخ عمقی سرعت را در آبراهه‌های مرکب منشوری با پوشش گیاهی صلب در سیلابدشت در شرایط مستغرق و غیرمستغرق بررسی کردند. آنان دریافتند با وجود پوشش گیاهی، نیمرخ عمقی سرعت در میانه آبراهه اصلی لگاریتمی بوده و با دور شدن از میانه آبراهه اصلی و نزدیک شدن به حفاصل آبراهه اصلی و

طور معمول مقطع واگرا تشکیل می‌شود. اگرچه هندسه رودخانه به عامل‌های دیگری همچون مقاومت در برابر فرسایش، شدت جریان، ظرفیت انتقال رسوب و ... بستگی دارد.

پوشش گیاهی در رودخانه‌های طبیعی به طور معمول به پوشش گیاهی سخت و صلب (درختان) و پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر (علفزارها) طبقه‌بندی می‌شود. ساقه گیاهان انعطاف‌پذیر می‌تواند با حرکت جریان آب تغییر شکل داده، در حالی که تنه درختان سخت و صلب بوده و در مقابل جریان بدون تغییر شکل باقی می‌مانند (Terrier, 2010). ساختار و چگونگی شکل‌گیری جریان در آبراهه‌های مرکب در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در کنار گردابه‌های عمودی بزرگ مقیاس که مسئول انتقال اندازه حرکت بین آبراهه اصلی و سیلابدشت می‌باشند (Devi and Khatua, 2016)، جریان‌ثانویه با محور طولی نیز مشاهده می‌شود که توسط آشفتگی‌های ناهمسان‌گرد تولید شده و ویژگی آنان تحت تأثیرعامل‌هایی همچون هندسه مقطع آبراهه، عمق نسبی و میزان آشفتگی جریان می‌باشد (Shiono and Knight, 1991).

پوشش گیاهی سیلابدشت از جمله مؤلفه‌های اصلی است که می‌تواند توزیع سرعت در آبراهه‌های مرکب را تحت تأثیر قرار دهد (Hamidifar *et al.*, 2016; Samadi Rahim *et al.*, 2021). از سوی دیگر هندسه عنصرهای گیاهی (شکل، اندازه، انعطاف‌پذیری و تراکم پوشش گیاهی) و الگوی جریان به‌طور معناداری بر مقاومت هیدرودینامیکی اثرگذار می‌باشد (Ghisalberti and Nepf, 2006; Samadi Rahim *et al.*, 2022). سرعت در جهت جریان به شدت تحت تأثیر نیروی کشانه ناشی از پوشش گیاهی می‌باشد (Sanjou and Nezu, 2011; Samadi Rahim *et al.*, 2023). این نیروی کشانه تابعی از ویژگی‌های ابعادی گیاهان، انعطاف‌پذیری آنان، تراکم پوشش گیاهی و شرایط جریان است (Barrios-Piña *et al.*, 2014).

همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، ورود جریان به

طور کامل و در تلفیق با یکدیگر مدل‌سازی کنند. بدین ترتیب، بنابر نتایج به دست آمده از تحقیقات گذشته، در این تحقیق سعی شده است به بررسی میدان جریان و چگونگی تشکیل جریان ثانویه ناشی از پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر در آبراهه‌های مرکب واگرا با بستر متحرک پرداخته شود. بدین ترتیب، از نتایج این تحقیق می‌توان در تعیین ساختار جریان و مشخصه‌های آشفتگی که در پدیده‌های انتقال رسوب و آلاینده‌ها، فرسایش بستر و استخراج رابطه دبی-اشل اهمیت دارد، استفاده کرد و بایستی این موضوع‌ها را در هدف‌های کاربردی همچون ساخت و نگهداری سازه‌های مربوط به رودخانه مورد توجه بیشتری قرار داد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

به منظور بررسی اثر پوشش گیاهی سیلابدشت بر ساختار جریان و چگونگی شکل‌گیری جریان‌های ثانویه، میله‌های پلاستیکی استوانه‌ای صلب با قطر (D) ۱۰ میلی‌متر برای مدلسازی پوشش گیاهی درخت و چمن مصنوعی با ارتفاع ۳ سانتی‌متر بعنوان پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر بر روی سیلابدشتی به عرض ۳۶ سانتی‌متر قرار گرفتند. باتوجه به نتایج بررسی‌های پیشین (Yang et al., 2007; Samadi Rahim et al., 2022) فاصله بین ردیف‌های میله‌های پلاستیکی (l_x) ثابت و برابر با ۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در حالی که به منظور تغییر میزان تراکم پوشش گیاهی فاصله عرضی میان دو میله (l_y) در سه فاصله ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر تنظیم شد. بنابر بررسی‌های Zdravkovich (1977) نسبت فاصله ($Sr=l_y/D$) بحرانی برابر با ۳/۵-۳/۸ می‌باشد، در حالی که محققان دیگر از جمله Terrier et al. (2010) آزمایش‌های خود را برای نسبت فاصله ۱۶-۸ انجام دادند و Sun and Shiono (2009) نیز این فاصله را در محدود ۱۳/۳-۴/۴ انتخاب کردند.

در محدوده آبراهه اصلی به عرض ۰/۲۴ متر و ارتفاع ۰/۱۵ متر رسوب‌ها از جنس سیلیس با قطر میانه (D_{50}) ۱ میلی‌متر بستر متحرک را ایجاد کردند. از سطح افقی

سیلابدشت از شکل لگاریتمی خارج شده و S شکل می‌شود. (Maturi et al. (2021) به روش اندازه‌گیری مستقیم تاثیر پوشش گیاهی صلب نامستغرق را بر انتقال اندازه حرکت در آبراهه‌های مرکب منشوری بررسی کردند. آنان دریافتند که پوشش گیاهی به هر نحوی که در آبراهه قرار داده شود، سبب به وجود آمدن نیروی مضاعف جریان می‌شود. (Shahsavari et al. (2020) در تحقیقات خود دریافتند که حضور پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان، ظرفیت انتقال را در ناحیه سیلابدشت مقطع‌های مرکب پیچانرودی کاهش می‌دهد. (Samadi Rahim et al. (2021; 2022) بیان کردند که حضور پوشش گیاهی صلب در سیلابدشت آبراهه مرکب واگرا سرعت جریان را در این ناحیه در مقایسه با آبراهه بدون پوشش گیاهی به ترتیب در میانه و انتهای مقطع واگرایی به‌طور میانگین در حدود ۶۰ و ۶۹ درصد کاهش می‌دهد. (Mulahasan et al. (2017) اثر پوشش گیاهی متراکم و تک ردیفه را بر روی ویژگی‌های جریان از جمله منحنی سنج، ضریب کشانه و نیمرخ‌های عرضی و طولی سرعت جریان در آبراهه‌های مرکب منشوری بررسی کردند. آنان بیان داشتند که سرعت جریان و ضریب کشانه به شدت تحت تاثیر پوشش گیاهی سیلابدشت می‌باشند. (Samadi Rahim et al. (2023) با بررسی اثرگذاری پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق بر روی ساختار جریان در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری (واگرا و همگرا) دریافتند که در حضور پوشش گیاهی غیرمستغرق برای جریان ثانویه درون آبراهه اصلی همواره پادساعتگرد می‌باشد. وجود عنصرهای پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق در امتداد سیلابدشت باعث می‌شود تا گردابه‌های بزرگ مقیاس به گردابه‌های چندی و کوچکتری در ناحیه پیرامون پوشش گیاهی تبدیل شود و با ایجاد نوسان‌های موضعی سرعت باعث افزایش انرژی جنبشی آشفتگی می‌شوند. با مرور و ارزیابی تحقیقات پیشین مشخص می‌شود که هر یک از آنان تنها به بخشی از پیچیدگی جریان در آبراهه‌های مرکب پرداخته‌اند و شرایط واقعی پوشش گیاهی و رسوب‌ها جریان در آبراهه‌های طبیعی را نتوانسته‌اند به-

کند (Yonesi et al., 2019). برای تامین و اطمینان از شمار داده‌های باکیفیت در هر یک از نقطه‌های اندازه‌گیری شده، مدت نمونه‌برداری از داده‌های سرعت به مدت ۱۲۰ ثانیه انتخاب شد. مقطع‌های اندازه‌گیری سرعت جریان در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۲-۲- جریان ثانویه

جمله جریان ثانویه (Γ) با استفاده از میانگین مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت جریان که توسط دستگاه وکترینو پروفایلر اندازه‌گیری شده است، محاسبه شد (Rezaei and Knight, 2009):

$$\Gamma = \frac{\partial}{\partial y} [H (\rho UV)_d] \quad (1)$$

در رابطه بالا، H عمق جریان در فاصله‌های عرضی آبراهه برابر شکل ۳، ρ چگالی سیال، U و V به ترتیب مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت جریان بوده و اندیس d نیز بیانگر میانگین‌گیری شده در عمق می‌باشد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- خطوط هم سرعت جریان

به منظور بررسی میدان جریان در آبراهه مرکب غیرمنشوری با و بدون پوشش گیاهی شکل ۴ برای عمق نسبی ۰/۳۵ و زاویه واگرایی ۵/۷ درجه ترسیم شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در آبراهه مرکب غیرمنشوری با پوشش گیاهی، عمودی شدن خطوط هم سرعت جریان در ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت گویای گرادیان شدید سرعت در این ناحیه می‌باشد و تشکیل یک لایه برشی آزاد را در اثر پدیده کلوین-هلمهولتز تأیید می‌نماید. بنابراین، تبادل جرم و تغییر اندازه حرکت جریان در این محدوده بسیار مشهود می‌باشد. همچنین با افزایش تراکم پوشش گیاهی توسعه لایه برشی جریان در امتداد صفحه مشترک عمودی افزایش می‌یابد.

به دلیل حضور پوشش گیاهی علفزار در بستر سیلابدشت، جریان در سیلابدشت به دو ناحیه جداگانه تقسیم می‌شود:

جریان درون پوشش گیاهی علفزار و جریان بالاتر از

رسوب‌ها تا لبه سیلابدشت (عمق لبریزی^۱) برابر با ۰/۱۶۷ متر تنظیم شد. به منظور برقراری جریان و انتقال رسوب‌ها، شیب طولی آبراهه معادل با ۰/۰۰۸۸ ثابت شد. در اثر برقراری جریان، شکل بستر در طول آبراهه اصلی تشکیل شده و رسوب‌ها حمل شده در انتهای آبراهه به یک سبده تله‌اندازی رسوب‌ها وارد شده و توسط یک پمپ لجن‌کش مکش شده و برای برقراری تعادل در شکل بستر به ابتدای آبراهه هدایت می‌شوند. برای کنترل نیمرخ سطح آب و اندازه‌گیری آن از یک ارتفاع سنج سوزنی^۲ با دقت ± 1 میلی‌متر استفاده شد. در ابتدای ورودی آبراهه و بر روی خطوط اصلی جریان یک جریان سنج الکترومغناطیسی نصب شده است که مقدار جریان ورودی به آبراهه مرکب را به‌طور پیوسته نمایش می‌دهد.

در ناحیه سیلابدشت سه زاویه واگرایی ۳/۸، ۵/۷ و ۱۱/۳ درجه به شکلی تنظیم شد که در سه عمق نسبی جریان معادل با ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ و سه تراکم پوشش گیاهی با نسبت فاصله‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ در مجموع ۳۶ آزمایش انجام شد. بدین ترتیب، ۹ آزمایش در شرایط سیلابدشت بدون پوشش گیاهی انجام شد و نتایج آن برای مهار و مقایسه با شرایط سیلابدشت همراه با پوشش گیاهی استفاده شد. هریک از آزمایش‌ها توسط یک نماد منحصر بفر $D-\theta-Sr-Dr$ نام‌گذاری شده است که به ترتیب بیانگر مقطع واگرا، زاویه واگرایی، نسبت فاصله (تراکم پوشش گیاهی) و عمق نسبی جریان در آبراهه مرکب می‌باشد. در جدول ۱، ویژگی‌های و شمار آزمایش‌ها ارائه شده است. شکل ۲ فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده و دیگر ویژگی‌های آن را نمایش می‌دهد.

مؤلفه‌های سرعت موضعی جریان در مقطع میانی و انتهای واگرایی سیلابدشت در شرایط تعادل شکل بستر و در زمان رسیدن تاج تلماسه به این ناحیه‌ها توسط دستگاه سرعت سنج سه بعدی وکترینو پروفایلر^۳ اندازه‌گیری شد.

باید توجه داشت که زمان تعادل شکل بستر در هر آزمایش متفاوت بوده و در این تحقیق برای اندازه‌گیری داده‌ها باید دست‌کم سه تاج تلماسه از انتهای آبراهه عبور

1. Bankful
2. Point Gauge
3. Vectrino Profiler

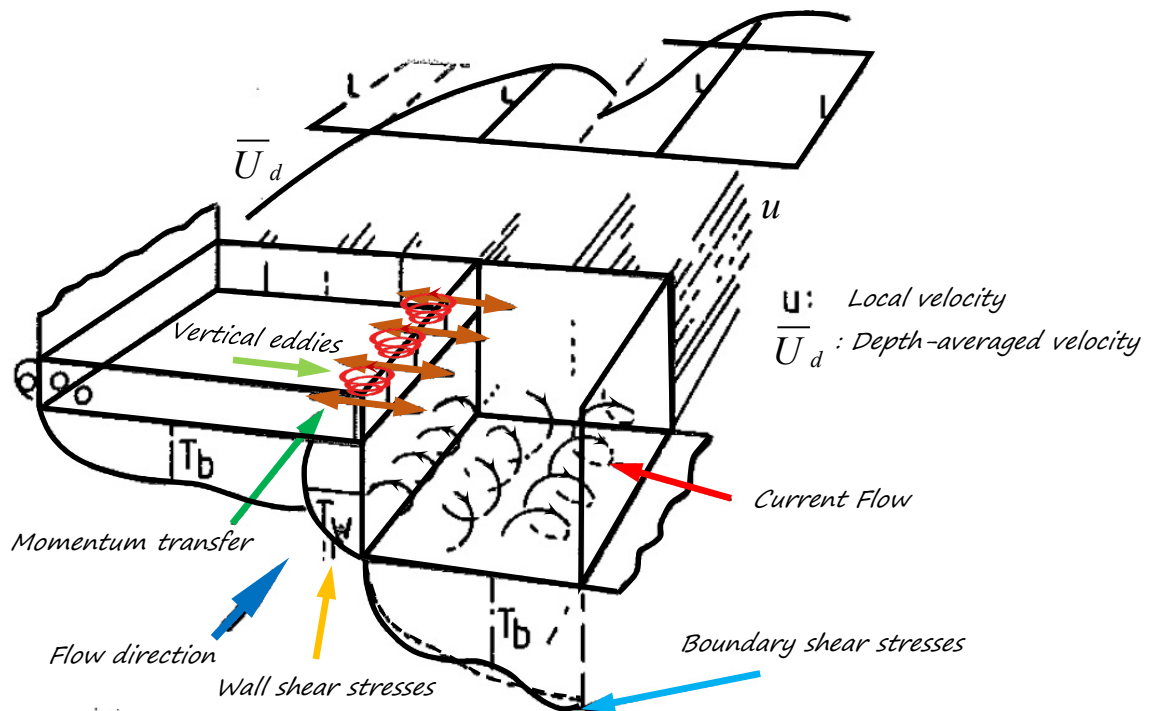


Fig. 1 Hydraulic properties of flow in compound channels (Stephenson and Kolovopoulos, 1990)
 شکل ۱ نمایش ویژگی های هیدرولیکی جریان در آبراهه های مرکب (Stephenson and Kolovopoulos, 1990)

جدول ۱ ویژگی ها و شمار آزمایش های انجام شده

Table 1 Properties and number of experiments

Exp. Series	Spacing ratio (Sr)	Dr	Floodplain angle (θ°)	Reynolds Number $\times 10^5$	Froude Number	Number of Exp.
D- θ -Dr	---	0.25,0.35,0.45	3.8,5.7,11.3	1.081-1.797	0.160-0.413	9
D- θ -Sr-Dr	5,7.5,10	0.25,0.35,0.45	3.8,5.7,11.3	1.001-1.652	0.130-0.383	27

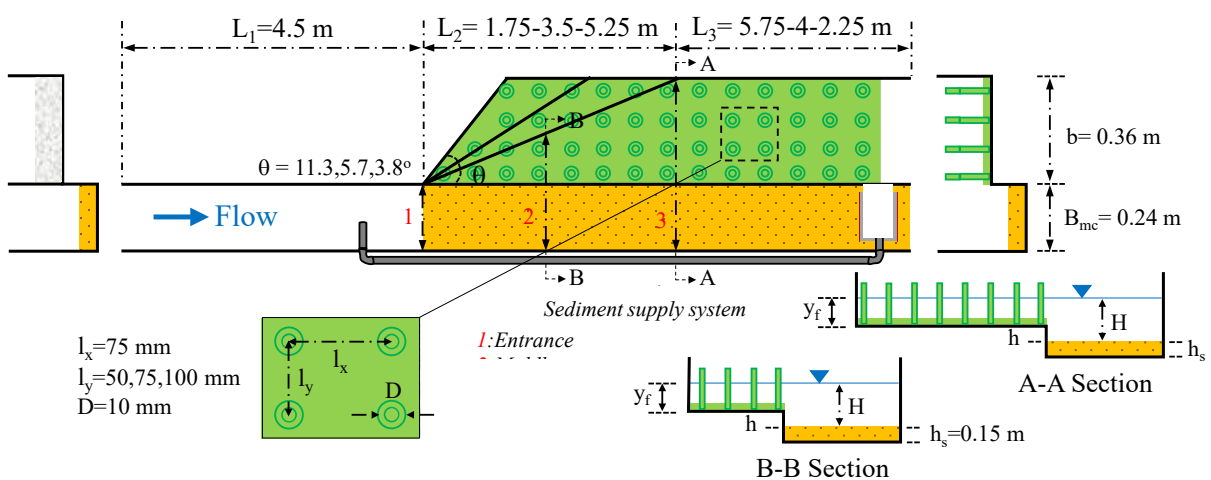


Fig. 2 Schematic plan of the physical model of the diverging compound channel
 شکل ۲ شمای کلی طرح مدل فیزیکی آبراهه مرکب واگرا

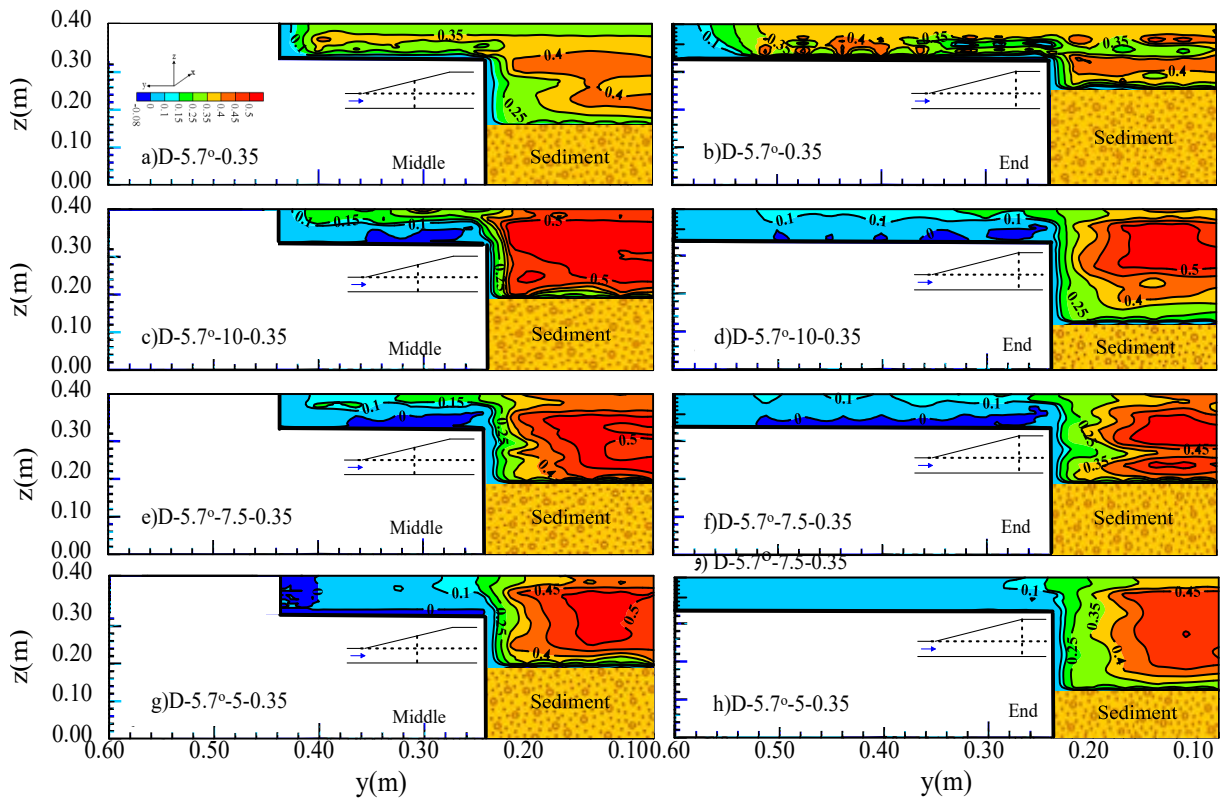


Fig. 4 The iso velocity of the longitudinal component of flow velocity (u) in different densities of vegetation, $Dr=0.35$, $\theta=5.7^\circ$

شکل ۴ خطوط هم مقدار مؤلفه طولی سرعت جریان (u) در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، $\theta=5.7^\circ$ ، $Dr=0.35$

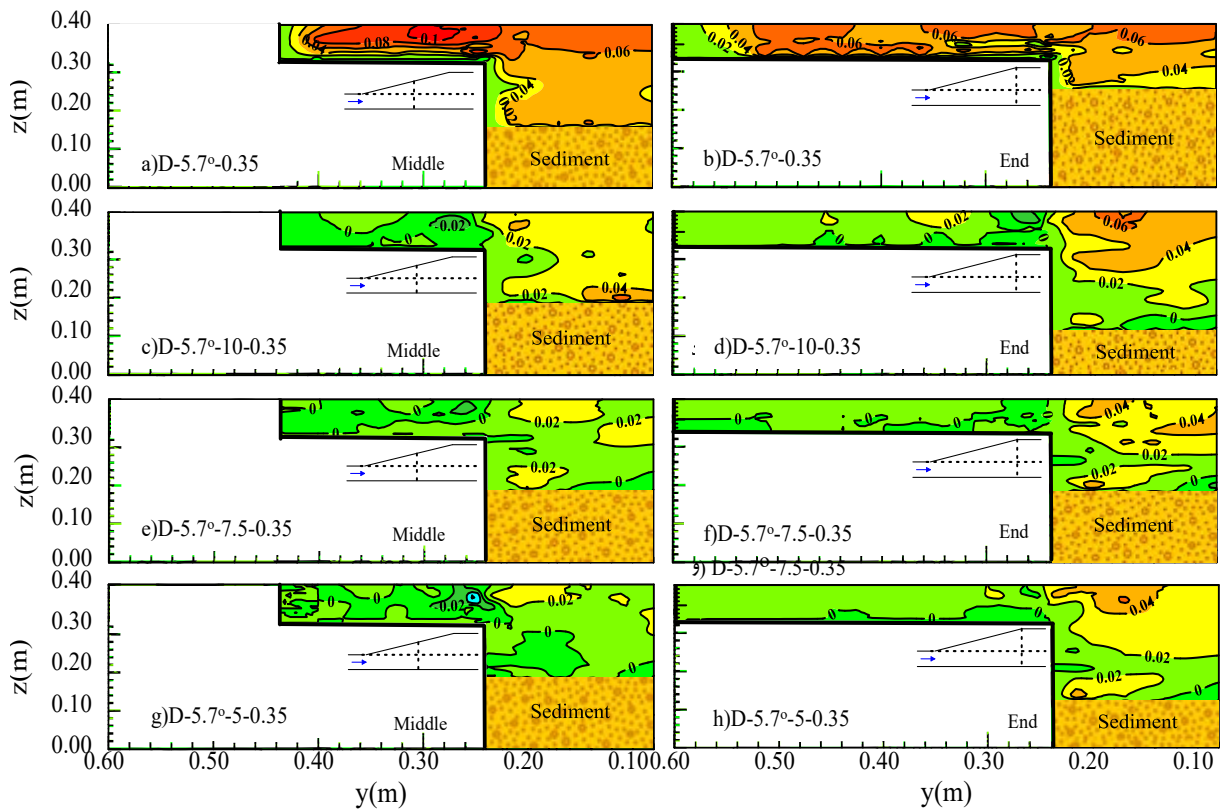


Fig. 5 The iso velocity of the transverse component of flow velocity (v) in different densities of vegetation, $Dr=0.35$, $\theta=5.7^\circ$

شکل ۵ خطوط هم مقدار مؤلفه عرضی سرعت جریان (v) در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، $\theta=5.7^\circ$ ، $Dr=0.35$

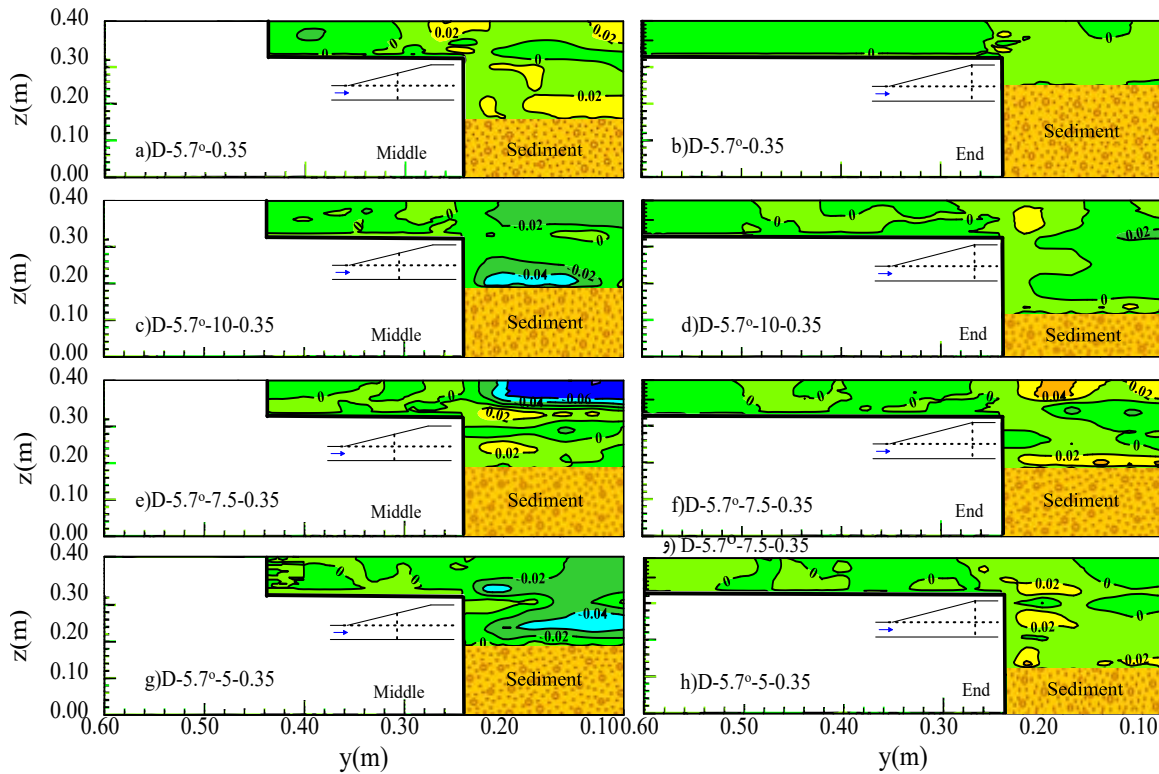


Fig. 6 The iso velocity of the vertical component of flow velocity (u) in different densities of vegetation, $Dr=0.35$, $\theta=5.7^\circ$, $\theta=5/7^\circ$, $Dr=0/35$, در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، شکل ۶ خطوط هم مقدار مؤلفه قائم سرعت جریان (w) در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، $\theta=5/7^\circ$, $Dr=0/35$

پوشش گیاهی علفزار در بستر سیلابدشت موجب شده است که تنش برشی بستر عامل مؤثری در شکل نیمرخ سرعت در ناحیه های نزدیک به بستر باشد. در حالی که با بیشتر شدن فاصله از بستر سیلابدشت، نیروی کشانه ناشی از درختان غالب شده و سهم زبری بستر در مهار جریان کاهش می‌یابد. بنابراین، نیمرخ سرعت در سیلابدشت از قانون توزیع لگاریتمی پیروی نکرده و تاحدودی شکل S به خود می‌گیرد. لازم به یادآوری است که V_A معرف میانگین سرعت جریان در مقطع آبراهه مرکب و اگر می‌باشد.

۲-۳- نیمرخ عمقی مؤلفه های سرعت جریان

در شکل ۷ حضور پوشش گیاهی سیلابدشت موجب افزایش سرعت طولی جریان در آبراهه اصلی شده در حالی که میزان مؤلفه طولی سرعت جریان بر روی سیلابدشت تضعیف شده‌اند. این موضوع بخوبی در پوشش گیاهی متراکم مشاهده می‌شود. همچنین، اختلاف نیمرخ عمودی مؤلفه طولی سرعت جریان در شرایط با و بدون پوشش گیاهی در مرکز سیلابدشت ($y=0.425m$) نسبت به صفحه عمودی ($y=0.24m$) بیشتر است. در حقیقت

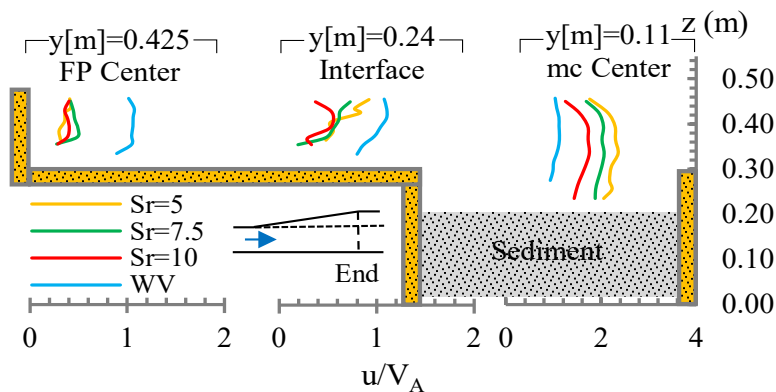


Fig. 7 Depth profile of the velocity component in the flow direction (u), D-5.7°-Sr-0.45- WV: Without vegetation
شکل ۷ نیمرخ عمقی مؤلفه سرعت در جهت جریان (u)، WV -D-5.7°-Sr-0.45، بدون پوشش گیاهی

مشترک پادساعتگرد باشد. با وجود پوشش گیاهی در آبراهه مرکب واگرا، مقدار مؤلفه عرضی جریان در بستر آبراهه اصلی ابتدا منفی بوده و با حرکت به سمت ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت سرعت عرضی جریان در همه عمق جریان مثبت می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود پوشش گیاهی شدت انتقال اندازه حرکت در ناحیه سیلابدشت را کاهش می‌دهد.

با توجه به نتایج نیمرخ عمقی مؤلفه عرضی سرعت جریان در شکل ۸ می‌توان دریافت که در آبراهه بدون پوشش گیاهی همواره سرعت عرضی جریان در آبراهه اصلی مثبت بوده و جریان از آبراهه اصلی به سمت سیلابدشت حرکت می‌کند. در حالی که در ناحیه سیلابدشت در ناحیه‌های نزدیک به بستر، انتقال اندازه حرکت از سیلابدشت به آبراهه اصلی صورت گرفته و با نزدیک شدن به سطح آب علامت سرعت عرضی جریان مثبت می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود جهت جریان‌های ثانویه در محل صفحه

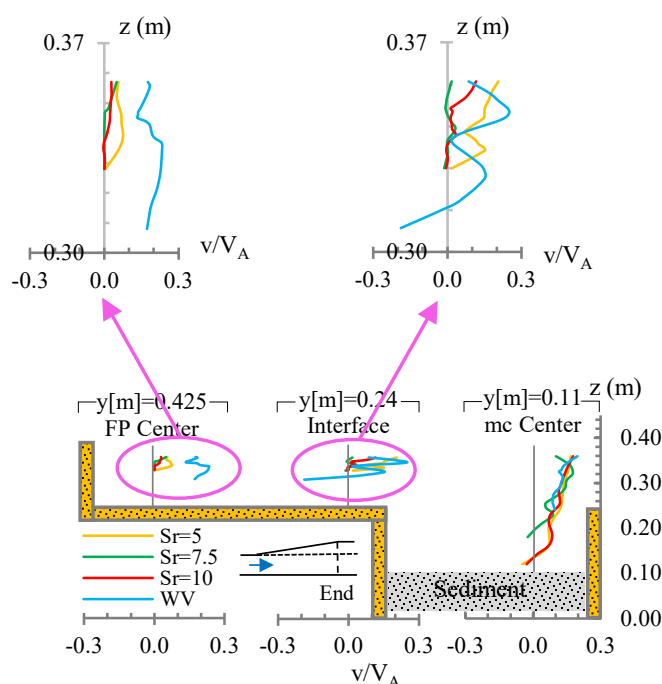


Fig. 8 Depth profile of transverse component of flow velocity (v), D-5.7°-Sr-0.35- WV: Without vegetation
 شکل ۸ نیمرخ عمقی مؤلفه عرضی سرعت جریان (v), D-5.7°-Sr-0.35- WV: بدون پوشش گیاهی

به طوری که با حرکت به سمت مرکز سیلابدشت می‌توان از مؤلفه عمودی سرعت جریان صرفنظر کرد.

۳-۳- جریان ثانویه

تغییرپذیری جریان ثانویه در آبراهه مرکب واگرا در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در شرایط جریان بدون پوشش گیاهی، جریان‌های ثانویه قوی در ناحیه سیلابدشت و آبراهه اصلی مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، حرکت عرضی جریان از آبراهه اصلی به سمت سیلابدشت مشهود می‌باشد. در حالی که حضور پوشش گیاهی موجب تشکیل

شکل ۹ نشان می‌دهد که در آبراهه مرکب بدون پوشش گیاهی میزان سرعت عمودی جریان از بستر آبراهه اصلی تا سطح آب مثبت می‌باشد. در حالی که در مرکز سیلابدشت میزان سرعت منفی بوده و در صفحه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت علامت مؤلفه عمودی سرعت در عمق جریان متغیر می‌باشد. با حضور پوشش گیاهی علفزار و درختان در محدوده سیلابدشت واگرا، میزان های مؤلفه قائم سرعت در مرکز آبراهه اصلی منفی بوده و با نزدیک شدن به ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت نشانه سرعت عمودی جریان مثبت می‌شود

و سیلابدشت در تراکم پوشش گیاهی بالاتر بیشتر می‌باشد. در نتیجه به منظور طراحی سازه‌های در مسیر مقطع‌های مرکب باید افزایش نیروهای وارد به سازه ناشی از گردایان سرعت در محل اتصال آبراهه اصلی به سیلابدشت با ضریب اطمینان بالاتری برآورد شود. همچنین موضوع افزایش رسوبگذاری در ناحیه سیلابدشت نیز باید در تصمیم‌گیری‌ها مورد توجه قرار گیرد.

جریان‌های ثانویه بسیار ضعیف در ناحیه سیلابدشت به ویژه در محدوده انتهای واگرایی شده است. همچنین، افزایش تراکم پوشش گیاهی باعث شده است که در ناحیه آبراهه اصلی نیز از قدرت گردابه‌ها کاسته شود. این موضوع توقف انتقال اندازه حرکت از آبراهه اصلی به سیلابدشت را در پی خواهد داشت. زیرا پوشش گیاهی سیلابدشت بازدارنده انتقال عرضی جریان در این ناحیه خواهد شد. در نتیجه، گردایان سرعت در ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی

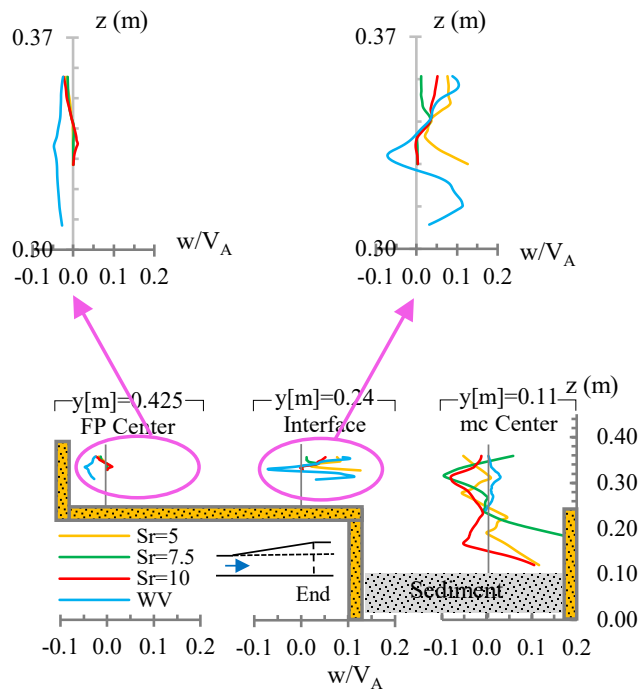


Fig. 9 The depth profile of the vertical component of the flow velocity (w), D-5.7°-Sr-0.35- WV: Without vegetation

شکل ۹ نیمرخ عمقی مؤلفه عمقی سرعت جریان (w), D-5.7°-Sr-0.35: WV بدون پوشش گیاهی

به سمت انتهای واگرایی سرعت جریان یکنواخت‌تر می‌شود.

در شکل ۱۲ جهت و شدت جریان‌های ثانویه در آبراهه مرکب واگرا با و بدون پوشش گیاهی سیلابدشت نمایش داده شده است. در مقطع مرکب بدون پوشش گیاهی شدت جریان‌های ثانویه در آبراهه اصلی و سیلابدشت قوی بوده و آشکارا مشخص است که حرکت جریان به کلی از سمت آبراهه اصلی به سیلابدشت می‌باشد. در حقیقت، حرکت جریان از بستر آبراهه اصلی رو به بالا و به سمت سیلابدشت می‌باشد.

حضور پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت موجب تضعیف

به منظور درک بهتر از جریان‌های ثانویه تشکیل شده در آبراهه مرکب واگرا، گردایان عرضی آن در شکل ۱۱ بررسی شده است. این شکل نشان می‌دهد که بیشترین اثر جریان ثانویه در ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت بوده به طوری که افزایش تراکم پوشش گیاهی تشکیل لایه برشی قوی‌تر را در این ناحیه تأیید می‌کند. در حقیقت گردایان عرضی بیشتر جریان ثانویه در ناحیه لایه برشی نشان دهنده مقاومت بیشتر این ناحیه در برابر جریان نسبت به بستر آبراهه و دیواره‌های جانبی می‌باشد. از سوی دیگر، گردایان جریان ثانویه در میانه واگرایی بیشتر از محدوده انتهایی آن است زیرا با حرکت

Samadi Rahim et al. و Hamidifar et al. (2016)
(2023) هم‌خوانی دارد.

جریان‌های ثانویه در این ناحیه می‌شود. این نتایج بخوبی با
بررسی‌های محققانی همچون Yang et al. (2007).

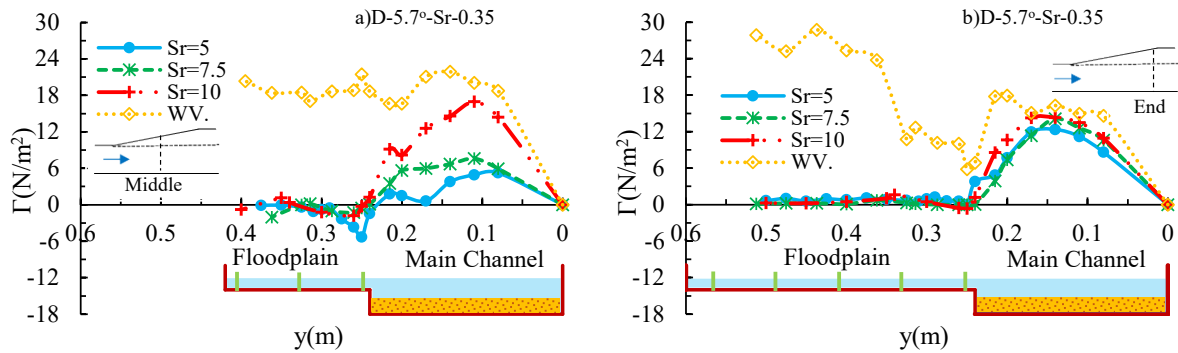


Fig. 10 Transverse distribution of secondary current D-5.7°-Sr-0.35, a) middle of divergence, b) end of divergence

شکل ۱۰ توزیع عرضی جریان ثانویه D-5.7°-Sr-0.35، (a) میانه واگرایی، (b) انتهای واگرایی

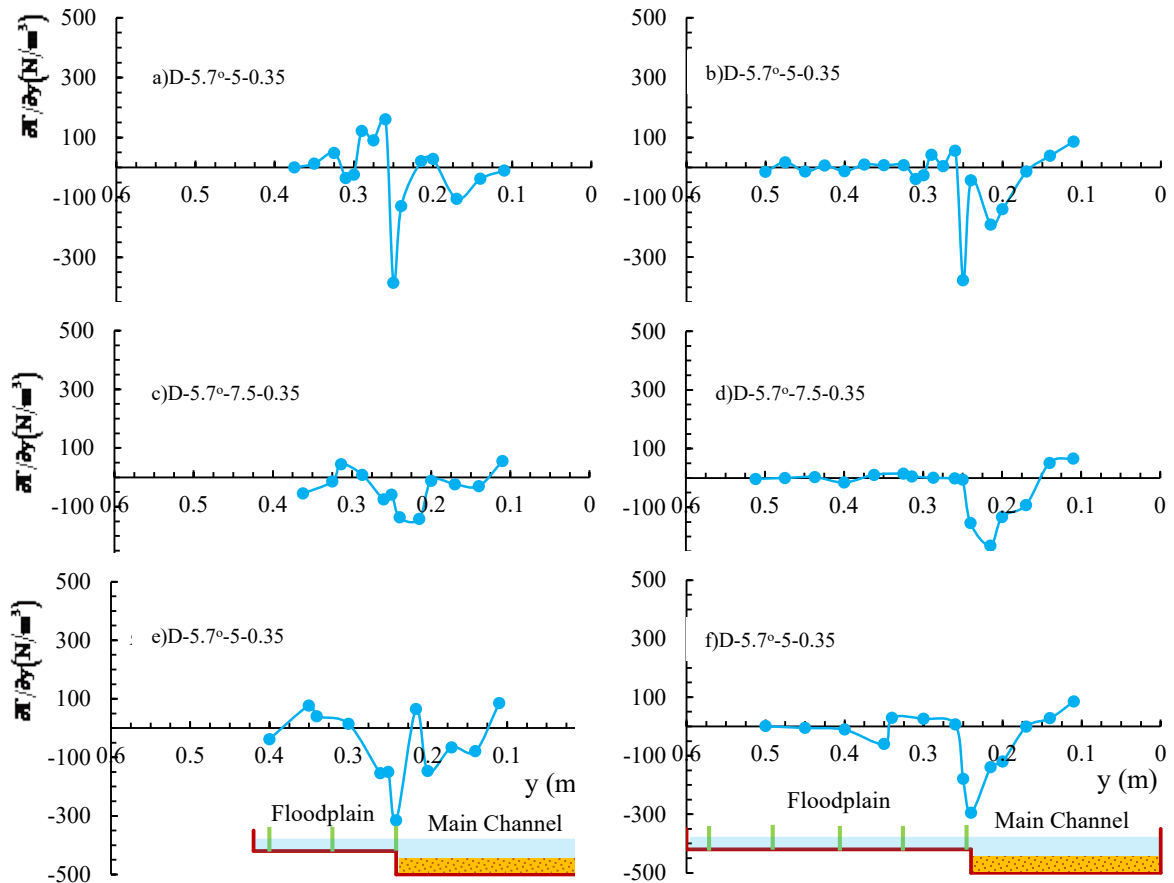


Fig. 11 Lateral gradient of secondary current in different densities of vegetation, $\theta=5.7^\circ$, $Dr=0.35$ - b,d,f): end of divergence, a,c,e): middle of divergence

شکل ۱۱ گرادیان عرضی جریان ثانویه در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، $\theta=5.7^\circ$, $Dr=0.35$: (f, d, b - انتهای واگرایی، (e, c, a - میانه واگرایی)

میانه واگرایی به دلیل تشکیل تاج تلماسه در این ناحیه،
حرکت رو به پایین جریان موجب تشکیل یک گردابه به

همچنین، جهت حرکت گردابه‌ها پیوسته در حال تغییر
می‌باشد و جریان دارای پیچیدگی بالایی است. اگرچه در

زیرا آنان در تحقیقات خود مشاهده کردند که تنها یک جریان پادساعتگرد در محدوده آبراهه اصلی تشکیل می‌شود. افزون بر این، اثر دیواره جانبی مشترک در نزدیکی بستر آبراهه اصلی موجب تشکیل یک گردابه پادساعتگرد ضعیف در این ناحیه می‌شود و در ترازوی بالاتر از ارتفاع لبریزی گردابه‌ای ساعتگرد که به نسبت قوی می‌باشد تشکیل می‌شود. این موضوع به چگونگی تشکیل شکل بستر در آبراهه اصلی مرتبط می‌باشد.

نسبت قوی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت شده است. بنابراین، در بستر آبراهه اصلی و نزدیک به دیواره جانبی مشترک فرسایش موضعی مشاهده می‌شود و در سمت دیگر به ارتفاع تلماسه افزوده می‌شود. در حالی که در ناحیه آبراهه اصلی دو گردابه در خلاف جهت یکدیگر وجود دارد. این موضوع بخوبی اختلاف تشکیل جریان‌های ثانویه در این تحقیق را با تحقیقات Shamsavari et al. (2020) و Samadi Rahim et al. (2023) نمایان می‌سازد.

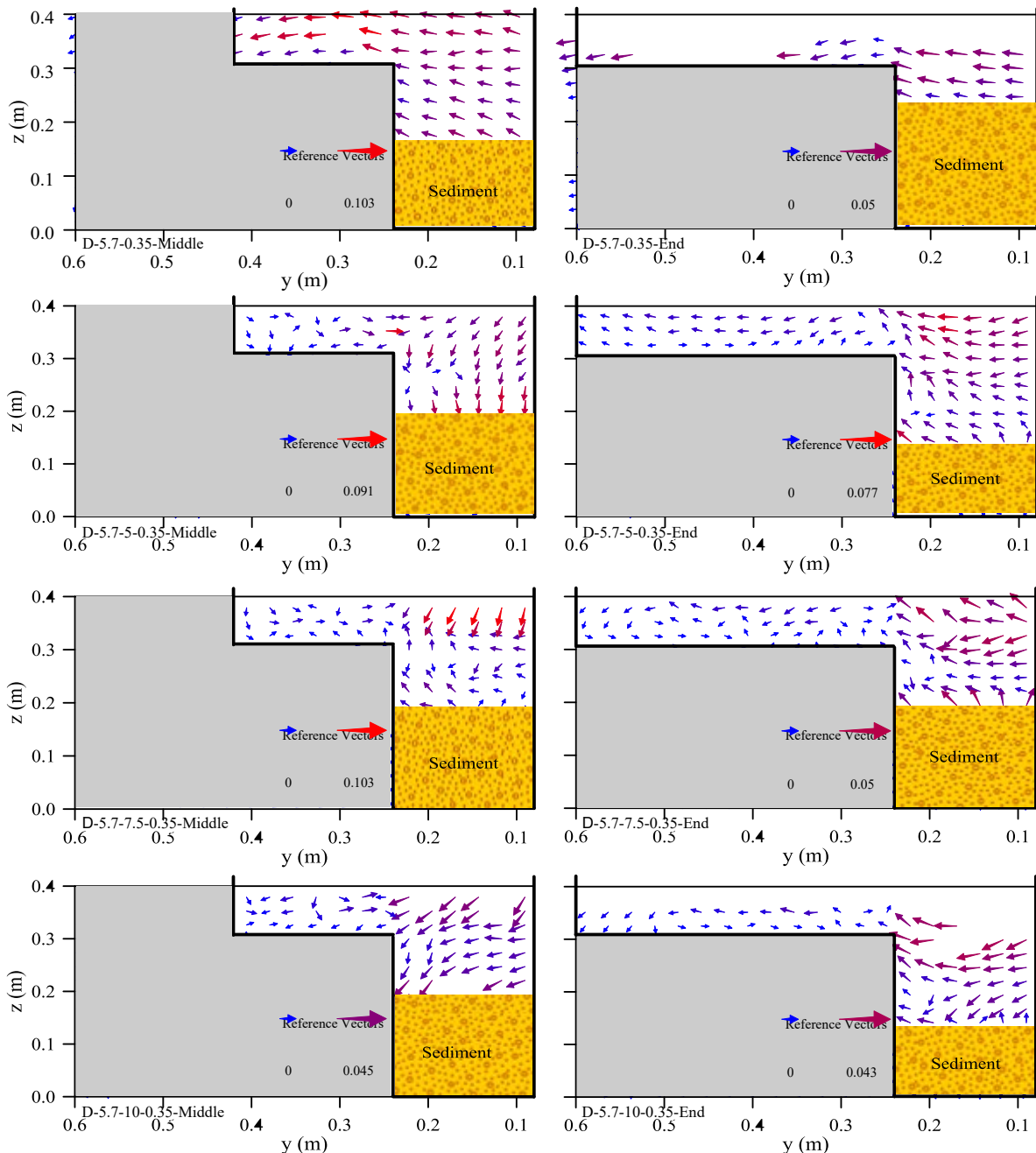


Fig. 12 Secondary current vectors in divergent compound section with and without vegetation, $\theta=5.7^\circ$, $Dr=0.35$

شکل ۱۲ بردارهای جریان ثانویه در مقطع مرکب واگرا با و بدون پوشش گیاهی، $\theta=5.7^\circ$ ، $Dr=0.35$

۴- نتیجه گیری

باتوجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی ساختار جریان و ارزیابی چگونگی تشکیل جریان‌های ثانویه ناشی از حضور پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر در آبراهه‌های مرکب واگرا با بستر متحرک می‌باشد، نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که:

- حضور پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر در سیلابدشت موجب افزایش مؤلفه طولی سرعت جریان در مقایسه با شرایط بدون پوشش گیاهی در طول آبراهه اصلی و کاهش شدید آن در سیلابدشت می‌شود، که به دنبال آن گرادیان شدید سرعت در ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت رخ می‌دهد. این اثر به‌نام پدیده کلون-هلمهولتز شناخته شده که موجب تشکیل لایه برشی آزاد در ناحیه مشترک می‌شود. همچنین، تشکیل نقطه‌هایی با سرعت نزدیک به صفر بر روی سیلابدشت‌ها، وجود مقاومت بیش از اندازه پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر و صلب را نسبت به تحقیقات گذشته نمایان می‌سازد.

- پوشش گیاهی سیلابدشت موجب کاهش شدید سرعت عرضی جریان در این ناحیه شده و مثبت و منفی شدن تناوبی میزان سرعت‌های عرضی جریان در محدوده سیلابدشت، نشان دهنده تداخل خیابان‌های گردابه فن-کارمن در فضای بین دو عنصر پوشش گیاهی می‌باشد.

- به دلیل وجود پوشش گیاهی سیلابدشت می‌توان از تغییرپذیری مؤلفه قائم سرعت در این ناحیه صرف‌نظر کرد، اما بایستی به اثر تغییرپذیری تناوبی سرعت قائم جریان در بین عنصرهای صلب توجه کرد.

- با وجود پوشش گیاهی علفزار در بستر سیلابدشت، می‌توان جریان گذرنده از سیلابدشت را به دو بخش جداگانه تقسیم کرد: ۱- جریان درون پوشش گیاهی علفزار و ۲- جریان گذرنده از بالای پوشش گیاهی علفزار. میزان مؤلفه طولی سرعت جریان در محدوده نزدیک به بستر سیلابدشت نزدیک به صفر بوده و حتی برگشت جریان (سرعت منفی) نیز در این منطقه مشاهده شد. در نتیجه تفاوت سرعت در ناحیه نزدیک به بستر سیلابدشت (سرعت منفی) و منطقه بالاتر (سرعت مثبت) موجب ناپایداری کلون-هلمهولتز و ایجاد یک لایه برشی با محور

عرضی در فضای بالای پوشش گیاهی علفزار می‌شود. - پوشش گیاهی علفزار در بستر سیلابدشت موجب شده است که تنش برشی بستر عامل مؤثری در شکل نیمرخ سرعت در ناحیه‌های نزدیک به بستر باشد. در حالی که با بیشتر شدن فاصله از بستر سیلابدشت، نیروی کشانه ناشی از درختان غالب شده و سهم زبری بستر در مهار جریان کاهش می‌یابد. حتی در ناحیه‌های نزدیک به سطح آزاد نیز مقاومت جریان ناشی از نیروی کشانه کاهش می‌یابد. بنابراین، نیمرخ سرعت در سیلابدشت تاحدودی شکل S به خود می‌گیرد که بخوبی با نتایج به‌دست آمده از دیگر تحقیقات همخوانی دارد.

- در آبراهه مرکب واگرا بدون پوشش گیاهی، جریان‌های ثانویه قوی در ناحیه سیلابدشت و آبراهه اصلی مشاهده شد و حرکت عرضی جریان از آبراهه اصلی به سمت سیلابدشت مشهود می‌باشد. در حالی که در آبراهه مرکب واگرا با سیلابدشت پوشیده از گیاه جریان‌های ثانویه بسیار ضعیف در ناحیه سیلابدشت به ویژه در محدوده انتهای واگرایی تشکیل می‌شود.

- در مقطع‌های مرکب غیرمنشوری با پوشش گیاهی، در ناحیه آبراهه اصلی دو گردابه در خلاف جهت یکدیگر وجود دارد. اثر دیواره جانبی مشترک در نزدیکی بستر آبراهه اصلی موجب تشکیل یک گردابه پادساعتگرد ضعیف در این ناحیه می‌شود و در تراز بالتر از ارتفاع لبریزی گردابه‌ای ساعتگرد و به نسبت قوی تشکیل می‌شود. این موضوع به چگونگی تشکیل شکل بستر در آبراهه اصلی بستگی دارد.

۵- فهرست نشانه‌ها

b	عرض محدوده پوشیده از عنصر (m)
B_{mc}	عرض آبراهه اصلی (m)
D	قطر استوانه (m)
Dr	عمق نسبی جریان
D_{50}	قطر میانه رسوب‌ها (mm)
H	عمق جریان (m)
h	عمق لبریزی (m)
h_s	ارتفاع رسوب‌ها (m)
l_x	فاصله بین ردیف‌ها (m)

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.

Maturi, F., Behdarvandi Askar, M., Ansari Ghojghar, M. & Parsi, E. (2021). Experimental Study of the Effect of non-Submerged Rigid Vegetation on Flow Force in Symmetrical Rectangular Compound Channel by Direct Measurement Method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 439-450. (In Persian)

Mohseni, M. & Tavakoli Nezhad Allah Abadi, F. (2020). Experimental Study of Vertical velocity profiles in compound channels with vegetation on floodplains. *Journal of Hydraulics*, 15(4), 31-45. (In Persian)

Mulahasan, S., Stoesser, T. & McSherry, R. (2017). Effect of floodplain obstructions on the discharge conveyance capacity of compound channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(11), 04017045, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001240).

Rezaei, B. & Knight, D.W. (2009). Application of the Shiono and Knight Method in compound channels with non-prismatic floodplains. *Journal of hydraulic Research (IAHR)*, 47(6), 716-726.

Samadi Rahim, A., Yonesi, H.A., Rahimi, H.R., Shahinejad, B., Podeh, H.T. & Azamattulla, H.M. (2023). Effect of vegetation on flow hydraulics in compound open channels with non-prismatic floodplains. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(5), 781-797.

Samadi Rahim, A., Yonesi, H.A., Shahinejad, B., Podeh, H.T. & Azamattulla, H. M. (2022). Flow structures in asymmetric compound channels with emergent vegetation on divergent floodplain. *Acta Geophysica*, 70(5), 2403-2421.

Samadi Rahim, A., Yonesi, H., Shahinejad, B. & Torabi Podeh, H. (2021). Experimental investigation of floodplain vegetation density effect on flow hydraulic in divergent compound channels. *Journal of Hydraulics*, 16(1), 111-130. (In Persian)

Sanjou, M. & Nezu, I. (2011). Turbulence structure and concentration exchange property in compound open-channel flows with emergent trees on the floodplain edge. *International Journal of River Basin Management*, 9(3-4), 181-193.

Sanjou, M., Nezu, I., Suzuki, S. & Itai, K. (2010). Turbulence structure of compound open-channel flows with one-line emergent vegetation. *Journal of Hydrodynamics*, 22(1), 560-564.

l_y	فاصله بین عنصرها (m)
j	شماره پنل
S_o	شیب کف آبراهه
Sr	نسبت فاصله
u	سرعت موضعی جریان ($m.s^{-1}$)
U	سرعت میانگین جریان در جهت طولی ($m.s^{-1}$)
V_A	سرعت میانگین مقطع عرضی ($m.s^{-1}$)
w	سرعت موضعی جریان در جهت قائم ($m.s^{-1}$)
v	سرعت موضعی جریان در جهت عرضی ($m.s^{-1}$)
V	سرعت میانگین جریان در جهت عرضی ($m.s^{-1}$)
y_f	عمق جریان بر روی سیلابدشت (m)
z	جهت قائم بر جریان (m)
Γ	ترم جریان ثانویه
ρ	چگالی آب ($kg.m^{-3}$)
θ	زاویه واگرایی

۶- منبع ها

Ackers, P. (1993). Flow Formulae for straight two-stage channels. *Journal of Hydraulic Research*, 31(4), 509-531.

Barrios-Piña, H., Ramírez-León, H., Rodríguez-Cuevas, C. & Couder-Castañeda, C. (2014). Multilayer numerical modeling of flows through vegetation using a mixing-length turbulence model. *Water*, 6(7), 2084-2103.

Cheng, N.S. & Nguyen, H.T. (2011). Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 995-1004.

Devi, K. & Khatua, K.K. (2016). Prediction of depth averaged velocity and boundary shear distribution of a compound channel based on the mixing layer theory. *Flow Measurement and Instrumentation*, 50, 147-157.

Ghisalberti, M. & Nepf, H.M. (2006). The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies. *Environmental Fluid Mechanics*, 6(3), 277-301.

Hamidifar, H., Omid, M.H. & Keshavarzi, A. (2016). Kinetic energy and momentum correction coefficients in straight compound channels with vegetated floodplain. *Journal of Hydrology*, 537, 10-17.

- Yang, K., Cao, S. & Knight, D.W. (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 148-159.
- Yang, K., Nie, R., Liu, X. & Cao, S. (2013). Modeling depth-averaged velocity and boundary shear stress in rectangular compound channels with secondary flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(1), 76-83.
- Yonesi, H.A., Omid, M.H., & Ayyoubzadeh, S.A. (2019). Investigation of hydraulic flow and sediment transport in Non-prismatic compound channels. *Journal of Hydraulics*, 14(2), 89-104. (In Persian)
- Zdravkovich, M.M. (1977). Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements. *Journal of Fluids Engineering*, 99, 618-633
- Zdravkovich, M.M. (1987). The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and Structures*, 1(2), 239-261.
- Schlichting, H. & Gersten, K. (1968). *Boundary Layer Theory*. McGraw Hill Book Co., New York.
- Shahsavari, H., Khodashenas, S.R. & Esmaili, K. (2020). Investigating the effect of rigid non-submerged artificial vegetation on flow characteristics in Compound Meander Channel. *Journal of Hydraulics*, 15(2), 131-147. (In Persian)
- Shiono K. & Knight, D.W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *J Fluid Mech*, 222, 617-646.
- Stephenson, D. & Kolovopoulos, P. (1990). Effects of momentum transfer in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(12), 1512-1522.
- 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.
- Terrier, B. (2010). Flow characteristics in straight compound channels with vegetation along the main channel, Doctoral dissertation, Loughborough University.
- Terrier, B., Robinson, S., Shiono, K., Paquier, A. & Ishigaki, T. (2010). Influence of vegetation to boundary shear stress in open channel for overbank flow. *River Flow 2010*, 285-292.
- Vojoudi Mehrabani, F., Mohammadi, M., Ayyoubzadeh, S.A., Fernandes, J. & Ferreira, R. (2020). Flow behavior in Non-Prismatic Convergent Compound Channel with Submerged Vegetation on Floodplains. *Journal of Hydraulics*, 15(1), 97-111. (In Persian)
- Wang, W.J., Peng, W.Q., Huai, W.X., Katul, G.G., Liu, X.B., Qu, X.D. & Dong, F. (2019). Friction factor for turbulent open channel flow covered by vegetation. *Scientific Reports*, 9(1), 5178, doi: 10.1038/s41598-019-41477-7.
- Watanabe, T. & Kondo, J. (1990). The influence of canopy structure and density upon the mixing length within and above vegetation. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 68(2), 227-235.



© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original

