

Experimental Investigation of Floodplain Vegetation Density Effect on Flow Hydraulic in Divergent Compound Channels


Ali Samadi Rahim^{1*}, Hojjatallah Younesi², Babak Shahinezhad², Hassan Torabi Poodeh³

1- PhD student in Hydraulic Structures, Lorestan University, Lorestan, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran.

3- Associate Professor, Faculty of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran.

* yonesi.h@lu.ac.ir

Received: 7 January 2021, Accepted: 21 January 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The velocity difference in the main channel with higher velocity and floodplain with lower velocity creates a strong shear layer in their junction, causing the production of additional turbulence structures, especially large-scale vertical vortices in this interface. In addition, because of turbulence anisotropy in the bottom and wall of the channel, secondary currents occur around the longitudinal axis and in a spiral shape. On the other hand, in most cases, due to the existence of vegetation on floodplains, investigation of the flow mechanism is far more complicated. There are usually three methods to explain the flow field and shear stress with the existence of vegetation on floodplains: 1) field measurements, 2) hydraulic models, and 3) analytical and numerical models. In natural rivers, since the flow cross-section changes along the river and the cross-section shape changes from prismatic to non-prismatic, with these conditions causing more mass and momentum exchange from the floodplain to the main channel and vice versa. This study has explored the effects of divergence angle and vegetation density on the flow structures in a non-prismatic compound channel.

Methodology: The experiments of this study were performed in an asymmetric compound channel made of Plexiglas with a length of 12 m, width of 0.6 m with a bed slope (S_o) of 0.88×10^{-3} . In order to model the vegetation on the floodplain, rigid cylindrical plastic rods with a diameter of (D) 10 mm were used. The spacing ratio ($S_r = l_y / D$) for the three vegetation densities will be equal to 5, 7.5, and 10. Three divergence angles (θ) equal to 3.8, 5.7, and 11.3° were created on the floodplain. Due to the formation of non-uniform flow in non-prismatic sections, the relative depths ($D_r = y_f / H$) of 0.15, 0.25, 0.35, and 0.45 were set in the middle of the divergence region for all experiments. The longitudinal, transverse, and vertical components of the instantaneous flow velocity were measured by a 3D Vectrino profiler velocimeter at three sections: entrance, middle, and end of the divergence region. Using the transverse distribution of depth-averaged velocity, contribution of each section to the conveyance capacity was calculated. Due to the interaction between the rods, the flow structures are very different from the behavior of a single rod; thus, this should be considered in calculating the drag coefficient of an element set on the floodplain. For determine f , the Keulegan (1938) equation for smooth surfaces was modified. Jafari et al. (2011) proposed the an equation to calculate Strouhal number in a row arrangement.

Results and discussion: Because of outbreak the Kelvin–Helmholtz instability due to the existence of vegetation on the floodplain, in the interface between the main channel and the

floodplain, coherent vortices and intense momentum exchange were formed from the main channel to the floodplain. Since the flow momentum prepared a shear layer around the vegetation stems, which causes inflection points in the velocity profile, which is consistent with Sanjou et al. (2010), Mulahasan et al. (2017), and Ahmad et al. (2020) results. At $Sr = 7.5$, the distance of the elements well forms Von Kàrmàn vortex streets and increases the flow resistance. At all relative depths, increasing vegetation density has reduced the U_{fp} / U_{mc} ratio. The discharge rate through floodplain with vegetation has reduced by an average of 58.6 and 69.3% compared to non-prismatic channel without vegetation in the middle and end of the divergence reach, respectively. The results indicate that with increasing Dr , zonal roughness coefficient in the floodplain has increased nonlinearly and is linear in the main channel. This result is consistent with the Musleh and Cruise (2006) research. Drag coefficient has decreased nonlinearly with increasing the rod Reynolds number. In addition, it can be found that the drag coefficient caused by floodplain vegetation is directly related to the vegetation density. The results show that with increasing the vegetation density from $Sr = 10$ to $Sr = 5$ on the floodplain in the middle and end of the divergence, the bed shear stress has decreased by 44.2 and 54.6%, respectively. The vortex frequency is a linear function of Re_{rod} and the increasing rate of vortex frequency versus Re_{rod} in the middle of the divergence is higher than the end. In the zone close to the vertical interface between the main channel and the floodplain, the secondary currents have suddenly reached their maximum and minimum values.

Conclusion: The results showed that with emergent vegetation, Kelvin-Helmholtz instability caused the generation of primitive Von Kàrmàn vortex streets in downstream of the elements. The existence of vegetation in the floodplain caused a sharp reduction in the bed shear stress in this region and increased it in the main channel. As the vegetation density increased, so did the drag coefficient and flow friction factor significantly. The flow passing through the vegetation was controlled by coherent vortices whose maximum size was in the interface between the main channel and the floodplain.

Keywords: Divergent floodplains, rigid elements, drag force, rod Reynolds number, momentum exchange.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, 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/>)

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر پوشش گیاهی سیلابدشت بر روی هیدرولیک جریان در آبراهه‌های مرکب واگرا

علی صمدی رحیم^۱، حجت الله یونسی^{۲*}، بابک شاهی نژاد^۲، حسن ترابی پوده^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه لرستان.

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان

* yonesi.h@lu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۲ ☞ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: این تحقیق، به بررسی فراسنجه‌های جریان و آشفتگی در یک آبراهه مرکب غیرمنشوری نامتقارن با تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی صلب در سیلابدشت واگرا پرداخته است. آزمایش‌ها در شرایط پوشش گیاهی غیرمستغرق و با سه نسبت فاصله ۵، ۷/۵ و ۱۰ انجام شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سرعت جریان در سیلابدشت با پوشش گیاهی در مقایسه با حالت بدون پوشش به ترتیب در منطقه میانی و انتهای محدوده واگرایی به طور میانگین در حدود ۶۰ و ۶۹ درصد کاهش می‌یابد. تنش برشی بستر نیز بدلیل مقاومت اضافی در برابر جریان ناشی از حضور پوشش گیاهی کاهش چشمگیری در ناحیه سیلابدشت نشان می‌دهد که برای منطقه میانی و انتهای واگرایی به ترتیب برابر با ۷۸/۵ و ۸۶ درصد می‌باشد. همچنین تولید و استهلاک تنش‌های برشی رینولدزی و لایه برشی تشکیل شده به تناوب گردابه‌ای تشکیل شده در پشت هر میله منفرد بستگی داشته و بسیار ناپایدار می‌باشد. در انتها رابطه‌ای برای برآورد میزان ضریب اصطکاک بر مبنای عدد رینولدز میله ارائه شد و برای محاسبه بسامد گردابه‌های تشکیل شده در پشت المان‌های موجود بر روی سیلابدشت و ضریب کشانه موضعی نیز رابطه‌هایی پیشنهاد شده است.

کلید واژگان: سیلابدشت واگرا، المان صلب، نیروی کشانه، عدد رینولدز میله، تبادل مومنوم.

۱- مقدمه

اصلی و سیلابدشت‌های مجاور می‌شود. افزون بر این، به دلیل ناهمسانی آشفتگی در کف و دیواره آبراهه، جریان‌های ثانویه نیز حول محور طولی و به صورت حلزونی شکل به وجود می‌آیند (Shiono and Knight, 1991). (Knight and Shiono, 1990) مدل شیونو و نایت^۱ را برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت میانگین-عمقی و تنش برشی مرزی در آبراهه‌های مرکب منشوری با جریان دائمی-یکنواخت ارائه کردند.

در رودخانه‌های طبیعی، به دلیل تغییر سطح مقطع جریان در طول مسیر رودخانه، شکل مقطع از منشوری به غیرمنشوری تغییر پیدا کرده و این شرایط باعث انتقال بیشتر جرم و مومنوم از سیلابدشت به سمت آبراهه اصلی و برعکس می‌شود (Bousmar and Zech, 1999; Bousmar et al., 2004; Proust

در هنگام رخداد سیلاب، تراز آب در رودخانه افزایش یافته و جریان از آبراهه اصلی وارد سیلابدشت می‌شود. به دلیل اندرکنش سیلابدشت و آبراهه اصلی، بررسی هیدرولیک جریان در این شرایط دشوار خواهد شد (Sellin, 1964; Knight and Shiono and Knight, 1991; Hamed, 1984). اختلاف سرعت جریان در آبراهه اصلی با سرعت بیشتر و جریان در سیلابدشت با سرعت کمتر، یک لایه برشی قوی در ناحیه اتصال آن‌ها بوجود می‌آورد، که منجر به تولید ساختارهای آشفتگی اضافی بویژه گردابه‌های عمودی بزرگ مقیاس در این ناحیه مشترک می‌شود (Knight and Demetriou, 1983; Knight and Shiono, 1990). عملکرد این گردابه‌ها باعث انتقال مومنوم بین آبراهه

¹ Shiono and Knight Method (SKM)

Piña et al., 2014; Zhang et al., 2017; Koftis and Prinios, 2018). در مدل‌های هیدرولیکی اغلب از میله‌های استوانه‌ای صلب برای مدلسازی پوشش گیاهی از نوع درخت استفاده شده است. در این روش، بر مبنای فاصله بین المان‌های پوشش گیاهی، به طور معمول دو نوع ساختار جریان در پشت المان‌ها تشکیل می‌شود: ۱- مسیر گردابه بزرگ مقیاس فن-کارمن^۱ در پشت توده‌ای از میله‌ها؛ ۲- مسیر گردابه اولیه فن-کارمن^۲ در پشت هر میله منفرد (Takemura and Tanaka, 2007). در مدلسازی تحلیلی و عددی از معادله ناور-استوکس همراه با یک ترم اضافه چاه برای مدلسازی نیروی کشانه ناشی از پوشش گیاهی غیرمستغرق استفاده می‌شود. در این گونه مدل‌ها که توسط Rameshwaran and Shiono (2007), Tang and Knight (2009), Hu et al. (2010), Tang et al. (2011) و Yang et al. (2013) پیشنهاد شده است، در معادله‌های حاکم تأثیر جریان‌های ثانویه و گردابه‌های سطحی بررسی می‌شوند. Rameshwaran and Shiono (2007) یک مدل شبه دوبعدی را برای پیش‌بینی سرعت میانگین-عمقی و تنش برشی مرزی در آبراهه مرکب مستقیم با پوشش گیاهی غیرمستغرق در سیلابدشت ارائه کردند. آن‌ها با اضافه کردن نیروی کشانه و اثر انسداد ناشی از پوشش گیاهی، مدل SKM را اصلاح کردند:

$$\underbrace{\rho \alpha_p \frac{\partial H(UV)_d}{\partial y}}_I = \underbrace{\alpha_p \rho g H S_o}_II + \underbrace{\alpha_p \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho H v_t \frac{\partial U_d}{\partial y} \right)}_III \quad (3)$$

$$- \underbrace{\alpha_p \rho \frac{f}{8} U_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{S^2}}}_IV - \underbrace{\sum \frac{1}{2} \rho (C_D S_F A_p H)_i U_d^2}_V$$

$$\alpha_p = 1 - \sum (N_v A_v)_i \quad (4)$$

که در رابطه (۳)، بخش I جابه‌جایی، بخش II شتاب ثقل، بخش III تنش برشی عرضی، بخش IV تنش برشی بستر و بخش V نیروی کشانه می‌باشد. در رابطه‌های بالا: ρ چگالی آب، α_p تخلخل، H عمق جریان، U و V به ترتیب مؤلفه‌های سرعت میانگین جریان در جهت طولی (x) و جهت عرضی (y) جریان، g شتاب ثقل، S_o شیب کف، v_t میانگین عمقی لزجت گردابه‌ای، U_d سرعت میانگین-عمقی، f ضریب زبری داری-ویسباخ، s شیب جانبی، C_D ضریب کشانه، S_F ضریب سایه، A_p مساحت تصویر شده گیاه i در واحد حجم، N_v متوسط تراکم پوشش

(et al., 2006). آبراهه‌ای را آبراهه مرکب واگرا می‌گویند که هر دو سیلابدشت از آبراهه اصلی (رودخانه) دور شوند (Das et al., 2017). Bousmar and Zech (2004) تأثیر تبادل مومنوم اضافی ناشی از تغییر هندسه سیلابدشت را در مدلسازی جریان به عنوان یک هدررفت اضافی در نظر گرفتند. (Rezaei and Knight (2009), (2011) با جایگزینی شیب خط انرژی (S_e) به جای شیب کف آبراهه (S_o) در مدل SKM قابلیت کاربرد این مدل را در برآورد توزیع سرعت میانگین-عمقی و تنش برشی مرزی در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری بررسی کردند:

$$\rho g H S_e - \frac{1}{8} \rho f U_d^2 \left(1 + \frac{1}{S^2}\right)^{0.5} + \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right\} = \Gamma$$

$$U_d = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} u \cdot dz, \quad \tau_{yx} = \rho \varepsilon_{yx} \frac{\partial U_d}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{yx} = \lambda H U_* U_* = \left(\tau_b / \rho\right)^{0.5}, \quad \tau_b = \frac{f}{8} \rho U_d^2$$

که در رابطه‌های بالا: λ ضریب لزجت گردابه‌ای بدون بعد، u سرعت موضعی جریان، z معرف جهت قائم بر جریان، τ_{yx} تنش برشی رینولدزی میانگین-عمقی، ε_{yx} لزجت گردابه‌ای میانگین-عمقی، U_* سرعت برشی و τ_b تنش برشی بستر می‌باشد. (Yonesi et al. (2013) به بررسی تأثیر زبری سیلابدشت بر هیدرولیک جریان در آبراهه‌های مرکب با سیلابدشت واگرا پرداختند و نتایج خود را با مدل اصلاحی SKM که توسط Rezaei and Knight (2009) پیشنهاد شده است مقایسه کردند.

از سوی دیگر، در بیشتر مواقع به دلیل وجود پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت‌ها بررسی سازوکار جریان بسیار پیچیده‌تر می‌شود. به طور معمول سه شیوه برای تبیین میدان جریان و تنش برشی با حضور پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت‌ها وجود دارد: ۱- اندازه‌گیری‌های میدانی (Västilä et al., 2016), ۲- مدل‌های هیدرولیکی (Pasche and Rouvé, 1985; Sun and Shiono, 2009; Sanjou and Nezu, 2011; Lu and Chen, 2014; Dupuis et al., 2015; Hamidifar et al., 2016; Zhang et al., 2017; Yang and Nepf, 2019; Ahmad et al., 2020) و ۳- مدل‌های تحلیلی و عددی (Jing et al., 2011; Barrios-

² Primitive Von Kàrmàn vortex street (PKV)

¹ Large-scale Von Kàrmàn vortex street (LKV)

۲- مواد و روشها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در یک آبراهه مرکب نامتقارن با سیلابدشت واگرا از جنس پلکسی گلاس به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۶ متر (عرض آبراهه اصلی ۰/۲۴ متر و عرض سیلابدشت ۰/۳۶ متر) و عمق لبریزی (h) ۰/۱۶۷ متر با شیب بستر ۰/۰۰۰۸۸ انجام شد (شکل ۱). در این شکل y_f عمق جریان بر روی سیلابدشت می‌باشد.

برای مدلسازی پوشش گیاهی درخت بر روی سیلابدشت از میله‌های پلاستیکی استوانه‌ای صلب با قطر (D) ۱۰ میلی‌متر

گیاهی i در واحد سطح و A_v متوسط مساحت مقطع عرضی تنه پوشش گیاهی i می‌باشد.

از آنجاکه بررسی و شناسایی الگوی جریان در رودخانه‌های طبیعی همراه با پوشش گیاهی که مقطع آنها دستخوش تغییرپذیری است، برای تحلیل مسائلی همچون انتقال رسوبات، انتشار آلودگی، فرسایش سواحل و ... دارای اهمیت بالایی بوده و این موضوع در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است، در این تحقیق به بررسی تأثیر زاویه واگرایی سیلابدشت و تراکم پوشش گیاهی بر روی هیدرولیک جریان و آشفتگی در محدوده ناحیه واگرایی آبراهه مرکب پرداخته شده است.

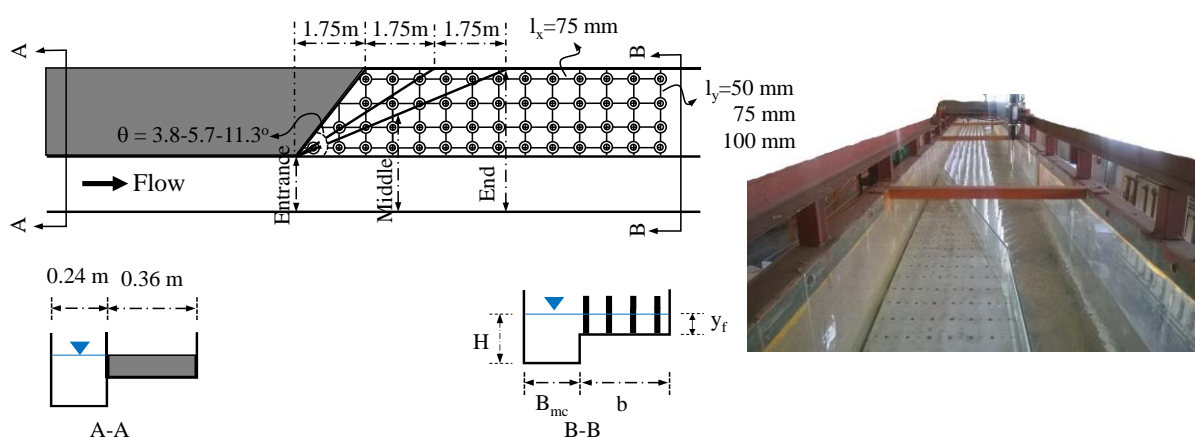


Fig. 1 View of the flume used in this study and arrangement of vegetation elements

شکل ۱ نمای فلوم مورد استفاده در تحقیق و چگونگی چیدمان المان‌های پوشش گیاهی

در قسمت ابتدایی فلوم به طول ۴/۵ متر آبراهه اصلی از سیلابدشت جدا شده و پس از این بخش سه زاویه واگرایی (θ) برابر با ۳/۱، ۷/۵ و ۸/۳ درجه بر روی سیلابدشت ایجاد شد. در شکل ۲ منحنی دبی-اشل مربوط به آزمایش‌های آبراهه مرکب منشوری برای انواع مختلف تراکم پوشش گیاهی نمایش داده شده است که از این منحنی برای تعیین دبی مقاطع غیرمنشوری با پوشش گیاهی نیز استفاده شده است. با توجه به شکل‌گیری جریان غیریکنواخت در مقطع غیرمنشوری، اعماق نسبی این تحقیق در وسط ناحیه واگرایی توسط درجه انتهایی تنظیم شد. در این تحقیق در کل ۶۰ آزمایش انجام شد که خلاصه فراسنجه‌های مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. هر آزمایش با یک کد ویژه نامگذاری شده است که در هر کد: حروف P و NP به ترتیب معرف منشوری و غیرمنشوری بودن

استفاده شد. میله‌ها از بخش ابتدایی ناحیه واگرایی تا انتهای فلوم بر روی سیلابدشت نصب شدند. آرایش پوشش گیاهی به شیوه ردیفی اجرا شد و میله‌ها به صورت منظم پشت سر هم با سه تراکم مختلف قرار گرفتند. به طوری که فاصله بین ردیف‌ها (l_x) ثابت و برابر با ۷۵ میلی‌متر و فاصله میان المان‌ها (l_y) بر مبنای آزمایش‌های Yang et al. (2007) به ترتیب ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. بدین ترتیب نسبت فاصله ($Sr=l_y/D$) برای سه تراکم پوشش گیاهی به ترتیب برابر با ۵، ۷/۵ و ۱۰ به دست خواهد آمد که این اعداد در محدوده مقادیر توصیه شده توسط Terrier et al. (2010) قرار دارند. عمق جریان توسط اندازه‌گیر نقطه‌ای و دبی جریان توسط جریان‌سنج الکترومغناطیسی با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه که بر روی لوله ورودی جریان به فلوم نصب شده بود اندازه‌گیری شد.

که در رابطه بالا ν لزجت جنبشی آب است. دامنه تغییرپذیری عدد رینولدز میله در تحقیق حاضر در محدوده $6500 < Re_{rod} < 34000$ قرار دارد. با توجه به اثر متقابل میله‌ها بر روی یکدیگر،

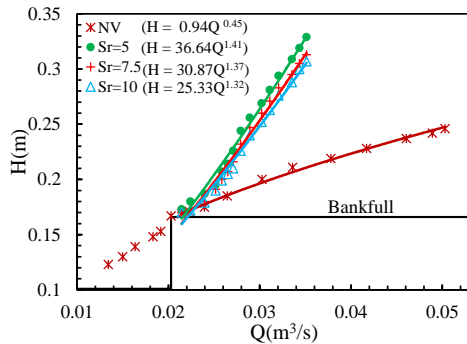


Fig. 2 Stage-discharge curves for prismatic compound channel with different types of vegetation density
شکل ۲ منحنی دبی-اشل برای آبراهه مرکب منشوری با انواع مختلف تراکم پوشش گیاهی

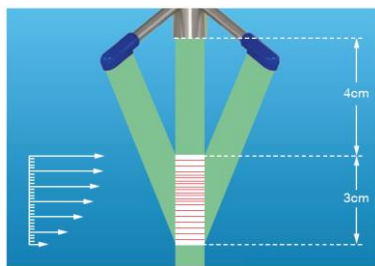


Fig. 3 Depth sampling range by Vectrino profiler velocimeter

شکل ۳ محدوده نمونه‌برداری عمقی توسط سرعت‌سنج وکترینو پروفایلر

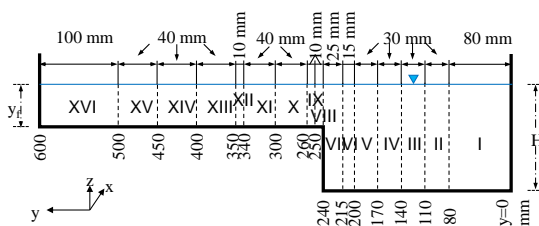


Fig. 4 Data measurement sections

شکل ۴ مقطع‌های اندازه‌گیری سرعت جریان

آبراهه، Sr نسبت فاصله پوشش گیاهی، θ زاویه واگرایی و Dr عمق نسبی جریان می‌باشد.

مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت لحظه‌ای جریان توسط سرعت‌سنج سه‌بعدی وکترینو پروفایلر در سه مقطع ورودی، میانه و انتهای ناحیه واگرایی برداشت شد. این دستگاه در فاصله‌های ۱ میلی‌متری در جهت عمودی پروفیل سرعت جریان را در یک محدوده ۳۰ میلی‌متری به صورت همزمان با حداکثر بسامد ۱۰۰ هرتز برداشت می‌کند (شکل ۳). زمان اندازه‌گیری فراسنجه سرعت در هر مرحله ۱۲۰ ثانیه انتخاب شده و در هر مرحله داده‌برداری ۳۶۰۰۰۰ داده برداشت شد. به منظور حذف داده‌های بدون کیفیت چندین کد در نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شد. اندازه‌گیری سرعت عمقی جریان در آبراهه اصلی در شش مقطع و در سیلابدشت بسته به تراکم پوشش گیاهی در ۹ تا ۱۵ مقطع انجام شده است (شکل ۴).

۲-۲- محاسبه دبی عبوری از هر بخش (Q_c)

با استفاده از توزیع عرضی سرعت میانگین-عمقی، میزان مشارکت هر بخش در انتقال دبی جریان محاسبه شده است. سرعت میانگین-عمقی توسط رابطه (۲) در هر یک از قطعه‌های مشخص شده در شکل ۴ محاسبه و سپس توسط رابطه (۵) دبی جریان در هر یک از آزمایش‌ها برآورد شده است.

$$Q_c = \sum_{j=1}^n (\Delta A)_j (U_d)_j \quad (5)$$

۲-۳- ضریب کشانه (C_D)

بنابر نظریه Schlichting (1968) ضریب کشانه برای یک میله صاف استوانه‌ای در شرایط آزمایشگاهی تابعی از عدد رینولدز میله (Re_{rod}) می‌باشد:

$$Re_{rod} = \frac{U_d D}{\nu} \quad (6)$$

جدول ۱ خلاصه فراسنجه‌های آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

Table 1 Summary of experimental characteristics

Exp. Series	Spacing ratio (Sr)	Q_{Exp} (l/s)	Dr	Diverging angle (θ °)	Reynolds Number $\times 10^5$	Froude Number	Number of Exp.
P-Sr-Dr	5,7.5,10	25-35	0.15-0.25-0.35-0.45	---	1.059-1.773	0.148-0.411	12
NP- θ -Dr	---	25.5-34	0.15,0.25,0.3,5,0.45	3.8,5.7,11.3	1.081-1.797	0.160-0.413	12
NP- θ -Sr-Dr	5,7.5,10	25.25-34.7	0.15,0.25,0.3,5,0.45	3.8,5.7,11.3	1.066-1.768	0.152-0.408	36

۲-۵- ضریب اصطکاک (f)

در شکل ۵ تغییرپذیری ضریب زبری دارسی- ویسباخ در عمق‌های مختلف جریان برای سه نوع تراکم پوشش گیاهی در آبراه مرکب منشوری نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر f در حالت بدون پوشش گیاهی به عمق جریان وابسته نبوده و تقریباً ثابت و برابر با ۰/۰۱۶ می‌باشد، ولی در آزمایش‌های با پوشش گیاهی این فراسنجه به شدت به عمق جریان بستگی داشته و حساسیت کمتری نسبت به درصد تراکم پوشش گیاهی دارد.

به دلیل تشکیل دنباله‌ها در پشت المان‌ها توزیع سرعت از قانون لگاریتمی پیروی نکرده و در نتیجه باعث پیچیدگی بیشتر ساختار جریان می‌شود. بنابراین برای تعیین ضریب زبری دارسی- ویسباخ، رابطه Keulegan (1938) برای سطوح صاف به صورت زیر اصلاح شد:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{\kappa} \log(\text{Re}_{rod} \sqrt{f}) \quad (12)$$

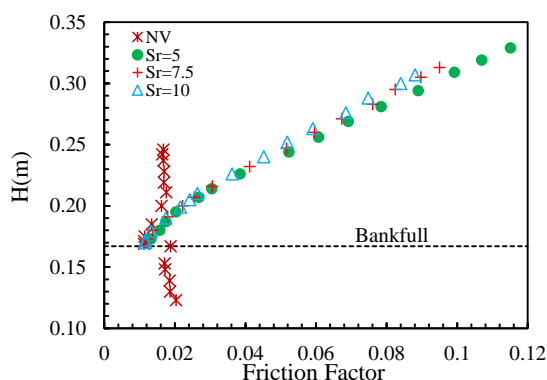


Fig. 5 Variations of global friction factor versus flow depth for prismatic compound channel with and without vegetation on floodplain

شکل ۵ تغییرپذیری ضریب اصطکاک کل در عمق جریان برای آبراه مرکب منشوری با و بدون پوشش گیاهی در سیلابدشت

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع عرضی سرعت جریان

در شکل ۶ تغییرپذیری عرضی سرعت میانگین-عمقی در عمق نسبی ۰/۲۵ و زاویه واگرایی ۵/۷ درجه در میانه و انتهای محدوده وگرایی برای آبراه مرکب غیرمنشوری با و بدون پوشش گیاهی سیلابدشت نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سرعت جریان بر روی سیلابدشت بدلیل وجود پوشش گیاهی و افزایش مقاومت در برابر جریان، به طور قابل ملاحظه‌ای

ساختار جریان تفاوت فاحشی با رفتار میله منفرد دارد و لذا این موضوع باید در محاسبه ضریب کشانه مجموعه‌ای از المان‌های موجود بر سیلابدشت در نظر گرفته شود (Zdravkovich, 1987). (Sonnenwald et al. (2019) و Kothiyari et al. (2009) ضریب کشانه ناشی از پوشش گیاهی را در جریان یکنواخت به ترتیب به صورت زیر ارائه کردند:

$$C_D = 2 \left(\frac{6475 D + 32}{\text{Re}_{rod}} + 17 D + 3.2 \phi + 0.50 \right) \quad (7)$$

$$\phi = \frac{N_v \pi D^2}{4}$$

$$C_D = 1.53 \text{Re}_{rod}^{-3/50} [1 + 0.45 \ln(1 + 100 \phi)] \quad (8)$$

که در رابطه‌های بالا، ϕ کسر حجمی انسداد می‌باشد. در آزمایش‌های این تحقیق میانگین تعداد میله‌ها در واحد سطح (Nv) بسته به نوع آرایش پوشش گیاهی به ترتیب ۱۸۵، ۲۶۰ و ۱۴۵ عدد در واحد مترمربع می‌باشد.

۲-۴- عدد استروهل (St)

عدد استروهل بیانگر اثر تداخل گردابه‌های تشکیل شده در پشت موانع بوده که به صورت ضرب بسامد گردابه (fs) در طول مشخصه مانع (D) بر سرعت میانگین جریان نزدیک شونده (Ua) تعریف می‌گردد:

$$St = \frac{f_s D}{U_a} \quad (9)$$

(Dean and Dalrymple (1984) با استفاده از نظریه امواج کم دامنه، بسامد امواج را به صورت زیر تعریف کردند:

$$f_s = \left(\frac{gn}{4\pi b} \tanh \frac{n\pi H}{b} \right)^{1/2} \quad (10)$$

که در این رابطه n شماره موج تولید شده و b عرض محدوده پوشیده از المان می‌باشد.

(Jafari et al. (2011) در بررسی آزمایشگاهی با استفاده از موانع با قطرهای و فاصله‌های طولی و عرضی مختلف در آرایش ردیفی و زیگزاگی (شطرنجی) ده نوع موج ایجاد شده در آبراه را تشخیص دادند. آنان رابطه زیر را برای محاسبه عدد استروهل در آرایش ردیفی پیشنهاد کردند:

$$St = 7.52 \frac{\left(\frac{D}{l_y}\right)^{0.485} \left(\frac{D}{l_x}\right)^{0.177}}{\text{Re}^{0.151} N^{0.59}} \quad (11)$$

در این رابطه N تعداد موانع در یک ردیف است.

نسبت سرعت میانگین سیلابدشت به آبراهه اصلی در انتهای محدوده واگرایی، به دلیل افزایش تعداد المان‌ها در آن منطقه از میانه واگرایی کمتر است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک تراکم معین، افزایش عمق نسبی جریان موجب کاهش نامحسوس U_{fp}/U_{mc} می‌شود، زیرا با بالآمدن تراز سطح جریان، سطح بیشتری از المان در مقابل جریان آب قرار گرفته و موجب ایجاد مقاومت اضافی در سیلابدشت می‌شود. در حالی که در آبراهه مرکب غیرمنشوری بدون پوشش گیاهی در اعماق نسبی بالاتر سرعت جریان در سیلابدشت افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش زاویه واگرایی در حالت بدون پوشش گیاهی نسبت U_{fp}/U_{mc} به واحد نزدیک‌تر می‌شود. در صورتی که در حضور پوشش گیاهی این نسبت کاهش می‌یابد، زیرا با کاهش زاویه واگرایی سیلابدشت تعداد المان‌های بیشتری در برابر جریان آب قرار گرفته و موجب افزایش مقاومت در برابر جریان می‌شوند.

۳-۲- مشارکت سیلابدشت در انتقال دبی جریان

در شکل ۸ چگونگی تقسیم دبی جریان عبوری از آبراهه اصلی و سیلابدشت برای آبراهه مرکب غیرمنشوری با و بدون پوشش گیاهی نمایش داده شده است. در محدوده تراکم‌های مورد استفاده در این تحقیق، میزان دبی عبوری از آبراهه اصلی و سیلابدشت چندان تحت تأثیر تراکم پوشش گیاهی و عمق نسبی جریان نمی‌باشد. به روشنی می‌توان مشاهده کرد که مقاومت جریان ناشی از حضور پوشش گیاهی موجب کاهش شدید دبی عبوری از سیلابدشت و مشارکت ناچیز آن در انتقال دبی جریان می‌شود. میزان جریان عبوری از سیلابدشت با پوشش گیاهی در مقایسه با آبراهه غیرمنشوری بدون پوشش گیاهی در میانه و انتهای محدوده واگرایی به ترتیب به طور متوسط $۵۸/۶$ و $۶۹/۳$ درصد کاهش داشته است.

۳-۳- مقاومت در برابر جریان

برای به دست آوردن ضریب اصطکاک موضعی در مقطع عرضی جریان از رابطه (۱۲) استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی رابطه پیشنهادی، داده‌های آزمایشگاهی (Pasche (1984) به کار گرفته شده است. (Tang et al. (2011) از رابطه کلبروک- وایت اصلاح شده که توسط (Rameshwaran and Shiono (2007)

کاهش و در نتیجه گرادیان سرعت در محدوده اتصال آبراهه اصلی و سیلابدشت افزایش می‌یابد. بدلیل بروز پدیده ناپایداری کلوین-هلمهولتز ناشی از حضور پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت، در صفحه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت گردابه‌های منسجم و تبادل مومنوم قوی‌تری از آبراهه اصلی به سمت سیلابدشت شکل می‌گیرد.

در نتیجه تغییر اندازه حرکت جریان، حول تنه پوشش گیاهی یک لایه برشی تشکیل شده که موجب ایجاد نقاط انحناء در پروفیل سرعت می‌گردد. این امر دلیل اصلی اختلاف سرعت جریان بین این ناحیه‌ها بوده که باعث افزایش میزان سرعت در ناحیه بدون پوشش نسبت به ناحیه دارای پوشش گیاهی می‌شود. در حقیقت توزیع سرعت V شکل در پشت المان‌های پوشش گیاهی ناشی از تغییر اندازه حرکت خطی بین المان‌های پوشش گیاهی بوده که با نتایج (Sanjou et al. (2010) و (Mulahasan et al. (2017) و (Ahmad et al. (2020) همخوانی دارد. این موضوع در نسبت فاصله $۷/۵$ به روشنی قابل مشاهده است. در این شرایط، فاصله المان‌ها بخوبی موجب تشکیل مسیر گردابه فن-کارمن و افزایش مقاومت در برابر جریان می‌شود. با نزدیک شدن به دیواره سیلابدشت و افزایش تعداد المان‌های مشارکت کننده در برابر جریان، از اختلاف سرعت میان فضای بین المان‌ها و درست پشت آنها کاسته می‌شود.

در پوشش گیاهی متراکم ($Str = ۵$)، جدایی جریان کندتر رخ داده و ناحیه چرخشی پشت میله بسیار کوچک است. در این حالت به دلیل کمتر شدن فاصله میان المان‌ها، مسیر گردابه تشکیل شده در پشت آن‌ها با یکدیگر تداخل داشته و باعث تضعیف حرکت سینوسی مقادیر سرعت جریان می‌شود. همچنین سرعت جریان در وسط محدوده واگرایی در مقایسه با انتهای محدوده واگرایی، بدلیل کاهش سطح مقطع جریان و تعداد المان‌های کمتر پوشش گیاهی در آن منطقه بیشتر بوده، در حالی که از الگوی یکسانی پیروی می‌کند.

شکل ۷ میزان نسبت سرعت میانگین جریان در سیلابدشت به آبراهه اصلی را برای حالت با پوشش گیاهی و بدون پوشش در طول محدوده واگرایی نشان می‌دهد. در کل اعماق نسبی جریان، افزایش تراکم پوشش گیاهی موجب کاهش نسبت U_{fp}/U_{mc} در نتیجه افزایش اختلاف سرعت در ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت می‌شود. به ازای یک عمق نسبی یکسان،

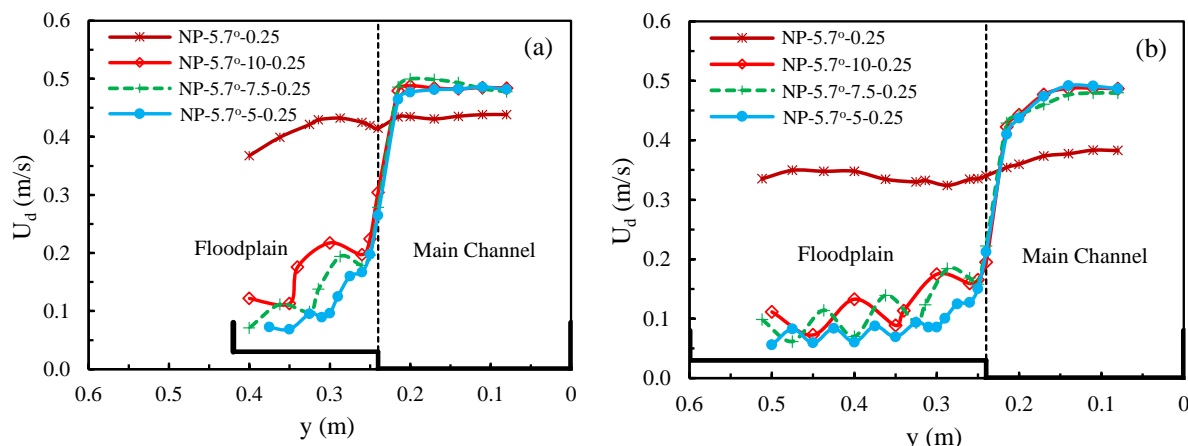


Fig. 6 Lateral depth-averaged velocity distribution, (a) Middle, (b) End
 شکل ۶ توزیع عرضی سرعت میانگین - عمقی؛ (a) میانه محدوده واگرایی؛ (b) انتهای محدوده واگرایی

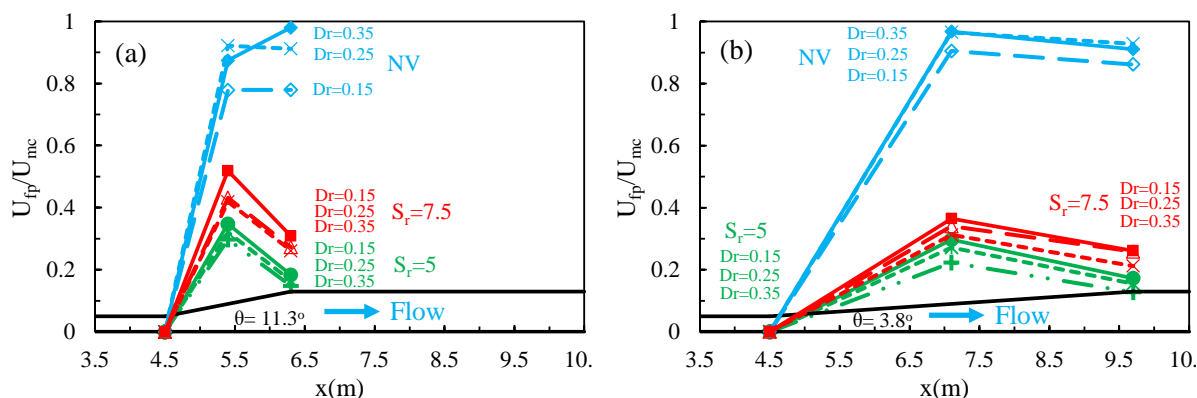


Fig. 7 Depth-averaged velocity of the floodplain to the main channel in the divergence reach, (a) $\theta = 11.3^\circ$, (b) $\theta = 3.8^\circ$
 شکل ۷ نسبت سرعت میانگین - عمقی سیلابدشت به آبراهه اصلی در محدوده واگرایی؛ (a) $\theta = 11.3^\circ$ (b) $\theta = 3.8^\circ$

روی آزمایش‌های (1984) Pasche نشان می‌دهد. در این شکل خطوط سیاه رنگ نشان دهنده ضریب اصطکاک منطقه‌ای و خطوط رنگی ضریب اصطکاک موضعی را نمایش می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رود بر مبنای رابطه (۱۲) مقادیر ضریب اصطکاک بر روی سیلابدشت در سری آزمایش‌های II بیشتر از سری آزمایش‌های I محاسبه شده است، زیرا تراکم پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت افزایش یافته و در نتیجه مقاومت در برابر جریان بیشتر شده است. همچنین در آزمایش‌های سری III نیز مقادیر f بخوبی برآورد شده است. در حالی که با استفاده از رابطه (2007) Rameshwaran and Shiono مقادیر f برای تمامی آزمایش‌ها در آبراهه اصلی و سیلابدشت به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۳۴ به دست آمده است. افزون بر این به دلیل برآورد منطقه‌ای ضریب زبری جریان، یک ناپیوستگی بین مقادیر f محاسبه شده بین آبراهه اصلی و سیلابدشت وجود دارد. در حالی

ارائه شده است برای محاسبه ضریب اصطکاک آبراهه اصلی و سیلابدشت پوشیده شده از گیاه استفاده کردند. (2007) Rameshwaran and Shiono رابطه زیر را برای محاسبه ضریب اصطکاک پیشنهاد دادند:

$$f_i = \left[-2 \log \left(\frac{3.02\nu}{\sqrt{128gH^3S_o}} + \frac{k_s}{\chi H} \right) \right]^{-2} \quad (13)$$

که در رابطه بالا، k_s ارتفاع معادل زبری بوده و χ ضریبی است که به ترتیب برای آبراهه اصلی و سیلابدشت پوشیده از گیاه ۱/۲ و ۱۲/۳ می‌باشد. (2010) Terrier پیشنهاد می‌کند که در رابطه (۱۳) به جای ضریب ۱۲/۳ از ۷/۷۵ در آبراهه اصلی استفاده شود.

شکل ۹ نتایج مربوط به رابطه (۱۲) و مقایسه آن با رابطه پیشنهاد شده توسط (2007) Rameshwaran and Shiono را بر

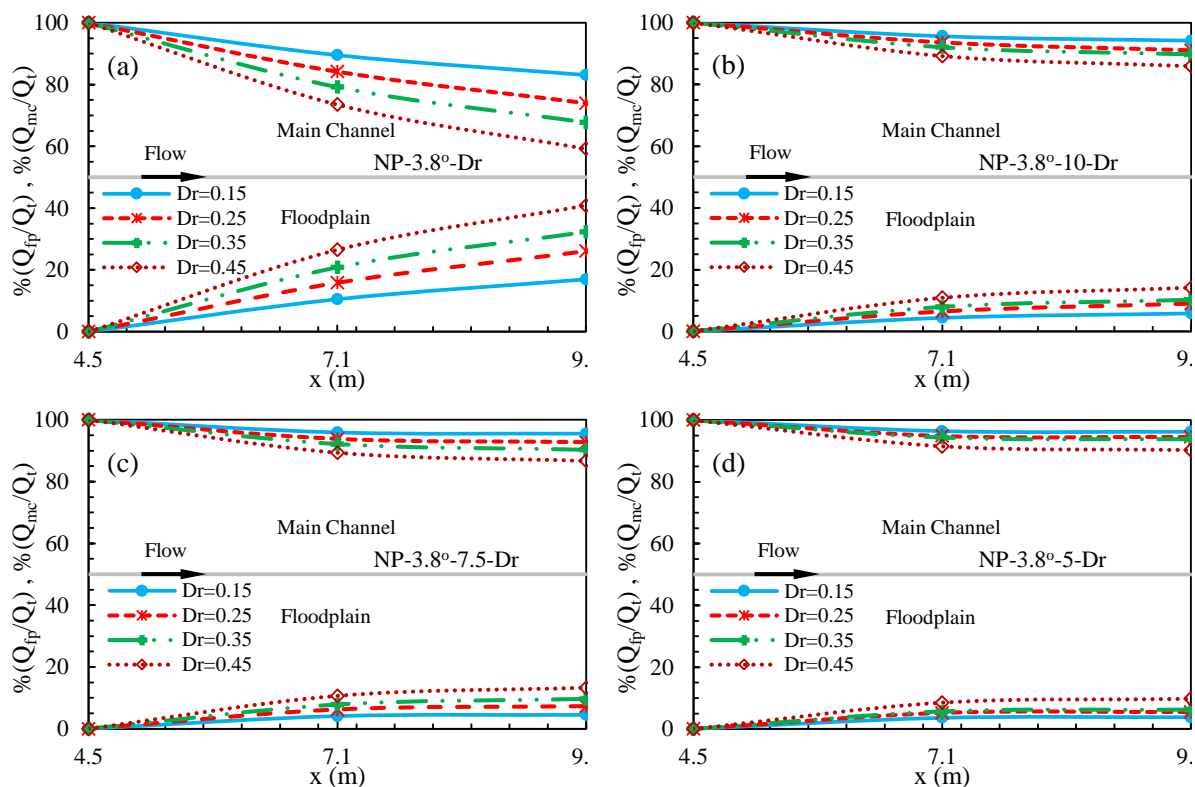


Fig. 8 Percentage of flow discharge divided between the main channel and floodplain, (a) NP-3.8o-Dr, (b) NP-3.8o-10-Dr, (c) NP-3.8o-7.5-Dr, d) NP-3.8o-5-Dr

شکل ۸ درصد تقسیم دبی جریان در آبراهه اصلی و سیلابدشت؛ (a) NP-3.8o-Dr؛ (b) NP-3.8o-10-Dr؛ (c) NP-3.8o-7.5-Dr؛ (d) NP-3.8o-5-Dr

(2006) نیز بیان شده است. الگوی تغییرپذیری مقادیر ضریب اصطکاک بر روی سیلابدشت نیز به دلیل کاهش سرعت جریان و وجود اصطکاک پوسته‌ای بر روی سطح میله‌ها باعث الگوی سینوسی می‌شود.

شکل ۱۱ تغییرپذیری مقادیر ضریب اصطکاک منطقه‌ای را در میانه و انتهای محدوده واگرایی در برابر عمق نسبی جریان با تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی نمایش می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش عمق نسبی، ضریب زبری منطقه‌ای در سیلابدشت به صورت غیرخطی افزایش یافته و در آبراهه اصلی به صورت خطی می‌باشد. این نتیجه با نتایج تحقیق Musleh and Cruise (2006) همخوانی دارد.

در شکل ۱۲ ارتباط میان عدد رینولدز میله و ضریب اصطکاک ارزیابی شده است. به منظور ترسیم این نمودار از اطلاعات ۱۳۷۰ داده آزمایشگاهی استفاده شد. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرپذیری ضریب اصطکاک در مقابل عدد رینولدز میله به صورت غیرخطی است. به منظور سهولت در برآورد ضریب زبری

که رابطه (۱۲) مقادیر f را به صورت پیوسته و موضعی محاسبه می‌کند. همچنین به نظر می‌رسد رابطه Rameshwaran and Shiono (2007) مقادیر f را در آبراهه اصلی کمتر از میزان واقعی برآورد می‌نماید.

در شکل ۱۰ تغییرپذیری ضریب زبری موضعی در مقطع عرضی آبراهه مرکب غیرمنشوری در حضور پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی بررسی شده است. مشاهده می‌شود که، ضریب اصطکاک آبراهه اصلی هنگامی که سیلابدشت دارای پوشش گیاهی است نسبت به آبراهه بدون پوشش گیاهی کاهش جزئی داشته است. در حالی که ضریب اصطکاک در ناحیه سیلابدشت به دلیل حضور المان‌های پوشش گیاهی افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. به دلیل افزایش تعداد المان‌های پوشش گیاهی در انتهای محدوده واگرایی مقاومت در برابر جریان در این ناحیه بیشتر از میانه واگرایی است.

افزون براین، مقاومت جریان با افزایش تراکم پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. این موضوع در تحقیقات Musleh and Cruise

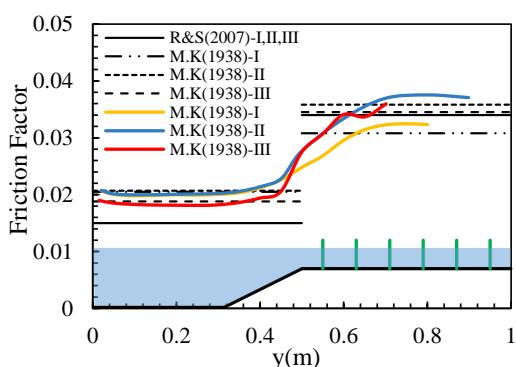


Fig. 9 Comparison of modified Keulegan (1938) and Rameshwaran and Shiono (2007) equations
 شکل ۹ مقایسه رابطه Keulegan (1938) اصلاحی با رابطه Rameshwaran and Shiono (2007)

داری- و بسبب این گونه شرایط، رابطه‌ای بر روی داده‌های آزمایشگاهی با خطای برآورد کمتر از ۰/۷ درصد برازش داده شده است (رابطه ۱۴). همچنین، داده‌های Terrier (2010) و Sun and Shiono (2013) نیز ارتباط غیرخطی بین عدد رینولدز میله و f را تأیید می‌نمایند. شکل ۱۳ مقادیر ضریب اصطکاک محاسبه شده توسط رابطه (۱۴) را در برابر مقادیر ضریب اصطکاک محاسبه شده توسط رابطه (۱۲) نشان می‌دهد.

$$f = \frac{0.2444}{Re_{rod}^{0.296}} \quad (14)$$

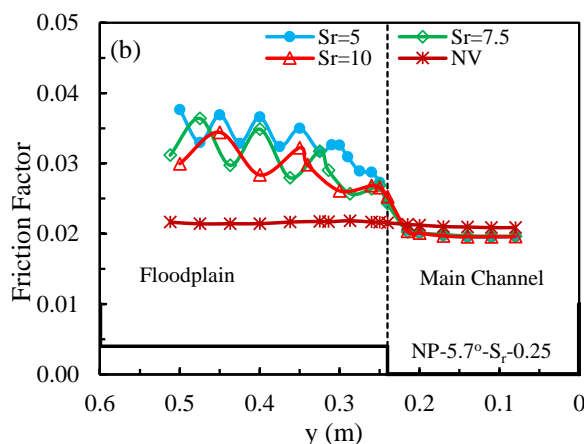
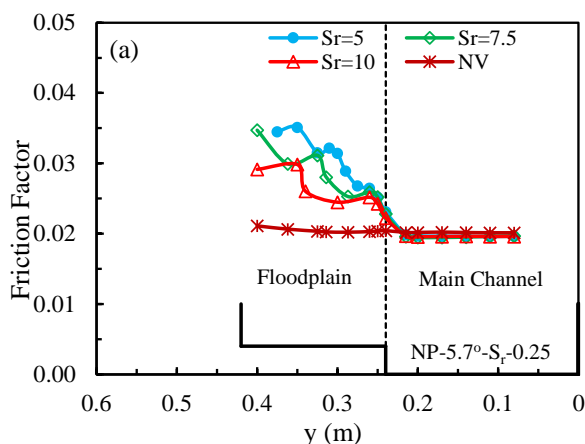


Fig. 10 Vegetation density effects on the local friction factor, (a) Middle, and (b) End

شکل ۱۰ تأثیر تراکم پوشش گیاهی بر روی ضریب اصطکاک موضعی، (a) میانه واگرایی، (b) انتهای واگرایی

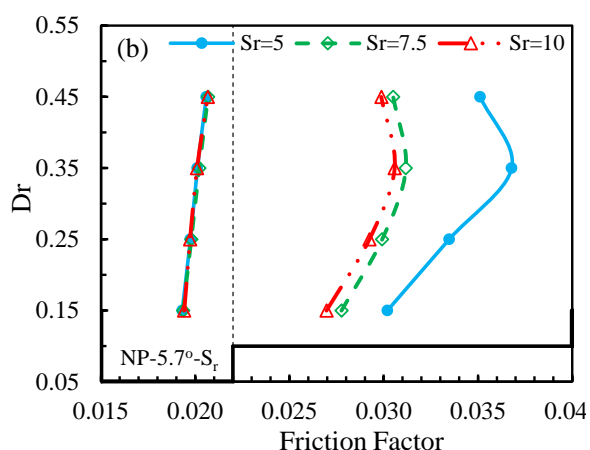
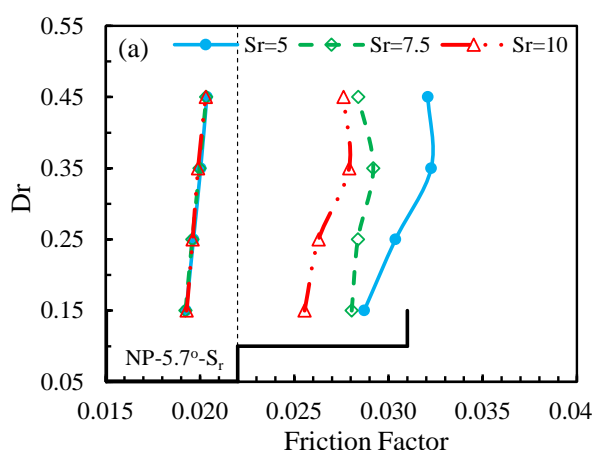


Fig. 11 Relative depth effects on zonal friction factor, a) Middle, and b) End

شکل ۱۱ تأثیر عمق نسبی جریان بر روی ضریب اصطکاک منطقه‌ای، (الف) میانه واگرایی، (ب) انتهای واگرایی

انرژی و پروفیل سطح آب را برای زاویه واگرایی ۵/۷ درجه در عمق نسبی ۰/۳۵ و نسبت فاصله ۵ نشان می‌دهد. رابطه (۷) و (۸) برای مقاطع منشوری و جریان یکنواخت

با توجه به اینکه در مقاطع غیرمنشوری جریان غیریکنواخت است شیب خط انرژی، شیب کف و شیب سطح آب با یکدیگر برابر نمی‌باشند. شکل ۱۴ تغییرپذیری شیب خط

کمی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. همچنین ضریب کشانه با افزایش رینولدز میله به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. افزون بر این، می‌توان دریافت که ضریب کشانه ناشی از پوشش گیاهی سیلابدشت با تراکم پوشش گیاهی رابطه‌ای مستقیم دارد. این موضوع توسط Stoesser et al. (2010) نیز گزارش شده است.

۳-۴- توزیع عرضی تنش برشی بستر

بر مبنای رابطه (۲) با داشتن سرعت میانگین-عمقی و ضریب اصطکاک می‌توان تنش برشی را در هر مقطع محاسبه کرد. شکل ۱۶ تغییرپذیری عرضی تنش برشی بستر را در سه نسبت فاصله پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی با عمق نسبی ۰/۳۵ و زاویه واگرایی ۱۱/۳ درجه نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که میزان تنش برشی بستر بر روی سیلابدشت در تراکم بالای پوشش گیاهی (Sr=۵) نسبت به تراکم پوشش گیاهی کم (۱۰= Sr) در میانه و انتهای محدوده واگرایی به ترتیب ۴۴/۲ و ۵۴/۶ درصد کاهش یافته است.

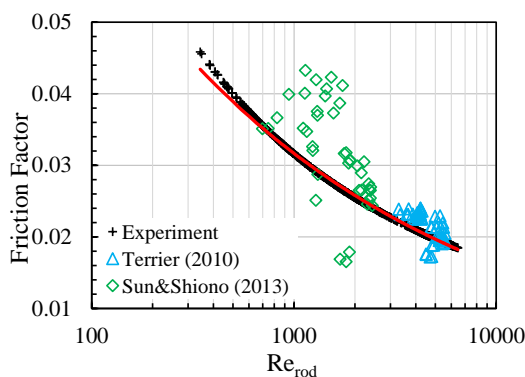


Fig. 12 Relation between f and rod Re_{rod}

شکل ۱۲ ضریب اصطکاک در برابر عدد رینولدز میله

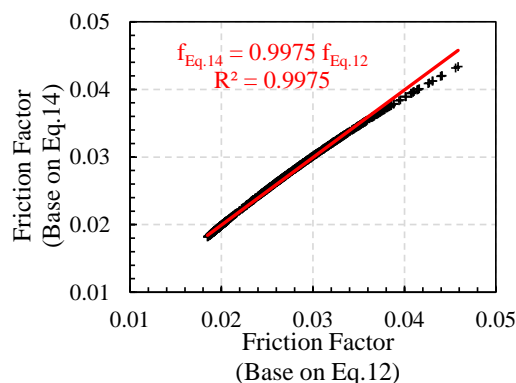


Fig. 13 Comparison of friction factor calculated based on equations (12) and (14)

شکل ۱۳ مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک محاسبه شده

بر اساس رابطه (۱۴) و (۱۲)

ارائه شده است در حالی که در مقاطع مرکب غیرمنشوری می‌بایست از شیب خط انرژی استفاده کرد. تحقیقات Das and Khatua (2018, 2019), Devi et al. (2018) et al. (2018) نشان می‌دهد که در آبراهه مرکب غیرمنشوری شیب خط انرژی به زاویه واگرایی سیلابدشت وابسته می‌باشد ($S_e=f(\theta)$). لذا در این تحقیق رابطه‌ای برای محاسبه شیب خط انرژی در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری واگرا با پوشش گیاهی ارائه شد:

$$S_e = \frac{I}{Re_{rod}} \left(3.89 E^{-09} Re_{rod}^{2.46} + \frac{x}{L} + 0.92^\theta \right) + \phi \ln(Dr) + 11.1 \alpha_v D \quad (15)$$

$$\phi = 7.3827 Dr + 0.1129, \quad \alpha_v = N_v D$$

در رابطه بالا، θ برحسب رادیان، x/L فاصله نسبی از ابتدای محدوده واگرایی و α_v تراکم انسداد در واحد سطح (m^{-1}) می‌باشد. در جدول ۲، دقت معادله پیشنهادی برای عمق‌های نسبی مختلف ارزیابی شده است.

از آنجایی که نیروهای مقاومت جریان به شیب خط انرژی وابسته می‌باشند، بر مبنای رابطه Sonnenwald et al. (2019) و Kothiyari et al. (2009) ضریب کشانه در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری با پوشش گیاهی سیلابدشت ارائه شده است:

$$C_D = 4.88 Re_{rod}^{-0.062} \left(S_e^{0.6} + \phi^{0.2} + 0.024 Dr \right) \quad (16)$$

ویژگی رابطه بالا محاسبه ضریب کشانه در هر فاصله دلخواه x در محدوده واگرایی آبراهه مرکب غیرمنشوری می‌باشد. به منظور به دست آوردن این رابطه، ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد مابقی برای آزمون استفاده شده است. متوسط خطای نسبی رابطه پیشنهادی ۰/۱۶ درصد محاسبه شد.

در شکل ۱۵ مقادیر ضریب کشانه به دست آمده بر مبنای رابطه (۷) و رابطه پیشنهادی (رابطه ۱۶) برای اعداد رینولدز میله و تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی نشان داده شده و با نتایج تحقیقات James et al. (2004), Kothiyari et al. (2009) و Wang et al. (2019) مقایسه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که رابطه (۱۶) با داده‌های Kothiyari et al. (2009) همخوانی بیشتری داشته و رابطه ارائه شده توسط Sonnenwald et al. (2019) مقادیر ضریب کشانه را

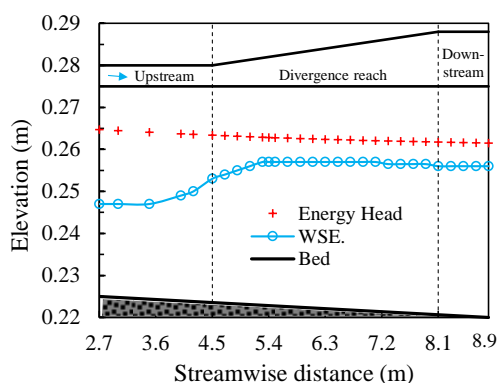


Fig. 14 Changes in energy slope and water level profile along the channel, NP-5.7o-5-0.35

شکل ۱۴ تغییرپذیری شیب خط انرژی و پروفیل سطح آب در طول آبراهه، NP-5.7o-5-0.35

همچنین وجود پوشش گیاهی باعث افزایش میزان تنش برشی در آبراهه اصلی به میزان ۱۹/۴ و ۵۶/۷ درصد به ترتیب در میانه و انتهای واگرایی می‌شود. افزون بر این، به ازای یک تراکم پوشش گیاهی معین، با افزایش عمق نسبی جریان تنش برشی بستر بر روی سیلابدشت به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. با حرکت از ابتدای محدوده واگرایی به سمت انتهای واگرایی به دلیل افزایش مقاومت ناشی از المان‌های پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش سرعت جریان، از میزان تنش برشی بر روی سیلابدشت کاسته می‌شود.

جدول ۲ ارزیابی خطای برآورد شیب خط انرژی توسط رابطه (۱۵)

Table 2 Evaluation of energy slope estimation error by Equation (15)

Dr	Average Relative Error(%)	Root Mean Square Error(m/m)	Standard Error(%)	Normalized Root Mean Square Error(%)
0.15	1.80	2.00E-05	2.21	9.97
0.25	2.30	1.81E-05	2.75	4.92
0.35	2.92	1.65E-05	3.28	3.51
0.45	2.97	1.22E-05	3.12	2.61

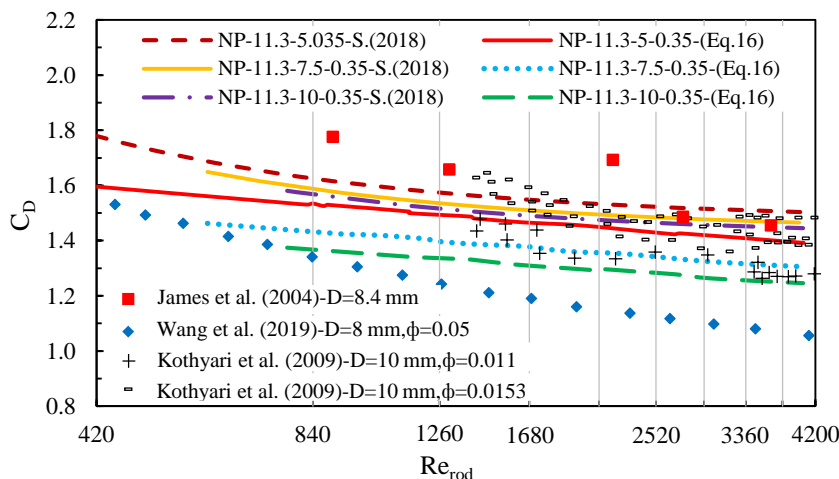


Fig. 15 Variations of drag coefficient (CD) versus rod Reynolds number (Re_{rod})

شکل ۱۵ تغییرپذیری ضریب کشانه (CD) در مقابل عدد رینولدز میله (Re_{rod})

است. این موضوع با نتایج Roshko (1954) و Sarkar (2012) همخوانی دارد.

عدد رینولدز میله بیشتر، موجب انتشار متناوب گردابه‌ها با بسامد بالا می‌شود. به دلیل کاهش سرعت جریان عبوری از میان پوشش گیاهی با تراکم بالا، بسامد تناوب گردابه کاسته شده و در نتیجه مسیر گردابه فن-کارمن بخوبی تشکیل نمی‌شود. با

۳-۵- تغییرپذیری عدد استروهاال

در شکل ۱۷ بسامد تناوب گردابه در میانه و انتهای محدوده واگرایی سیلابدشت به صورت تابعی از عدد رینولدز میله ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بسامد گردابه تابعی خطی از عدد رینولدز میله بوده و نرخ افزایش بسامد گردابه در مقابل عدد رینولدز در میانه واگرایی بیشتر از انتهای واگرایی

افزایش می‌یابد، از بسامد انتشار گردابه در انتهای سیلابدشت غیرمنشوری کاسته می‌شود.

توجه به اینکه با حرکت از میانه واگرایی به سمت انتهایی واگرایی تعداد المان‌های پوشش گیاهی مشارکت کننده در جریان

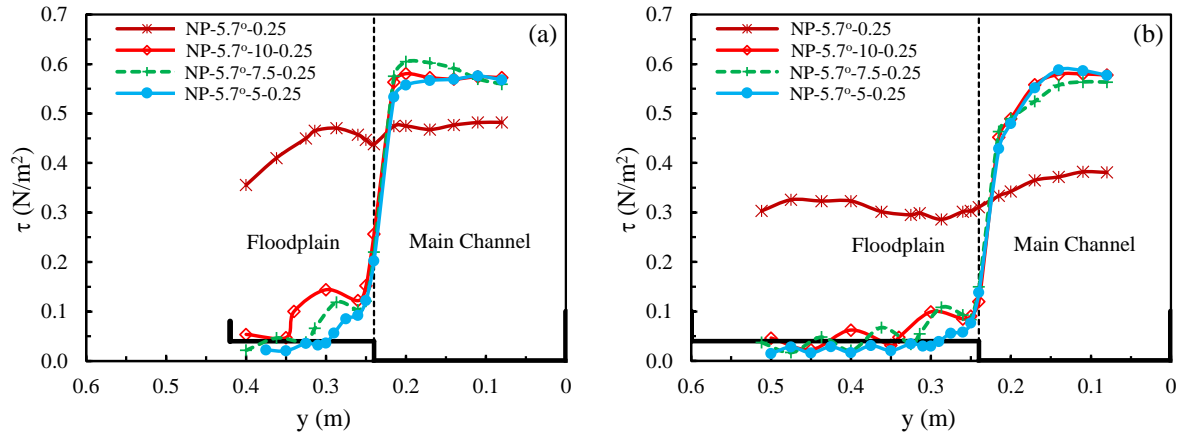


Fig. 16 Lateral distribution of bed shear stress, (a) Middle, (b) End

شکل ۱۶ توزیع عرضی تنش برشی بستر؛ (a) میانه محدوده واگرایی؛ (b) انتهای محدوده واگرایی

شکل ۱۸ تغییرپذیری عدد استروهل را در مقابل عدد رینولدز میله در میانه و انتهایی واگرایی نمایش می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز میله، عدد استروهل به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد که این موضوع در نتایج Zhao et al. (2014) نیز اشاره شده است. همچنین مقادیر عدد استروهل در میانه واگرایی به دلیل بالا بودن بسامد انتشار گردابه‌ها بیشتر از انتهایی واگرایی است. با توجه به ارتباط بسامد انتشار گردابه و نوسان‌های سرعت جریان در پشت المان‌ها، رابطه (۱۷) با میانگین خطای ۲/۲ درصد و با به کارگیری ۷۰۵ داده آزمایشگاهی در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری با پوشش گیاهی ارائه شده است:

$$f_s = \zeta \sqrt{\frac{g Re_{rod}^{1.7}}{\pi \alpha_p b} \tanh\left(\frac{Re_{rod} \theta D_r}{\pi \alpha_p b^2}\right)} \quad (17)$$

$$\zeta = 0.0721 \alpha_p D + 0.002$$

در رابطه بالا زاویه واگرایی سیلابدشت برحسب رادیان می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش پوشش گیاهی، بسامد تناوب گردابه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین افزایش عدد رینولدز میله و زاویه واگرایی باعث تشکیل گردابه با بسامد بالا در پشت المان‌های پوشش گیاهی می‌گردد.

۳-۶- میدان سرعت و تنش برشی رینولدزی

در شکل ۱۹ (a,b,c) میدان سرعت جریان گذرنده در پشت میله‌ها برای تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی در سیلابدشت

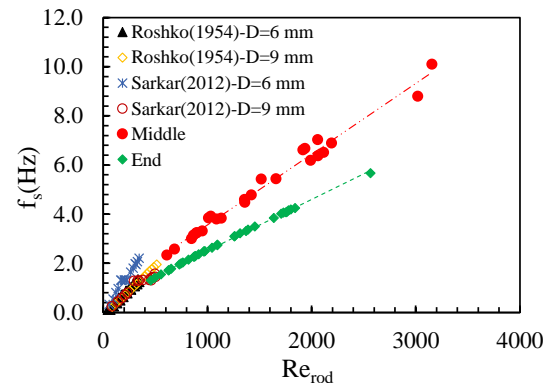


Fig. 17 Vortex shedding frequency versus Re_{rod} at the middle and end of the divergence reach, NP-5.7°-Sr-0.45
شکل ۱۷ تغییرپذیری بسامد گردابه در مقابل عدد رینولدز میله در میانه و انتهایی محدوده واگرایی، NP-5.7°-Sr-0.45

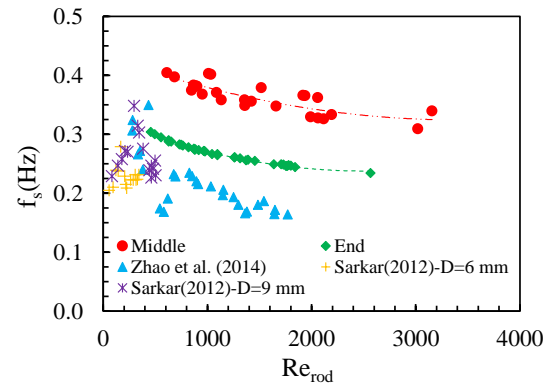


Fig. 18 St versus Re_{rod} at the middle and end of the divergence reach, NP-5.7°-Sr-0.45

شکل ۱۸ تغییرپذیری عدد استروهل در مقابل عدد رینولدز میله در میانه و انتهایی محدوده واگرایی، NP-5.7°-Sr-0.45

مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۹-a) در حالی که در تراکم‌های کمتر، به خاطر وجود فضای مناسب جهت توسعه مسیر گردابه، الگوی تکرارشونده مشاهده می‌شود (شکل ۱۹-b, c). در شکل ۱۹ (d,e,f) تنش‌های برشی رینولدزی در پشت المان‌های پوشش گیاهی در تراکم‌های مختلف نشان داده شده است. از این شکل می‌توان دریافت که تولید و استهلاك تنش برشی رینولدزی در اطراف میله به صورت متعادل نبوده و در نتیجه شار قوی تنش در ناحیه خارج از دنباله نزدیک، در پشت هر میله منفرد به وجود می‌آید. مشاهده‌ها نشان می‌دهد که تولید تنش‌های آشفتگی به تناوب گردابه بوجود آمده از هر میله منفرد بستگی دارد. با توجه به معادله (۱۷) در نسبت $Sr = 5$ به دلیل مقاومت بالای جریان و کاهش بسامد تشکیل گردابه، تنش‌های رینولدزی ضعیفی بر روی سیلابدشت تشکیل می‌شود. در حالی که در $Sr = 7/5$ مسیر گردابه فن-کارمن به

نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که به تدریج از میزان سرعت جریان در پایین دست المان پوشش گیاهی کاسته شده و مسیر گردابه اولیه فن-کارمن تشکیل می‌شود. بسته به فاصله عرضی المان‌ها، گردابه‌ها پس از حرکت به سمت پایین دست اثر تداخلی دارند. بنابر یافته‌های (Takemura and Tanaka (2007) چنانچه نسبت فاصله بین میله‌ها به قطر میله استوانه‌ای بیشتر از $1/8$ باشد، مسیر گردابه اولیه فن-کارمن به صورت پایدار در پشت هر میله تشکیل می‌شود، که در این تحقیق این نسبت 5 ، $7/5$ و 10 انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تراکم پوشش گیاهی موجب کاهش بیشتر سرعت در ناحیه پشت المان‌ها می‌شود. به دلیل جدایی ناپایدار جریان در پشت هر میله منفرد، الگوی تکراری شبه متقارن زوج گردابه‌ها به وجود می‌آید. به دلیل نبود فضای کافی برای توسعه کامل گردابه‌ها، الگوی تکراری در $Sr = 5$

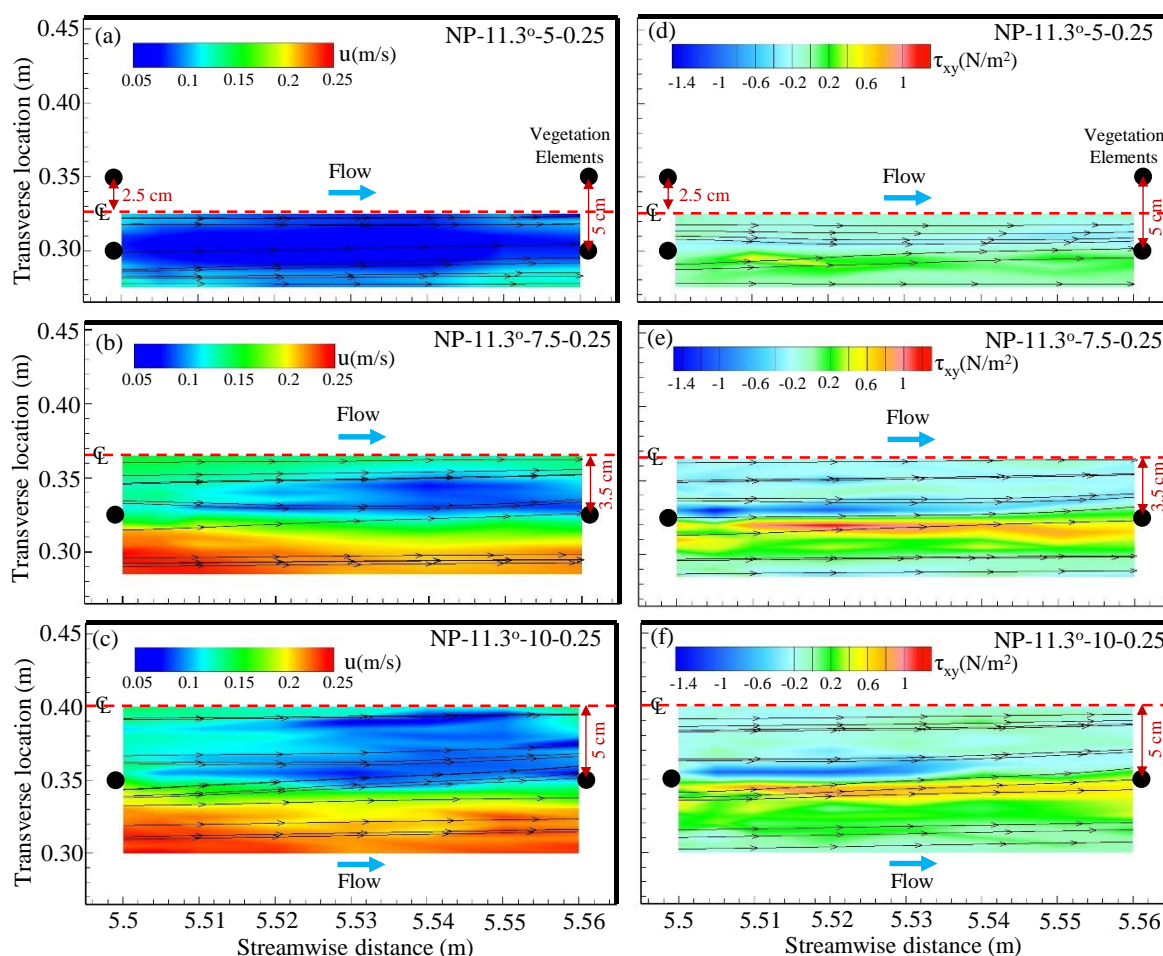


Fig. 19 Velocity field (a,b,c) and Reynolds shear stress (d,e,f) behind a vegetation element
 شکل ۱۹ میدان سرعت جریان و تنش برشی رینولدزی در پشت یک المان پوشش گیاهی

مشترک و افزایش زاویه حمله جریان (تأثیر زاویه واگرایی) به سمت میله‌ها موجب می‌شود که جریان‌های ثانویه نه چندان قوی پدیدار شود. (Yang et al. 2004) و Ghisalberti and Nepf (2007) نیز در بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که بدون در نظر گرفتن تراکم پوشش گیاهی، جریان‌های ثانویه ضعیفی در سیلابدشت به وجود می‌آید. از بین سه تراکم مورد بررسی، جریان‌های ثانویه قوی‌تری در تراکم پوشش گیاهی $Sr = 7/5$ نسبت به دو حالت دیگر به وجود می‌آید زیرا در این شرایط مسیر گردابه فن-کارمن بخوبی در ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت شکل گرفته است (شکل ۲۰-ب).

در این تحقیق، با به کارگیری اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها، ویژگی‌های جریان تحت تأثیر پوشش گیاهی سیلابدشت به آسانی قابل برآورد می‌باشد. بر این مبنا مراحل استخراج مشخصات جریان در آبراهه مرکب غیرمنشوری با پوشش گیاهی در روندنمای شکل ۲۱ ارائه شده است. به طوری که با در اختیار داشتن اطلاعات اولیه می‌توان از یکسو کلیه فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان شامل سرعت میانگین-عمقی، عدد رینولدز میله و ... و از سوی دیگر فراسنجه‌های آشفتگی و مقاومت در برابر جریان را که ناشی از حضور پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت می‌باشد محاسبه کرد.

درستی در پشت‌المان‌های پوشش گیاهی تشکیل شده و موجب افزایش نوسان سرعت و در نتیجه ایجاد تنش‌های رینولدزی قوی می‌شود. در $Sr = 10$ نیز بسامد انتشار گردابه افزایش یافته ولی به دلیل اثر زاویه واگرایی مسیر گردابه فن-کارمن از پشت‌المان حرکت کرده و موجب عریض‌تر شدن مسیر گردابه و در نتیجه تداخل گردابه‌ها شده است و در نتیجه از میزان شدت تنش‌های رینولدزی کمی کاسته می‌شود.

۳-۷- جریان ثانویه

تغییرپذیری جریان ثانویه در مقطع عرضی جریان بر مبنای رابطه (۳) در آبراهه مرکب غیرمنشوری محاسبه شده و در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ناحیه نزدیک به صفحه مشترک قائم بین آبراهه اصلی و سیلابدشت جریان ثانویه به طور ناگهانی به بیشترین و کمترین میزان خود رسیده است. (Zong and Nepf 2010) این پدیده را "انحراف جریان" می‌نامند. با حرکت از میانه واگرایی به سمت انتهایی محدوده واگرایی به دلیل کاهش گرادیان سرعت در صفحه مشترک از شدت جریان‌های ثانویه کاسته می‌شود. در پوشش گیاهی با تراکم بالا ($Sr = 5$)، اثر تداخلی گردابه‌ها مانع از تشکیل جریان‌های ثانویه بزرگ بر روی سیلابدشت می‌شود. در نسبت فاصله ۱۰، اثر کاهش گرادیان سرعت در صفحه

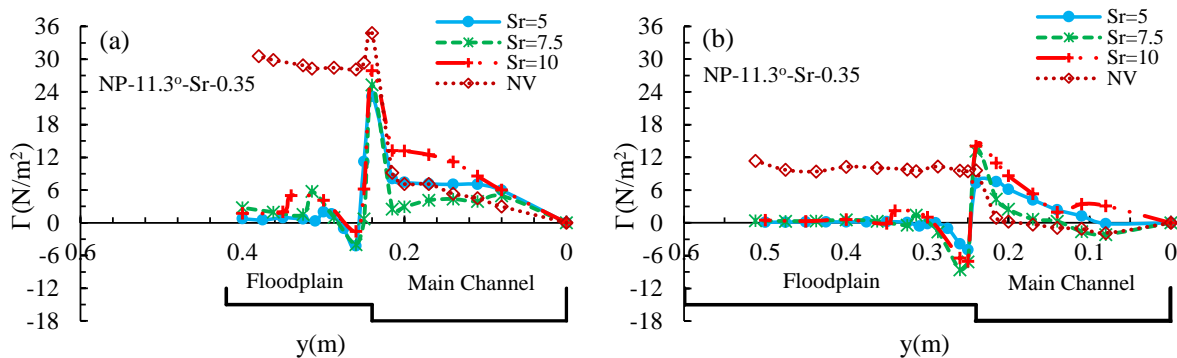


Fig. 20 Lateral distribution of secondary currents, (a) Middle, (b) End

شکل ۲۰ توزیع عرضی جریان ثانویه، (a) میانه واگرایی، (b) انتهایی واگرایی

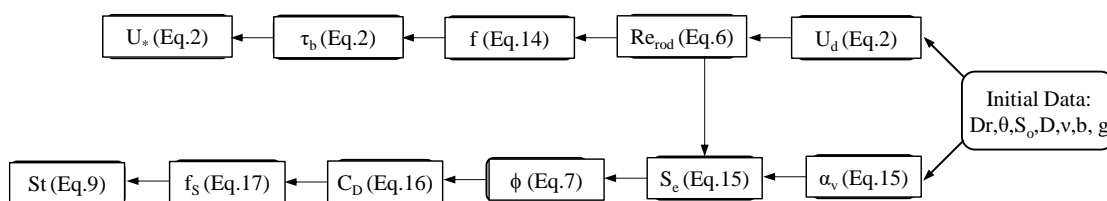


Fig. 21 Flowchart of extraction process of flow parameters in non-prismatic compound channels with vegetation

شکل ۲۱ روندنمای استخراج فراسنجه‌های جریان در آبراهه‌های مرکب غیرمنشوری با پوشش گیاهی.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر پوشش گیاهی سیلابدشت بر روی توزیع سرعت و ویژگی‌های آشفتگی جریان در یک آبراهه مرکب غیرمنشوری نامتقارن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که: در شرایط پوشش گیاهی غیرمستغرق، ناپایداری کلوین-هلمهولتز باعث تشکیل مسیر گردابه اولیه فن-کارمن در پایین دست المان‌ها و در نتیجه بروز نقاط V شکل در توزیع سرعت میانگین-عمقی بر روی سیلابدشت می‌شود. با افزایش تراکم پوشش گیاهی و در نتیجه تداخل گردابه‌ها با یکدیگر، بسامد انتشار گردابه کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی روند تغییرپذیری سینوسی توزیع عرضی سرعت بر روی سیلابدشت کاهش می‌یابد.

حضور پوشش گیاهی بر روی سیلابدشت موجب کاهش شدید تنش برشی بستر در این ناحیه و افزایش آن در آبراهه اصلی می‌گردد. به طوری که، با افزایش عمق نسبی جریان، تنش برشی بستر در آبراهه اصلی به صورت خطی و بر روی سیلابدشت به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. همچنین، گرادیان عرضی تنش برشی در ناحیه مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت با تراکم پوشش گیاهی رابطه‌ای مستقیم دارد. مشاهده‌ها نشان می‌دهد که توزیع تنش برشی بر روی سیلابدشت نیز به صورت سینوسی بوده که با توزیع عرضی سرعت جریان همخوانی دارد.

در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، نرخ مشارکت آبراهه اصلی در انتقال دبی جریان بسیار بیشتر از ناحیه دارای پوشش گیاهی است. در آبراهه مرکب غیرمنشوری بدون پوشش گیاهی حدود ۳۳ درصد از کل جریان از سیلابدشت عبور کرده در حالی که در حضور پوشش گیاهی این میزان به ۸ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت در برابر جریان به شدت به تراکم پوشش گیاهی بستگی دارد. با افزایش تراکم پوشش گیاهی، ضریب کشانه و ضریب اصطکاک جریان به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

جریان گذرنده از میان پوشش گیاهی توسط گردابه‌های منسجم کنترل می‌شوند که اندازه آن در ناحیه بین آبراهه اصلی و سیلابدشت بیشینه می‌باشد. لذا در این ناحیه می‌توان شاهد بیشترین مقدار تنش برشی رینولدز و جریان‌های ثانویه قوی بود. با توجه به اینکه جریان در مقاطع مرکب غیرمنشوری به صورت غیریکنواخت می‌باشد، مهم‌ترین نتیجه این تحقیق ارائه روابطی

ساده، جهت تعیین شیب خط انرژی، ضریب کشانه و ضریب مقاومت جریان می‌باشد.

۵- فهرست نشانه‌ها

A_p	مساحت تصویرشده گیاه در واحد حجم (m^2)
A_v	متوسط مساحت مقطع عرضی تنه گیاه (m^2)
b	عرض محدوده پوشیده از المان (m)
C_D	ضریب کشانه
D	قطر استوانه (m)
Dr	عمق نسبی جریان
f	ضریب زبری دارسی-ویسباخ
f_s	بسامد گردابه (Hz)
g	شتاب ثقل ($m.S^{-2}$)
H	عمق جریان (m)
h	عمق لبریزی (m)
l_x	فاصله بین ردیف‌ها (m)
l_y	فاصله بین المان‌ها (m)
j	شماره قطعه
k_s	ارتفاع معادل زبری (m)
n	شماره موج تولید شده
N	تعداد موانع در یک ردیف
NP	آبراهه غیرمنشوری
N_v	میانگین تعداد المان در واحد سطح (m^{-2})
P	آبراهه منشوری
Q_c	دبی محاسباتی ($m^3.s^{-1}$)
Q_m	دبی اندازه‌گیری ($m^3.s^{-1}$)
Re_{rod}	عدد رینولدز میله
s	شیب جانبی
S_e	شیب خط انرژی
S_f	ضریب سایه
S_o	شیب کف آبراهه
Sr	نسبت فاصله
St	عدد استروهل
u	سرعت موضعی جریان ($m.s^{-1}$)
U	سرعت میانگین جریان در جهت طولی ($m.s^{-1}$)

Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 157(2), 99-108, Thomas Telford Ltd.

Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, J.H. and Zech, Y. (2004). Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. Journal of hydraulic engineering, 130(4), 305-312.

Das, B.S. and Khatua, K.K. (2018). Flow resistance in a compound channel with diverging and converging floodplains. Journal of Hydraulic Engineering, 144(8), 04018051.

Das, B.S. and Khatua, K.K. (2019). Water surface profile computation for compound channel having diverging floodplains. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 25(3), 336-349.

Das, B.S., Khatua, K.K. and Devi, K. (2017). Numerical solution of depth-averaged velocity and boundary shear stress distribution in converging compound channels. Arabian Journal for Science and Engineering, 42(3), 1305-1319.

Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984). Water wave mechanics for engineers and scientists. In Unknown Host Publication Title. Prentice-Hall Inc, 368 p.

Devi, K., Das, B.S., Khuntia, J.R. and Khatua, K.K. (2018). Analytical solution of non-uniform flow in compound channel. In E3S Web of Conferences, 40, p. 06041, EDP Sciences.

Dupuis, V., Proust, S., Berni, C., Paquier, A. and Thollet, F. (2015, June). Open-channel flow over longitudinal roughness transition from highly submerged to emergent vegetation. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands.

Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2004). The limited growth of vegetated shear layers. Water Resources Research, 40(7), W07502, doi:10.1029/2003WR 002776

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

Hu, C., Ji, Z. and Guo, Q. (2010). Flow movement and sediment transport in compound channels. Journal of Hydraulic Research, 48(1), 23-32.

Jafari, A., Ghomeshi, M., Bina, M. and Kashefipour, S.M. (2011). A new equation for simulating strouhal number of wave frequency due to flow passing

U^* سرعت برشی ($m.s^{-1}$)

U_a سرعت نزدیک شونده ($m.s^{-1}$)

U_d سرعت میانگین عمقی ($m.s^{-1}$)

U_{fp} سرعت میانگین جریان در سیلابدشت ($m.s^{-1}$)

U_{mc} سرعت میانگین جریان در آبراه اصلی ($m.s^{-1}$)

V سرعت میانگین جریان در جهت عرضی ($m.s^{-1}$)

x/L فاصله نسبی از ابتدای محدوده واگرایی

y_f عمق جریان بر روی سیلابدشت (m)

z جهت قائم بر جریان (m)

ζ ضریب رابطه (۱۷)

λ ضریب لزجت گردابه‌ای بدون بعد

τ_{yx} تنش برشی رینولدزی میانگین عمقی ($N.m^{-2}$)

ε_{yx} لزجت گردابه‌ای میانگین عمقی ($m^2.S^{-1}$)

τ_b تنش برشی بستر ($N.m^{-2}$)

ρ چگالی آب ($kg.m^{-3}$)

χ ضریب معادله کلبروک- وایت

θ زاویه واگرایی

ν لزجت جنبشی ($m^2.S^{-1}$)

ϕ کسر حجمی انسداد

α_v تراکم انسداد در واحد سطح (m^{-1})

α_p تخلخل

ν_t میانگین عمقی لزجت گردابه‌ای ($m^2.S^{-1}$)

۶- منبع ها

Ahmad, M., Ghani, U., Anjum, N., Pasha, G.A., Ullah, M.K. and Ahmed, A. (2020). Investigating the flow hydrodynamics in a compound channel with layered vegetated floodplains. Civil Engineering Journal, 6(5), 860-876.

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

Bousmar, D. and Zech, Y. (1999). Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. Journal of hydraulic engineering, 125(7), 696-706.

Bousmar, D. and Zech, Y. (2004). Velocity distribution in non-prismatic compound channels. In

- open channels. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(10), 5119-5127.
- Pasche, E. (1984). Turbulence mechanism in natural streams and the possibility of its mechanical representation. *Mitteilungen Institut für Wasserbau and Wasserwirtschaft*, (52).
- Pasche, E. and Rouvé, G. (1985). Overbank flow with vegetatively roughened flood plains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(9), 1262-1278.
- Proust, S., Riviere, N., Bousmar, D., Paquier, A., Zech, Y. and Morel, R. (2006). Flow in compound channel with abrupt floodplain contraction. *Journal of hydraulic engineering*, 132(9), 958-970.
- Rameshwaran, P. and Shiono, K. (2007). Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent. *Journal of Hydraulic Research*, 45(3), 302-315.
- Rezaei, B. and Knight, D.W. (2009). Application of the Shiono and Knight Method in compound channels with non-prismatic floodplains. *Journal of Hydraulic Research*, 47(6), 716-726.
- Rezaei, B. and Knight, D.W. (2011). Overbank flow in compound channels with nonprismatic floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(8), 815-824.
- Roshko, A. (1954). A new hodograph for free-streamline theory, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc57027/>.
- Sanjou, M. and 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. and Itai, K. (2010). Turbulence structure of compound open-channel flows with one-line emergent vegetation. *Journal of Hydrodynamics*, 22(1), 560-564.
- Sarkar, A. (2012). Vortex-excited transverse surface waves in an array of randomly placed circular cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(7), 610-618.
- Schlichting, H. (1968). *Boundary layer theory*. McGraw-Hill, New York, 817 p.
- Sellin, R.H.J. (1964). A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche*, (7), 793-802.
- through cylinder obstacles. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 34(1), 45-54, (in Persian).
- James, C.S., Birkhead, A.L., Jordanova, A.A. and O'sullivan, J.J. (2004). Flow resistance of emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 42(4), 390-398.
- Jing, H., Li, C., Guo, Y. and Xu, W. (2011). Numerical simulation of turbulent flows in trapezoidal meandering compound open channels. *International journal for numerical methods in fluids*, 65(9), 1071-1083.
- Keulegan, G.H. (1938). *Laws of turbulent flow in open channels*. US: National Bureau of Standards, (21), 707-741.
- Knight, D.W. and Demetriou, J.D. (1983). Flood plain and main channel flow interaction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(8), 1073-1092.
- Knight, D.W. and Hamed, M.E. (1984). Boundary shear in symmetrical compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1412-1430.
- Knight, D.W. and Shiono, K. (1990). Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel. *Journal of hydraulic research*, 28(2), 175-196.
- Koftis, T. and Prinos, P. (2018). Reynolds stress modelling of flow in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 6(1), 17-27.
- Kothyari, U.C., Hayashi, K. and Hashimoto, H. (2009). Drag coefficient of unsubmerged rigid vegetation stems in open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 47(6), 691-699.
- Lu, S. and Chen, J. (2014). Effects of Rigid Vegetation on the Turbulence Characteristics in Sediment-Laden Flows. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2(12), 1091-1098.
- Mulahasan, S., Stoesser, T. and McSherry, R. (2017). Effect of floodplain obstructions on the discharge conveyance capacity of compound channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(11), 04017045.
- Musleh, F.A. and Cruise, J.F. (2006). Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation. *Journal of hydraulic engineering*, 132(2), 163-171.
- Naik, B., Khatua, K.K., Padhi, E. and Singh, P. (2018). Loss of energy in the converging compound

- Västilä, K., Järvelä, J. and Koivusalo, H. (2016). Flow-vegetation-sediment interaction in a cohesive compound channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015034.
- Wang, W.J., Peng, W.Q., Huai, W.X., Katul, G.G., Liu, X.B., Qu, X.D. and Dong, F. (2019). Friction factor for turbulent open channel flow covered by vegetation. *Scientific reports*, 9(1), 1-16.
- Yang, J.Q. and Nepf, H.M. (2019). Impact of vegetation on bed load transport rate and bedform characteristics. *Water Resources Research*, 55(7), 6109-6124.
- Yang, K., Cao, S. and Knight, D.W. (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 148-159.
- Yang, K., Nie, R., Liu, X. and 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. and Ayyoubzadeh, S.A. (2013). The hydraulics of flow in non-prismatic compound channels. *J Civil Eng Urban*, 3(6), 342-356.
- Zdravkovich, M.M. (1987). The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of fluids and structures*, 1(2), 239-261.
- Zhang, M., Jiang, C., Huang, H., Nanson, G.C., Chen, Z. and Yao, W. (2017). Analytical models for velocity distributions in compound channels with emerged and submerged vegetated floodplains. *Chinese Geographical Science*, 27(4), 577-588.
- Zhao, K., Cheng, N.S. and Huang, Z. (2014). Experimental study of free-surface fluctuations in open-channel flow in the presence of periodic cylinder arrays. *Journal of Hydraulic Research*, 52(4), 465-475.
- Zong, L. and Nepf, H. (2010). Flow and deposition in and around a finite patch of vegetation. *Geomorphology*, 116(3-4), 363-372.
- Shiono, K. and Knight, D.W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 222, 617-646.
- Sonnenwald, F., Stovin, V. and Guymet, I. (2019). Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 57(4), 591-597.
- Stoesser, T., Kim, S.J. and Diplas, P. (2010). Turbulent flow through idealized emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(12), 1003-1017.
- Stoesser, T., Kim, S.J. and Diplas, P. (2010). Turbulent flow through idealized emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(12), 1003-1017.
- Sun, X. and Shiono, K. (2009). Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound open channel. *Advances in Water Resources*, 32(3), 430-438.
- Sun, X., Shiono, K., Fu, X.Y., Yang, K.J. and Huang, T.L. (2013). Application of Shiono and Knight method to compound open channel flow with one-line emergent vegetation. In *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd. 663, 930-935.
- Takemura, T. and Tanaka, N. (2007). Flow structures and drag characteristics of a colony-type emergent roughness model mounted on a flat plate in uniform flow. *Fluid dynamics research*, 39(9-10), 694.
- Tang, X. and 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.
- Tang, X., Knight, D.W. and Sterling, M. (2011). Analytical model for streamwise velocity in vegetated channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, 164(2), 91-102.
- Terrier, B. (2010). Flow characteristics in straight compound channels with vegetation along the main channel. Ph.D Thesis, Loughborough University, 353p.
- Terrier, B., Robinson, S., Shiono, K., Paquier, A. and Ishigaki, T. (2010). Influence of vegetation to boundary shear stress in open channel for overbank flow. *River Flow 2010*, 285-292.