

# Flow behavior in Non-Prismatic Convergent Compound Channel with Submerged Vegetation on Floodplains

Fatemeh Vojoudi Mehrabani <sup>1</sup>, Mirali Mohammadi <sup>2</sup>, Seyed Ali Ayyoubzadeh <sup>3\*</sup>, João N. Fernandes <sup>4</sup>, Rui M.L. Ferreira <sup>5</sup>

1- PhD Candidate, Department of Civil Eng., Faculty of Civil Eng., Urmia University, Urmia, Iran.


2- Associate Professor in Civil Eng. (Hydraulics & River Eng. Mechanics), Faculty of Civil Eng., Urmia University, P.O. Box 165, Urmia, Iran.

3- Professor, Water Structures Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

4- Civil Eng. PhD, Hydraulics and Environment Department, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal.

5- Associate Professor, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal.

\* [ayyoub@modares.ac.ir](mailto:ayyoub@modares.ac.ir)

Received: 15 February 2020, Accepted: 20 April 2020  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Vegetation in compound channels by increasing factors such as roughness in the floodplains rather than main channel, velocity difference and momentum exchange between the sub sections, makes the transverse velocity gradient and apparent shear stress increase of the channel interface. In natural rivers, changing the cross section makes the uniform flow conversion to non-uniform. In prismatic channels, shear stress in the interface between main channel and floodplains, influences the transfer capacity and velocity distribution pattern significantly. This effect in non-prismatic channels, due to the extra momentum exchange between the sub-sections is more intense. In such conditions, identifying the flow hydraulic is too complex. Although forming the vegetated and non-prismatic floodplains at the same time in natural rivers is highly probable, there are no specialized studies to investigate the hydraulic of flow in such the conditions. Therefore, in the present study, experimental measurements were conducted in a compound channel with non-prismatic and vegetated floodplains simultaneously and flow behavior is investigated on it.

**Methodology:** The experiments were conducted in a 10 m long, 2 m wide compound channel located at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) in Lisbon, Portugal. The channel cross-section consists of two equal rectangular floodplains (floodplain width  $B_{fp}=0.7$  m) and one trapezoidal main channel (bank full height,  $h_b=0.1$  m, bottom width  $b_{mc} = 0.4$  m, bank full width  $B_{mc} = 0.6$  m and side slope of  $45^\circ$ ,  $s_y=1$ ). The channel bed is made of polished concrete and its longitudinal slope is  $S_0=0.0011$  m/m. The vegetated floodplains were obtained by covering their bottoms with a 5 mm high synthetic grass. For the polished concrete, the roughness coefficients i.e.  $n=0.0092$  m- $1/3s$  and  $k_s=0.15$  mm are considered and for the synthetic grass,  $n=0.0172$  m- $1/3s$  and  $k_s=6.8$  mm are used. Measurements were performed for relative depths of 0.21 and 0.31. The experiments in the non-prismatic channel performed at two convergent angles of floodplains ( $\theta=7.25^\circ$  and  $\theta=11.3^\circ$ ). In this cases, the mentioned relative depths were set up in the middle sections of convergences by changing the downstream tailgate. The velocity measurements performed for Entrance, Middle and End

sections of convergent angles.

**Results and discussion:** High velocity distribution pattern gradients are observed in non-prismatic channel rather than prismatic channel for a given relative depths. Comparisons between similar sections indicates that by increasing the relative depth, the interaction intensity through the main channel and floodplain decreases. As presence of vegetation on the floodplain leads to the channel transfer capacity decrease and in high values of relative depth, this effect decreases. Except the areas close to wall and interface, the flow on floodplain is two-dimensional, while in the main channel and especially in low relative depths is three-dimensional. This issue has also been affected by different convergence angles. The maximum velocity generally occurs near the outer wall of the main channel. But, by increasing the relative depth, position of the maximum velocity moves to the floodplain. In the lower relative depth, in vicinity of interface, a bulge is visible in isovel lines that is already reported in previous works. Due to the mass transfer from the floodplain towards the main channel, this bulge occurred more intensively in the middle sections in both the convergent angles. In non-prismatic channel, for all the flow cases, at the interface, the intensity of the secondary flows is more apparent and in the down part main channel flow, a vortex is formed that by increasing the relative depth from 0.21 to 0.31 and convergent angles from  $7.25^\circ$  to  $11.3^\circ$ , moves from the outer wall of the main channel towards the floodplain. Also at the beginning of the floodplain, one vortex is formed that becomes more apparent by increasing the convergence angles. Due to converging floodplains, in the upper layers, a transverse current is directed from the floodplains to the main channel. This transverse current enters the main channel from both sides and, due to symmetry of flow, plunges to the channel bed and as a result, two helical secondary flows are generated in the main channel, rotating in the channel length which is very important in terms of sediment and pollutant transport. By increasing relative depth, velocity gradient between the main channel and floodplains decreases.

**Conclusions:** In present study, using an experimental model, flow behavior in a prismatic and non-prismatic compound channel is investigated. Non-prismatic channel consists of two convergence angles;  $7.25^\circ$  and  $11.3^\circ$ . All the experiments are conducted at two relative depths of 0.21 and 0.31. In order to investigate vegetation cover effects, floodplains are covered with synthetic grass and a vectorino (ADV) is used to measure the fluctuations of instantaneous flow velocity. Variations in the streamwise velocity distribution, secondary currents and Reynolds stresses based on proportions of vegetation and non-prismaticity in the flow hydraulic are investigated. Results show for high relative depth, by increasing convergent angles, the floodplains are less involved in discharge carrying and transferring. The maximum velocity values which occur at the main channel center, by increasing the relative depth and extending secondary currents, towards to the floodplains. By increasing the convergent angle, the roughness values in the main channel and floodplains increases. Distribution of flow mean kinetic energy shows that by increasing relative depth, its values in the middle section decreases for both the convergent angles.

**Keywords:** Compound Channel, Convergent Floodplains, Submerged Vegetation, Momentum Transfer.

# رفتار جریان در آبراهه مرکب غیر منشوری همگرا با پوشش گیاهی مستغرق در سیلابدشت‌ها

فاطمه وجودی مهربانی<sup>۱</sup>، میرعلی محمدی<sup>۲</sup>، سیدعلی ایوب زاده<sup>۳\*</sup>، ژووا فرناشد<sup>۴</sup>، رویی فریرا<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه، ایران.

۲- دانشیار مهندسی عمران- هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه، ایران.

۳- استاد گروه مهندسی سازه های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴- دکترای مهندسی عمران، دانشکده هیدرولیک و محیط زیست، لابراتوار ملی مهندسی عمران (LNEC) لیسبون، پرتغال.

۵- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده هیدرولیک و محیط زیست، دانشگاه فنی لیسبون، پرتغال.

\* ayyoub@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱ و بگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** در مقطع‌های مرکب پوشش گیاهی باعث می‌شود زبری سیلابدشت‌ها نسبت به آبراهه اصلی و اختلاف سرعت و اندازه حرکت میان آن‌ها افزایش یابد که خود منجر به بالا رفتن گرادیان عرضی سرعت جریان در سیلابدشت‌ها و تنش برشی ظاهری در سطح مشترک آبراهه اصلی و سیلابدشت می‌شود. همچنین در رودخانه‌های طبیعی به دلیل تشکیل مقطع‌های غیرمنشوری، انتقال اندازه حرکت بالایی میان زیربخش‌ها رخ می‌دهد که شناخت هیدرولیک جریان را پیچیده‌تر می‌کند. در این تحقیق ساختار جریان در آبراهه غیرمنشوری با سیلابدشت‌های همگرا و پوشش گیاهی مستغرق بررسی و ارزیابی شده است. آزمایش‌ها در دو عمق نسبی (نسبت عمق آب در سیلابدشت به عمق آب در آبراهه اصلی) ۰/۳۱ و ۰/۲۱ برای زاویه‌های همگرایی ۷/۲۵ و ۱۱/۳ درجه انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که به ازای عمق نسبی بیشتر و با افزایش زاویه همگرایی، سیلابدشت‌ها در مقطع میانی نسبت به مقطع ابتدایی، تمایل کمتری به مشارکت در گذردهی دبی دارند. بیشینه سرعت جریان که در محور میانی آبراهه اصلی رخ می‌دهد، با افزایش عمق نسبی و گسترش جریان‌های ثانویه، به سمت میانه آبراهه جا به جا می‌شود. با افزایش زاویه همگرایی میزان زبری در آبراهه اصلی و سیلابدشت افزایش می‌یابد. توزیع میانگین انرژی جنبشی جریان نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی، میزان آن در مقطع‌های میانی، در هر دو زاویه همگرایی کاهش می‌یابد.

**کلید واژگان:** آبراهه مرکب، سیلابدشت‌های همگرا، پوشش گیاهی مستغرق، انتقال اندازه حرکت.

## ۱- مقدمه

پوشیده شده‌اند و به واسطه نزدیکی به ساحل رودخانه و نیز داشتن عرض زیاد و خاک حاصل خیز همواره از جنبه های مختلف مورد توجه بوده‌اند. برای شناخت هیدرولیک جریان در آبراهه‌های منشوری ساده و یا مرکب بررسی‌های بسیاری به وسیله پژوهشگرانی مانند:

Huai et al. (2009), Huang et al. (2002), Tominaga et al. (1989), Mohammadi (2001a&b), Ayyoubzadeh (1997), Asghari et al. (2011), Zahiri et al. (2009), ... انجام گرفته است. در زمینه هیدرولیک مقطع‌های مرکب، مدل‌سازی کاربردی توسط Shiono & Knight (1988) از گام‌های ابتدایی و مهم برای حل توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بدون در نظر گرفتن جریان‌های ثانویه می‌باشد

رودخانه‌های طبیعی در طول مسیر خود به‌طور معمول به شکل مقطع مرکب ظاهر می‌شوند. مقطع‌های مرکب اغلب از چند زیر مقطع با ویژگی‌های متفاوت جریان تشکیل می‌شود و هر مقطع معمولاً شامل یک آبراهه اصلی و یک یا دو سیلابدشت می‌باشد. هنگام رخداد سیلاب دریک رودخانه طبیعی، جریان پس از لبریز شدن از آبراهه اصلی، وارد اراضی مجاور شده و از آنها عبور می‌کند که این حالت نمونه‌ای از مقطع مرکب می‌باشد (Behdarvandi et al. 2013). در رودخانه های طبیعی، سیلابدشت‌ها اغلب به صورت جزئی با پوشش گیاهی مانند بوته‌ها یا درخت‌ها

حرکت مضاعف میان آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها شدت بیشتری نیز می‌یابد. همچنین افزون بر تغییرپذیری‌های عرضی که در آبراهه‌های مرکب نسبت به آبراهه‌های ساده وجود دارد، در مقطع‌های غیرمنشوری تنش برشی ظاهری بدلیل تغییرات طولی نیز افزایش می‌یابد. در این راستا محققانی مانند Proust et al. (2006), Yonesi et al. (2009), Rezaei and Knight (2009), Rezaei & Knight (2013) به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. در این راستا Rezaei & Knight (2009) از روش SKM استفاده کردند و با جایگزین کردن شیب خط انرژی در آن، این روش را اصلاح کردند و برای آبراهه غیرمنشوری همگرا به کار بردند. Ervin et al. (2000) برای شناخت هیدرولیک جریان در آبراهه غیرمنشوری ماریچی از روش SKM استفاده کرده و با استفاده از یک ضریب (K) و جاگذاری توان دوم مولفه طولی سرعت در جمله مربوط به جریان ثانویه، تنش برشی مرزی را شبیه سازی و اظهار کردند که با لحاظ دقت کافی در انتخاب ضریب K می‌توان با استفاده از این روش، الگوی توزیع تنش برشی و سرعت میانگین عمقی را در آبراهه‌های ماریچی تعیین کرد. Bousmar & Zech (2004) با اذعان به این نکته که تاکنون محققان با در نظر گرفتن توزیع سرعت جانبی (LDM)، میانگین عمقی اندازه حرکت را در معادله‌های ناویه-استوکس در شرایط دائمی و یکنواخت به دست می‌آورند، از نتایج تحقیق Ervin et al. (2000) جهت توسعه LDM استفاده کرده و با مدل سازی یک آبراهه همگرا، جمله جریان ثانویه را برای حالت غیر یکنواخت در معادله‌های مربوطه وارد نموده و با عنوان روش توسعه یافته توزیع سرعت جانبی (ELDM) ارائه کردند. به رغم بررسی‌های بسیاری که در زمینه هیدرولیک آبراهه مرکب غیرمنشوری انجام شده است، به وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها به طور همزمان، به اندازه کافی پرداخته نشده است و رفتار جریان در آن، با توجه به اهمیت بسیاری که در طبیعت دارد، نیاز به شناخت و بررسی بیشتری دارد. در این تحقیق این موضوع با استفاده از مدل سازی آزمایشگاهی یک آبراهه مرکب بتنی همگرا و دارای پوشش گیاهی مستغرق در سیلابدشت‌ها مورد بررسی و ساختار جریان در آن ارزیابی شده است.

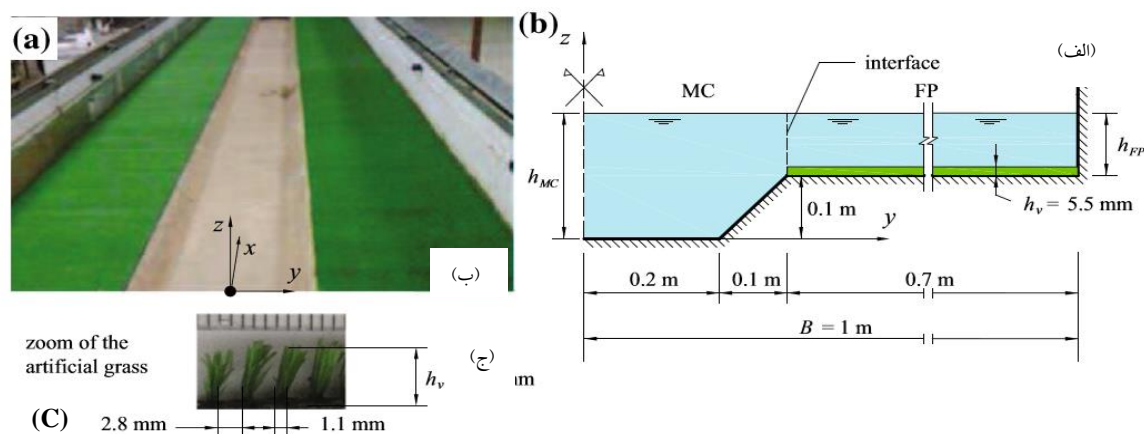
که محققان مزبور در سال ۱۹۹۱ با لحاظ تاثیر جریان ثانویه پژوهش خود را توسعه و نشان دادند که جریان‌های ثانویه در محاسبه توزیع تنش برشی به ویژه با وجود زبری در سیلابدشت‌ها نقش بسیار مهمی در رفتار جریان دارند. این مدل با نشانه اختصاری SKM نشان داده می‌شود. در نتیجه تفاوت چشم‌گیر در زبری آبراهه اصلی و سیلابدشت، ساختار جریان در مقطع‌های مرکب با پوشش گیاهی بسیار پیچیده تر می‌شود زیرا که نیروی کشانه ناشی از پوشش گیاهی موجب افزایش مقاومت کلی جریان، کاهش تنش برشی بستر و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال بار بستر و افزایش تله اندازی و نشست رسوب می‌شود (Wu and He, 2009). در راستای شناخت اثرات پوشش گیاهی در سیلابدشت، Zavistoski (1994) از چندین عنصر چوبی برای شبیه سازی استفاده کرد و با بررسی ساختار جریان و آشفستگی در آن نتیجه گرفت که افزایش تراکم پوشش گیاهی منجر به تداخل گردابه‌های پشت میله‌ها و ایجاد جریان برشی قوی و همچنین مولفه عمودی سرعت جریان می‌شود که منجر به افزایش شدت آشفستگی‌های عمودی و افقی می‌شود. Sun & Shiono (2009) با ایجاد یک ردیف پوشش گیاهی در سیلابدشت یک آبراهه مرکب مستطیلی مستقیم، تنش برشی مرزی و توزیع عرضی سرعت را بررسی کردند و برای عامل اصطکاکی در حضور پوشش گیاهی و بدون آن رابطه جدیدی ارائه کردند. Tang & Knight (2009) و Sterling et al. (2011) با استفاده از روش‌های تحلیلی یک روش برای پیش بینی سرعت میانگین عمقی در آبراهه مرکب با پوشش گیاهی مستغرق در سیلابدشت‌ها ارائه دادند و با اضافه کردن یک جمله به معادله‌های اندازه حرکت به عنوان منبع، نیروی دراگ ناشی از حضور پوشش گیاهی را در مدل سازی منظور کردند. در رودخانه‌های طبیعی افزون بر وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها، بدلیل تغییر مقطع رودخانه، جریان نایکنواخت می‌باشد که شناخت آن مستلزم بررسی و ارزیابی بسیاری است. در مقطع‌های منشوری، تنش برشی در مرز اتصال آبراهه اصلی و سیلابدشت، ظرفیت انتقال و الگوی توزیع سرعت را به طور چشمگیری تحت تاثیر قرار می‌دهد. این اثر در مقطع‌های غیرمنشوری بدلیل انتقال اندازه

## ۲- مواد و روش ها

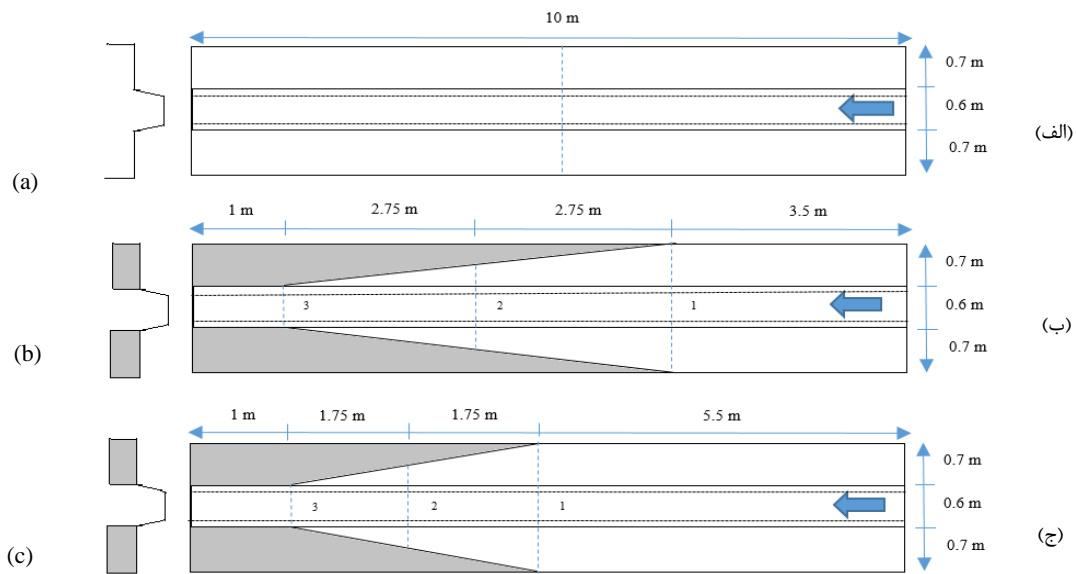
### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی و روش های آزمایش

آزمایش ها توسط نویسندگان در یک فلوم متقارن به طول ۱۰ متر و عرض ۲ متر در آزمایشگاه ملی مهندسی عمران (LNEC) در کشور پرتغال شهر لیسبون انجام شده اند. مقطع عرضی آبراهه دارای دو سیلابدشت مستطیلی با عرض ۰/۷ متر ( $B_{fp}=0.7\text{ m}$ ) و یک آبراهه اصلی دوزنقه ای شکل با عرض کف ۰/۴ متر ( $b_{mc} = 0.4\text{ m}$ ) و شیب جانبی ۴۵ درجه ( $s_y = 1$ ) می باشد. کف و دیواره های آبراهه اصلی از بتن با ضریب زبری  $n = 0.0092\text{ m}^{-1/3}$  تشکیل شده و شیب طولی آبراهه ۰/۰۱۱ می باشد. سیلابدشت ها با علف مصنوعی به ارتفاع ۵ میلی متر و ضریب زبری  $n=0.0172$  پوشیده شده اند. برای آبراهه اصلی و سیلابدشت ها، ورودی های دبی به صورت مجزا برقرار شده است. به طوری که دبی در بالادست از دو شیرفلکه جداگانه به آبراهه اصلی و سیلابدشت ها وارد شده و جریان می یابد. کنترل دبی جریان توسط دو شیر فلکه بوده که در نمایشگر الکترومغناطیسی دبی سنج قابل تنظیم می باشد. در پایین دست فلوم، دریچه های انتهایی مستقلی برای هر یک از بخش های آبراهه کار گذاشته شده است تا سطح ارتفاع آب در طول آبراهه برای هر یک از زیربخش ها قابل تنظیم باشد. اندازه گیری ها برای حالت منشوری و غیر منشوری در دو عمق نسبی (نسبت عمق آب در سیلابدشت به عمق آب در آبراهه اصلی) ۰/۲۱ و ۰/۳۱ انجام گرفته است. برای ایجاد عمق نسبی ۰/۲۱، دبی و عمق آب در سیلابدشت ۴۶/۶

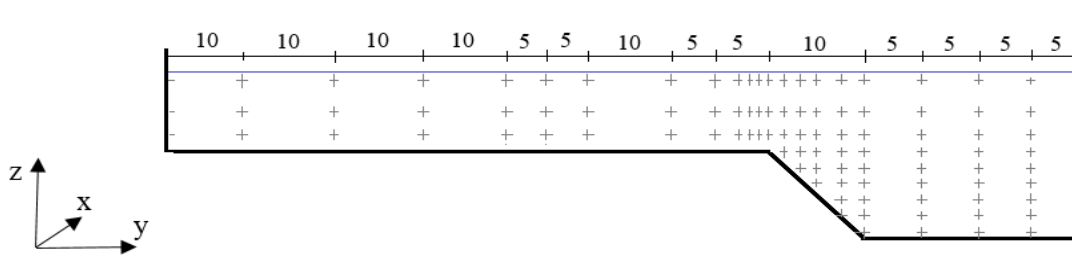
لیتر بر ثانیه و ۰/۲۴ متر و برای عمق نسبی ۰/۳۱، حدود ۵۸/۹ لیتر بر ثانیه و ۰/۴۵ متر تنظیم شده اند. در آبراهه منشوری مقطعی در  $x=7.5\text{ m}$ ، محلی که لایه مرزی و لایه اختلاط به طور کامل گسترش یافته اند (Fernandes, 2014)، برای اندازه گیری انتخاب شده است. شکل ۱ پلان آبراهه را، نیمه مقطع عرضی آن و عنصری از پوشش گیاهی سیلابدشت را با جزئیات و اندازه های آن نشان می دهد. در آزمایش های آبراهه غیر منشوری دو زاویه همگرایی  $\theta = 11.3^\circ$ ،  $\theta = 7.25^\circ$  روی سیلابدشت اجرا شده اند که عمق های نسبی یاد شده در وسط هریک از زاویه های همگرایی توسط تنظیم های دریچه های انتهایی ایجاد شده اند. شکل ۲ آبراهه منشوری و غیر منشوری را با زاویه های ایجاد شده روی سیلابدشت را نشان می دهد. در آبراهه غیر منشوری اندازه گیری ها در سه مقطع ابتدایی، میانه و انتهایی همگرایی انجام گرفته اند که در این تحقیق نتایج مقطع های ابتدایی و میانی در یک نیمه آبراهه ارائه شده است. اندازه گیری سرعت جریان با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی داپلر (ADV) با سنجنده جانبی آن (Vectrino side looking)، که قابلیت اندازه گیری در نقطه های نزدیک به کف را دارد، انجام گرفته است. با بسامد ۲۰۰ هرتز، مدت زمان اندازه گیری برای نقطه های نزدیک به محل اتصال آبراهه اصلی به سیلابدشت ۵ دقیقه و برای نقطه های دیگر ۳ دقیقه منظور شده است. شکل ۳ نقطه های مش بندی مقطع را برای اندازه گیری سرعت و تنش نشان می دهد. جدول ۱ شرایط کلی جریان را نشان می دهد که



**Fig. 1** (a) Cross section of channel, (b) Plan Photograph, (c) FloodPlain vegetation element by details  
 شکل ۱ (الف) مقطع عرضی، (ب) عکس از پلان آبراهه، (ج) عنصری از پوشش گیاهی سیلابدشت با جزئیات و اندازه ها



**Fig. 2** Channel geometry (a) Prismatic, (b) Non-Prismatic for convergent angle of  $\theta=7.25^\circ$ , (c) convergent angle of  $\theta=11.3^\circ$ . شکل ۲ ویژگی‌های هندسی آبراهه (الف منشوری، ب) و (ج) غیر منشوری به ترتیب برای زاویه‌های همگرایی  $\theta=7.25^\circ$  و  $\theta=11.3^\circ$ .



**Fig. 3** The Cross section measurement mesh points used by Vectrino (ADV). (Distances by Cm) شکل ۳ نقطه‌های مش بندی مقطع برای اندازه‌گیری سرعت و تنش توسط Vectrino (ADV). (فاصله‌ها برحسب Cm)

رابطه  $Re_i=4U_iR_i/\nu$  محاسبه شده است که  $R$  شعاع هیدرولیکی و  $\nu$  لزجت سینماتیکی می باشد.

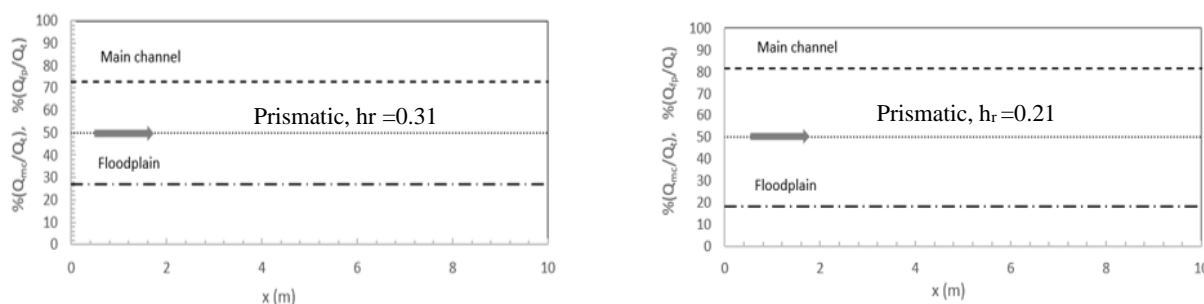
در آن  $Q_{fp}$  و  $Q_{mc}$  به ترتیب نشانگر دبی آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت و فراسنجه  $h_r = h_{fp}/h_{mc}$  نشانگر عمق نسبی جریان می‌باشد. عدد فرود و رینولدز نیز برای هر کدام از زیر بخش‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند. عدد فرود برای کل مقطع مرکب از رابطه Blalock & Sturm (1981) و برای زیربخش‌ها از رابطه  $Fr_i=U_i/(gR_i)^{1/2}$  و عدد رینولدز نیز از

### ۳- بحث و بررسی

با افزایش تراز سطح آب از آبراهه اصلی و ورود آن به سیلاب‌دشت‌ها، بخشی از جریان توسط سیلاب‌دشت‌ها

**جدول ۱** ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت  
**Table 1** Flow Hydraulic characteristics in main channel and floodPlain

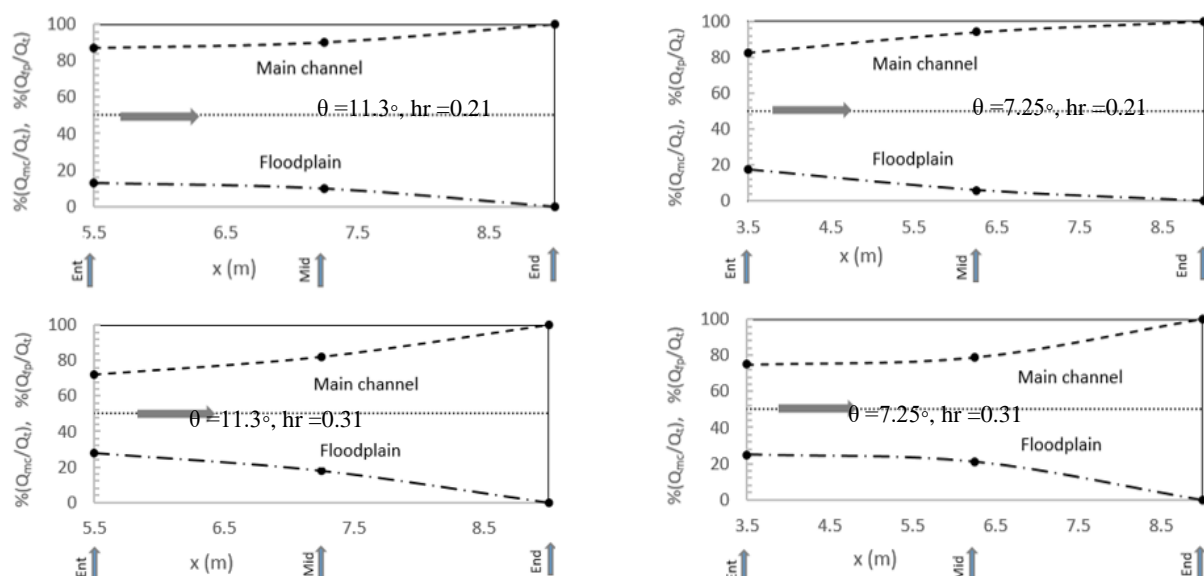
Channel type	Name of Test	angel	$h_r$ (-)	$h_{fp}$ (m)	$Q$ (l/s)	$Q_{mc}$ (l/s)	$Q_{fp}$ (l/s)	$Fr_{mc}$	$Fr_{fp}$	$Fr_t$	$Re_{mc} (x10^5)$	$Re_{fp} (x10^5)$
Prismatic	P_0_0.21	$\theta_0$	0.21	0.024	46.6	39.3	7.3	0.63	0.44	0.60	2.28	0.20
	P_0_0.31	$\theta_0$	0.31	0.045	58.9	42.3	16.6	0.52	0.41	0.49	2.45	0.44
Non-Prismatic	NP_7.25_0.21	$\theta_{7.25}$	0.21	0.024	46.6	39.3	7.3	0.63	0.93	0.67	2.28	0.38
	NP_7.25_0.31	$\theta_{7.25}$	0.31	0.045	58.9	42.3	16.6	0.52	0.84	0.61	2.45	0.84
	NP_11.3_0.21	$\theta_{11.3}$	0.21	0.024	46.6	39.3	7.3	0.63	0.93	0.67	2.28	0.38
	NP_11.3_0.31	$\theta_{11.3}$	0.31	0.045	58.9	42.3	16.6	0.52	0.84	0.61	2.45	0.84



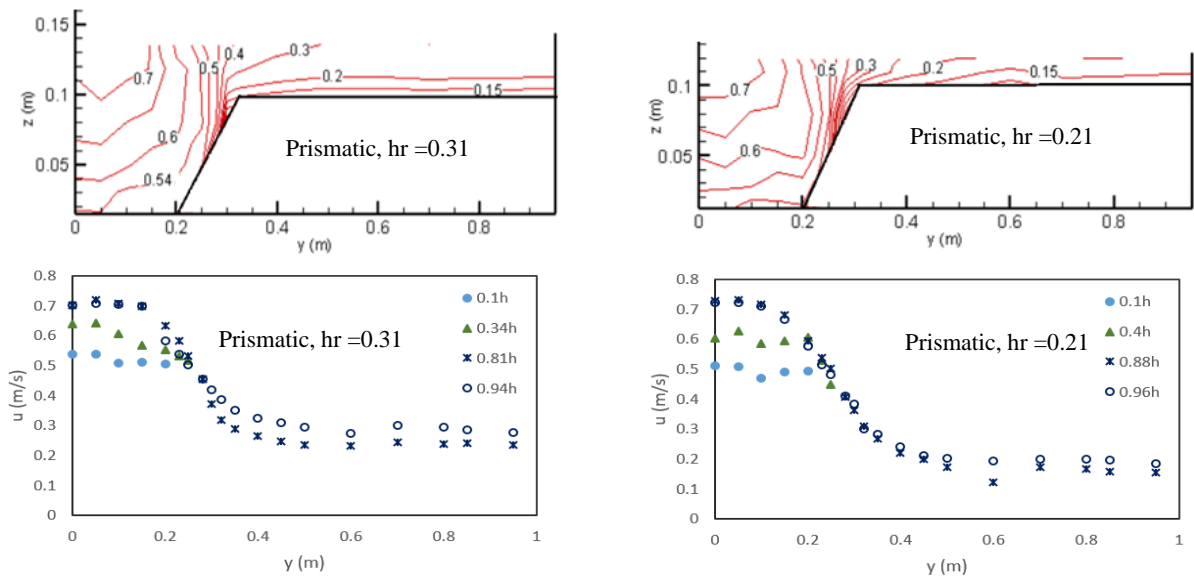
**Fig. 4** Discharge division percentile carried by main channel and floodplains, prismatic channel,  $h_r=0.21, 0.31$   
 شکل ۴ درصد تقسیم دبی عبوری از سیلابدشت و آبراهه اصلی در آبراهه منشوری برای عمق‌های نسبی ۰/۲۱ و ۰/۳۱.

همگرایی  $\theta = 11/3^\circ$  نیز در مقطع ورودی همگرایی میزان مشارکت سیلابدشت‌ها در انتقال دبی عبوری، ۱۵ درصد و در مقطع میانی ۸ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج نشانگر این است که با افزایش زاویه همگرایی، به ازای عمق نسبی بیشتر، سیلابدشت‌ها در مقطع میانی تمایل کمتری به مشارکت در عبور دبی دارند. نتایج تحقیق آزمایشگاهی Rezaei (2006) که در یک آبراهه مرکب بدون پوشش گیاهی و در سه زاویه همگرایی  $1/9^\circ$ ،  $3/81^\circ$  و  $11/3^\circ$  درجه انجام گرفته است، نشان داد که در یک عمق نسبی مورد نظر، با افزایش زاویه همگرایی، سهم جریان روی سیلابدشت کاهش و در آبراهه اصلی افزایش می‌یابد. اما این نتیجه با مشاهده‌های حاصل از این تحقیق همخوانی کاملی ندارد. ناهمخوانی نتایج، نشان‌گر سهم زبری ناشی از پوشش گیاهی در انتقال مومنتوم میان آبراهه اصلی و

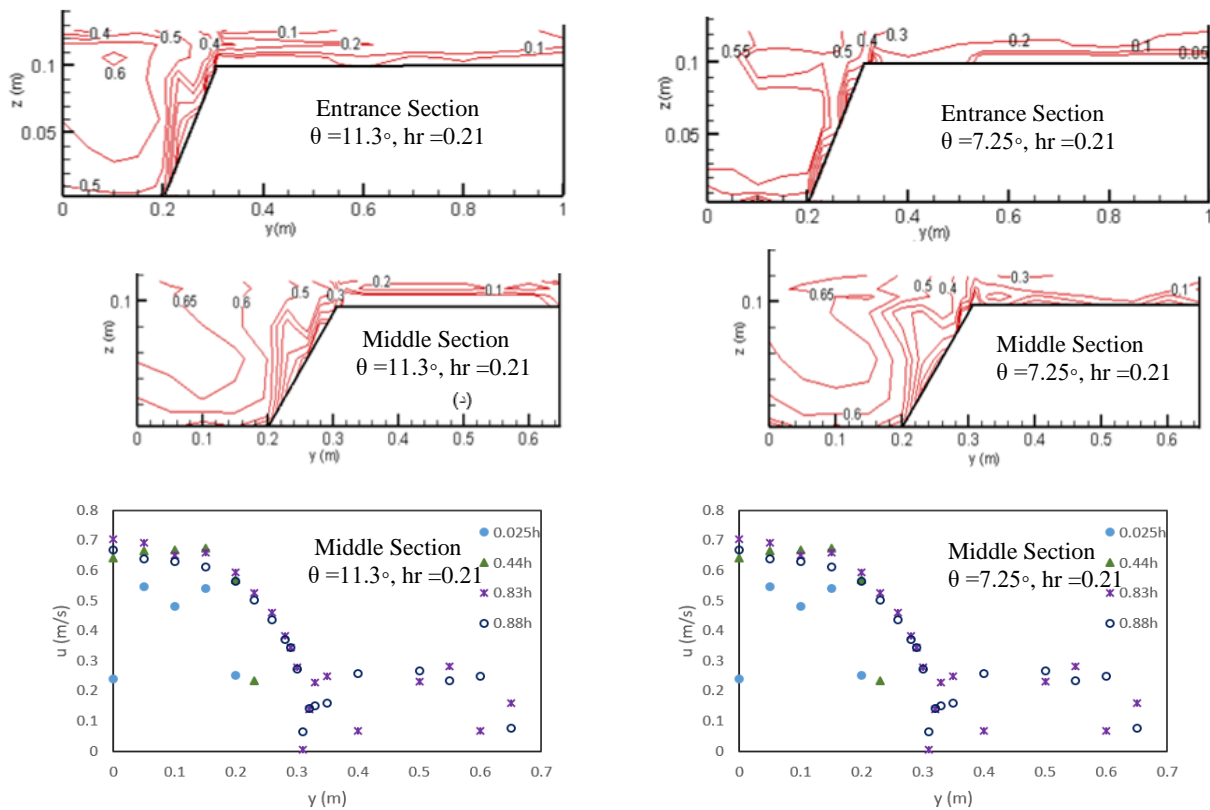
انتقال پیدا می‌کند. برای تعیین درصد حمل و عبور جریان توسط سیلابدشت‌ها و آبراهه اصلی در طول آبراهه، بر مبنای نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری سرعت در هر جز گستره از مش بندی، تقسیم‌های دبی در بخش‌های آبراهه برای عمق‌های نسبی ۰/۲۱ و ۰/۳۱ در حالت منشوری (شکل ۴) و غیر منشوری برای زاویه‌های همگرایی  $7/25^\circ$  و  $\theta = 11/3^\circ$  ایجاد شده بر روی سیلابدشت‌ها (شکل ۵) نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که در آبراهه منشوری با افزایش عمق نسبی از ۰/۲۱ به ۰/۳۱، میزان مشارکت سیلابدشت‌ها در انتقال دبی عبوری در حدود ۹ درصد افزایش می‌یابد. شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که در آبراهه غیرمنشوری، در زاویه همگرایی  $\theta = 7/25^\circ$ ، همراه با افزایش عمق نسبی، در مقطع ورودی همگرایی ۷/۵ درصد و در مقطع میانی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. در زاویه



**Fig. 5** Discharge division percentile carried by main channel and floodplains, non-prismatic channel at  $\theta = 7.25^\circ, 11.3^\circ$   
 شکل ۵ درصد تقسیم دبی عبوری از سیلابدشت و آبراهه اصلی در طول آبراهه غیرمنشوری برای  $\theta = 11/3^\circ$  و  $\theta = 7/25^\circ$



**Fig. 6** Isovel contours and profiles of streamwise mean velocity component ( $U$ ) in prismatic channel at  $h_r=0.21$  and  $0.31$  شکل ۶ خط‌های هم سرعت و نیمرخ میانگین مؤلفه طولی سرعت جریان ( $U$ ) در عمق‌های نسبی  $0.31/0$  و  $0.21/0$  در آبراهه منشوری



**Fig. 7** Isovel contours and profiles of streamwise mean velocity in non-prismatic channel, entrance and middle,  $h_r=0.21$  شکل ۷ خط‌های هم سرعت و نیمرخ میانگین مؤلفه طولی سرعت جریان، در مقطع‌های ابتدایی و میانی زاویه‌های همگرایی در عمق نسبی  $0.21/0$

شکل‌های ۷ و ۸ نیز توزیع سرعت  $U$  برای مقطع‌های آغازی و میانه همگرایی در دو زاویه  $7/25$  و  $11/3$  در عمق‌های نسبی یادشده به ترتیب نشان داده شده است. اغلب

سیلاب‌دشت‌هاست. شکل ۶ حالت‌هایی از توزیع میانگین مؤلفه طولی سرعت جریان را به ترتیب برای دو عمق نسبی  $0.31/0$  و  $0.21/0$  در آبراهه منشوری نشان می‌دهد. در



جریان روی سیلابدشت‌ها به تقریب دو بعدی است در حالی که در آبراهه اصلی و به‌ویژه در اعماق نسبی پایین، جریان سه بعدی است. این مسئله در زاویه‌های همگرایی مختلف نیز تاثیر داشته است. به‌طوری که با افزایش زاویه همگرایی از ۷/۲۵ درجه به ۱۱/۳ درجه، دو بعدی بودن جریان در سیلابدشت و سه بعدی بودن آن در آبراهه اصلی بیشتر نمایان می‌شود. همچنین در مقایسه مقطع‌های ابتدایی و میانه همگرایی در هر کدام از زاویه‌ها، مشخص می‌شود که مقطع‌های میانی تحت تاثیر بیشتری نسبت به مقطع‌های ابتدایی قرار گرفته‌اند. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که بیشینه سرعت جریان در نزدیکی دیواره بیرونی آبراهه اصلی رخ می‌دهد. اما با افزایش عمق نسبی، موقعیت حداکثر سرعت جریان به سمت میانه آبراهه جا به جا می‌شود. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که در عمق نسبی پایین تر، در نزدیکی مرز مشترک سیلابدشت و آبراهه اصلی، یک برآمدگی در منحنی‌های هم سرعت جریان مشاهده می‌شود که در تحقیقات گذشته نیز مانند (Joung & Choi 2008) وجود آن گزارش شده است. این برآمدگی در هر دو زاویه،

تحقیقاتی که تاکنون در ارتباط با پوشش گیاهی در آبراهه‌های مرکب انجام شده است، نشان‌گر این بوده است که وجود پوشش گیاهی در هر مقدار از عمق نسبی، منجر به کاهش چشم‌گیری در سرعت جریان روی سیلابدشت می‌شود و حتی با توجه به تحقیقات پیشین، میزان مطلق سرعت جریان در آبراهه اصلی نیز در حالت بدون پوشش گیاهی بسیار بزرگ‌تر از میزان متنظر برای حالت با پوشش گیاهی گزارش شده است. علت آن می‌تواند افزایش زبری، مقاومت جریان و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال توسط آبراهه بدلیل وجود پوشش گیاهی به ازاء یک عمق نسبی معین باشد. در مقایسه بین مقطع‌های همانند در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نسبی، شدت اندرکنش جریان بین سیلابدشت و آبراهه اصلی کاهش می‌یابد. به این صورت که با افزایش عمق نسبی، تاثیر پوشش گیاهی بر میزان کاهش ظرفیت انتقال جریان توسط آبراهه نیز کاهش می‌یابد. همچنین در مقایسه این شکل‌ها مشاهده می‌شود که به استثنای ناحیه‌های نزدیک به جدار و همچنین در مرز مشترک آبراهه اصلی و سیلابدشت،

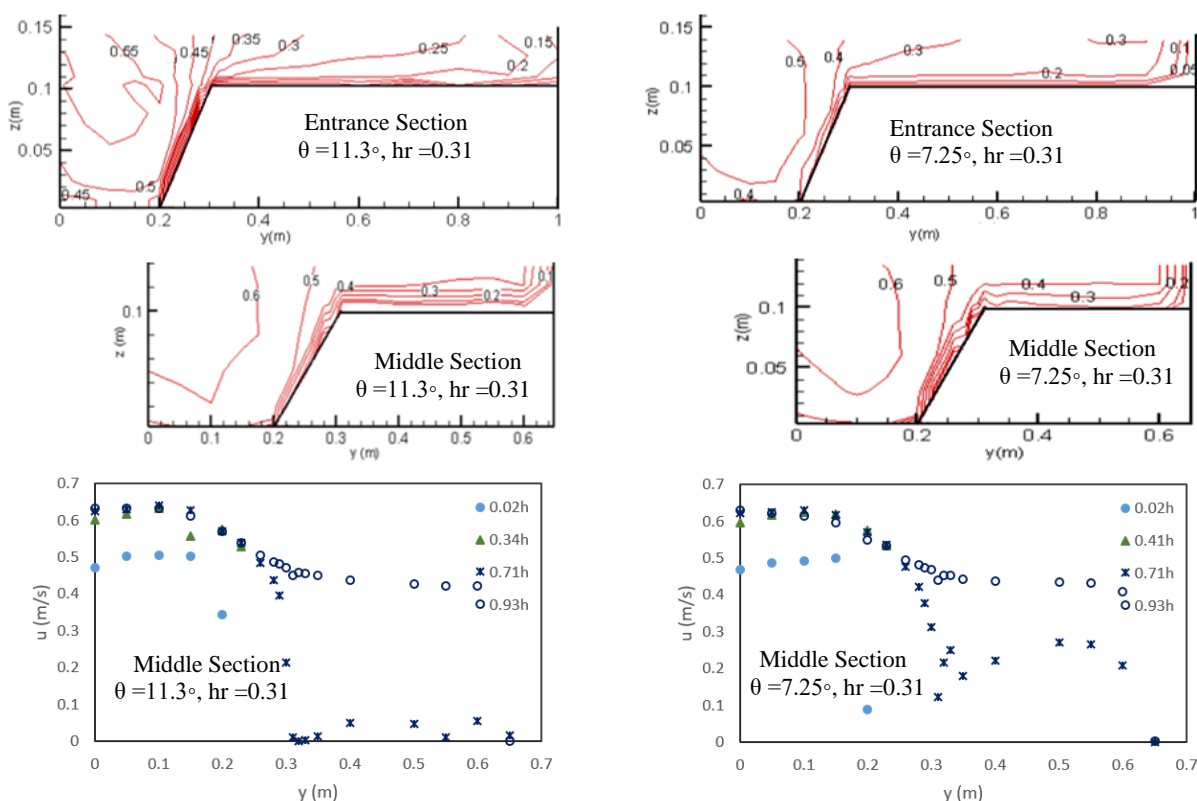
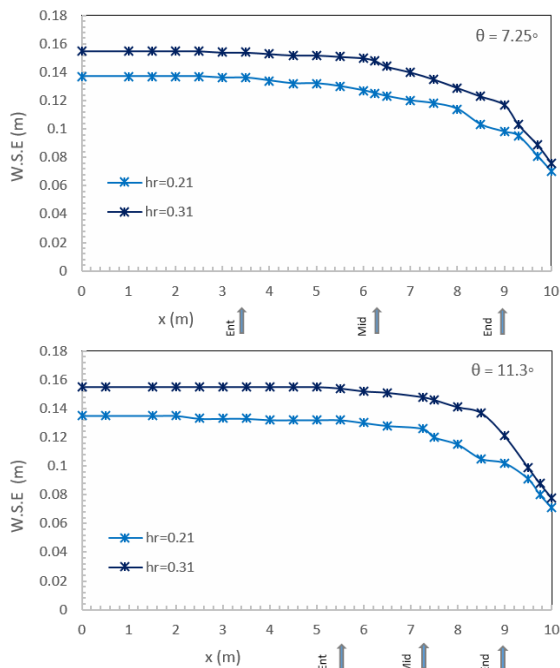


Fig. 8 Isovel contours and profiles of streamwise mean velocity in non-prismatic channel, entrance and middle,  $h_r=0.31$

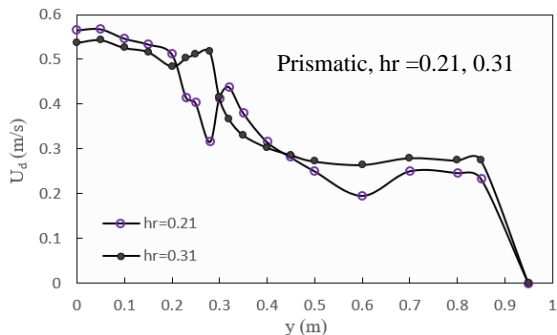
شکل ۸ منحنی‌های هم‌سرعت و نیم‌رخ میانگین مؤلفه طولی سرعت جریان، در مقطع‌های ابتدایی و میانی همگرایی در عمق نسبی ۰/۳۱

در شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های عرضی سرعت جریان میانگین‌گیری شده در عمق برای آبراهه منشوری و در شکل ۱۱ برای آبراهه غیرمنشوری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو زاویه همگرایی و به ازاء عمق‌های نسبی ۰/۲۱ و ۰/۳۱، میزان سرعت جریان میانگین در آبراهه اصلی همواره از سرعت جریان میانگین در سیلاب‌دشت بزرگ‌تر است.



**Fig. 9** Water surface profile based on measured depths in the main channel in  $h_r=0.21, 0.31$  at  $\theta=7.25^\circ, 11.3^\circ$

شکل ۹ نیم‌رخ سطح آب براساس عمق‌های اندازه‌گیری شده در آبراهه اصلی برای دو زاویه همگرایی ۷/۲۵ و ۱۱/۳ درجه



**Fig. 10** Cross sectional profile of depth averaged velocity, prismatic channel,  $h_r=0.21, 0.31$

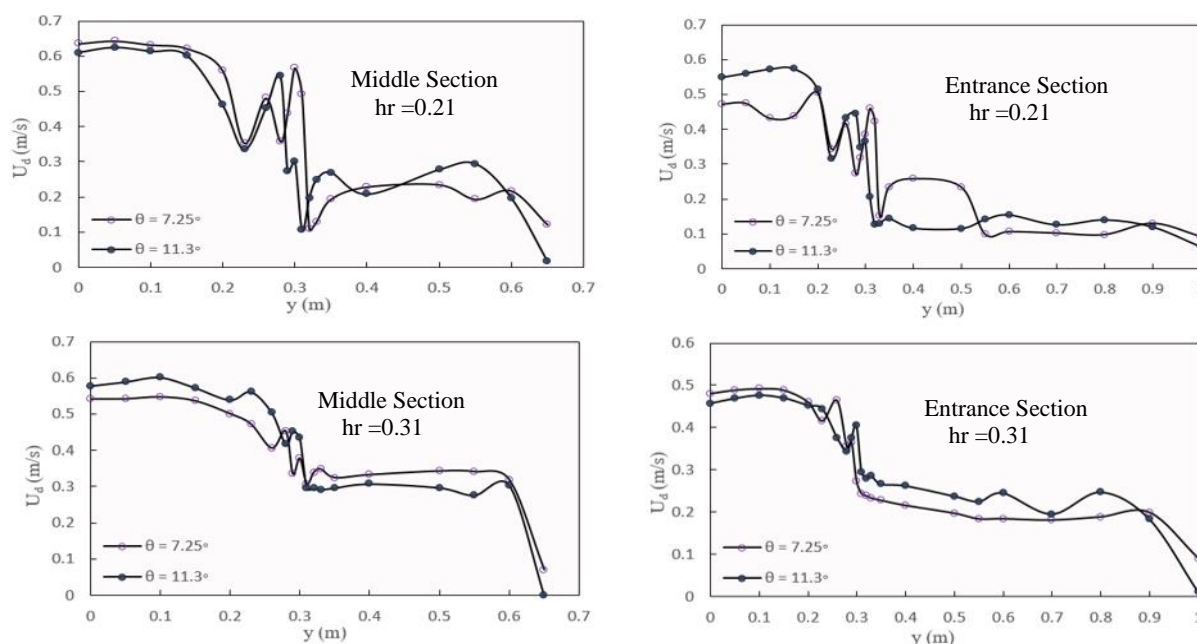
شکل ۱۰ نیم‌رخ عرضی سرعت جریان میانگین‌گیری شده در عمق در آبراهه منشوری برای عمق‌های نسبی ۰/۲۱ و ۰/۳۱.

در مقطع میانی نسبت به مقطع ابتدایی با شدت بیشتری رخ داده است. در مقایسه بین دو زاویه همگرایی نیز مشاهده می‌شود که هر چه زاویه همگرایی بزرگتر و در نتیجه طول همگرایی کمتر می‌شود شدت برآمدگی بیشتر می‌شود. این برآمدگی در نزدیکی مرز مشترک دشت سیلابی و آبراهه اصلی در خطوط سرعت که ناشی از کاهش سرعت جریان در این ناحیه است، در تحقیقات پیشین مانند Thomas & Williams (1995) و Bijad et al. (2010) گزارش شده است. این کاهش در سرعت جریان ممکن است در اثر انتقال جریان با اندازه حرکت کم به وسیله جریان‌های ثانویه از لایه‌های پایینی جریان باشد که Shiono & Knight (1991) آن را با برقراری جریان یکنواخت به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی کردند. شکل ۷ و ۸ نشانگر این است که در همه حالت‌ها، رخداد موقعیت بیشینه سرعت جریان، در مقایسه با آبراهه ساده، در فاصله به نسبت زیادی از سطح آب رخ می‌دهد که می‌تواند به علت جریان‌های ثانویه شدیدی باشد که در مقطع عرضی آبراهه رخ می‌دهد. یکی دیگر از نتایج تحقیق آزمایشگاهی Rezaei (2006) افزایش سرعت در طول همگرایی است که همخوانی کاملی با این تحقیق دارد. به طوری که برابر شکل‌های ۷ و ۸، میزان کلی سرعت در مقطع‌های میانی نسبت به مقطع‌های ابتدایی مانند خود بیشتر است. از سوی دیگر در این شکل‌ها نقطه‌هایی با سرعت‌های بسیار کم بر روی سیلاب‌دشت‌ها وجود دارد که چنین گرادیان بالایی در سرعت میان آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در نتایج تحقیق Rezaei (2006) مشاهده نمی‌شود. چنین مشاهده‌هایی، به ویژه در زاویه ۱۱/۳ درجه که با این تحقیق نیز مشترک است، تاثیر منحصر بفرد عامل پوشش گیاهی در گرادیان سرعت را نسبت به عامل همگرایی نشان می‌دهد. به این ترتیب که پوشش گیاهی با ایجاد زبری قابل توجه در سیلاب‌دشت‌ها، مانع عبور جریان در این نقطه‌ها می‌شود. شکل ۹ نیم‌رخ طولی سطح آب را بر مبنای عمق‌های اندازه‌گیری شده جریان در کل مسیر آبراهه و در وسط آبراهه اصلی برای دو زاویه همگرایی ۷/۲۵ و ۱۱/۳ درجه در دو عمق نسبی ۰/۲۱ و ۰/۳۱ نشان می‌دهد.

بسیار پایین تر است. آنچه که در این نمودار بایستی برقرار باشد پایین بودن میزان دبی (که از حاصل ضرب نمودار قائم در افقی ( $U_d \cdot Y$ ) در کل مقطع به دست می آید) در عمق نسبی کمتر نسبت به عمق نسبی بالاتر است. با در نظر گرفتن کل عرض مقطع در شکل ۱۰، مشخص است که این موضوع برای عمق نسبی ۰/۲۱ نسبت به ۰/۳۱ برقرار است.

همچنین در شکل ۱۱ مشخص است که گرادیان سرعت جریان میانگین روی سیلابدشت نسبت به آبراهه اصلی کمتر است و نشانگر این است که می توان جریان روی سیلابدشت را در حدود دو بعدی در نظر گرفت که پیشتر نیز به آن اشاره شد.

این اختلاف در سرعت، باعث ایجاد جریان برشی قوی در مرز مشترک میان آبراهه اصلی و سیلابدشت می شود که به بر پدیده هایی مانند انتقال آلاینده ها در مقطع های مرکب تاثیر زیادی دارند. از آنجایی که وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت، به طور فزاینده ای موجب افزایش اختلاف سرعت جریان میان آبراهه اصلی و سیلابدشت می شود، فرایند پخش عرضی و انتشار طولی آلاینده ها در این نوع آبراهه ها با شدت بیشتری انجام می گیرد. در قسمت اول از آبراهه اصلی، بالاتر بودن میزان سرعت در عمق نسبی ۰/۲۱ نسبت به ۰/۳۱ مربوط به ناپیکنواختی بسیار بالا در توزیع سرعت است که علت آن اثر توام پوشش گیاهی و همگرایی آبراهه است. به طوری که در اغلب نقطه ها دیگر، میزان آن



**Fig. 11** Cross sectional profile of depth averaged velocity, non-prismatic channel, Entrance and middle Sec.,  $h_r=0.21, 0.31$   
 شکل ۱۱ نیمرخ عرضی سرعت جریان میانگین گیری شده در عمق، آبراهه غیرمنشوری، مقطع های ابتدایی و میانی، ۰/۲۱ و ۰/۳۱

جریان میان آبراهه اصلی و سیلابدشت کاهش می یابد و رفتار آبراهه مرکب به آبراهه ساده تشابه می یابد، انتظار می رود با وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت، ویژگی های هیدرولیکی جریان در آبراهه مرکب در عمق های نسبی بالا نیز حفظ شود. در این تحقیق نیز برابر با شکل ۱۱، در عمق نسبی ۰/۳۱ اختلاف سرعت جریان میان آبراهه اصلی و سیلابدشت نسبت به مقطع های متناظر در عمق نسبی ۰/۲۱ کاهش داشته است که موید همین مطلب است. برابر شکل ۱۱ مشاهده می شود که در همه آزمایش ها، با فاصله

نکته قابل توجه در این نمودار تغییرپذیری های زیاد نیمرخ سرعت در عرض آبراهه می باشد که بیانگر این است که تاثیر جریان های ثانویه و انتقال اندازه حرکت بر آبراهه اصلی نسبت به سیلابدشت بیشتر است و گرادیان سرعت جریان بسیار زیاد و نامنظم در نزدیکی مرز مشترک سیلابدشت و آبراهه اصلی، گویای جریان های با مومنوم ضعیف است که به وسیله گرادیه های عمقی از لایه های پایینی جریان به لایه های بالاتر انتقال می یابند. با توجه به اینکه در آبراهه های مرکب با افزایش عمق نسبی، اختلاف سرعت

که در آن تنش برشی بستر و  $\rho$  چگالی آب است. شکل ۱۲ تغییرپذیریهای زبری در عرض آبراهه را در مقطعهای میانی همگرایی نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۲ مشخص است که به ازاء هر دو عمق نسبی با افزایش زاویه‌های همگرایی از  $7/25$  به  $11/3$  درجه، میزان زبری در آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش عمق نسبی از  $0/21$  به  $0/31$  و همچنین افزایش سرعت میانگین عمقی در هر جزء گستره از آبراهه اصلی نسبت به سیلاب‌دشت، از میزان این ضریب کاسه می‌شود. میانگین انرژی جنبشی جریان ( $MKE$ ) فراسنجه مهمی در بررسی آشفته‌گی جریان به شمار می‌رود.

گرفتن از دیواره آبراهه اصلی به سمت دیواره سیلاب‌دشت، نیمرخ کلی سرعت جریان روند کاهشی دنبال می‌کند اما در مرز مشترک آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت دارای یک کمینه موضعی است که با افزایش عمق نسبی از شدت آن کاسته می‌شود. کاهش موضعی سرعت جریان که در مقطعهای میانی هر دو زاویه همگرایی نسبت به مقطعهای ابتدایی آن شدیدتر است، به علت جریان‌های ثانویه قوی در این ناحیه می‌باشد.

توزیع عرضی ضریب زبری از رابطه زیر که با جایگذاری تنش برشی بستر در رابطه داری و ایسباخ به دست می‌آید، محاسبه می‌شود:

$$f = 8\tau_b / \rho(U_d^2) \quad (1)$$

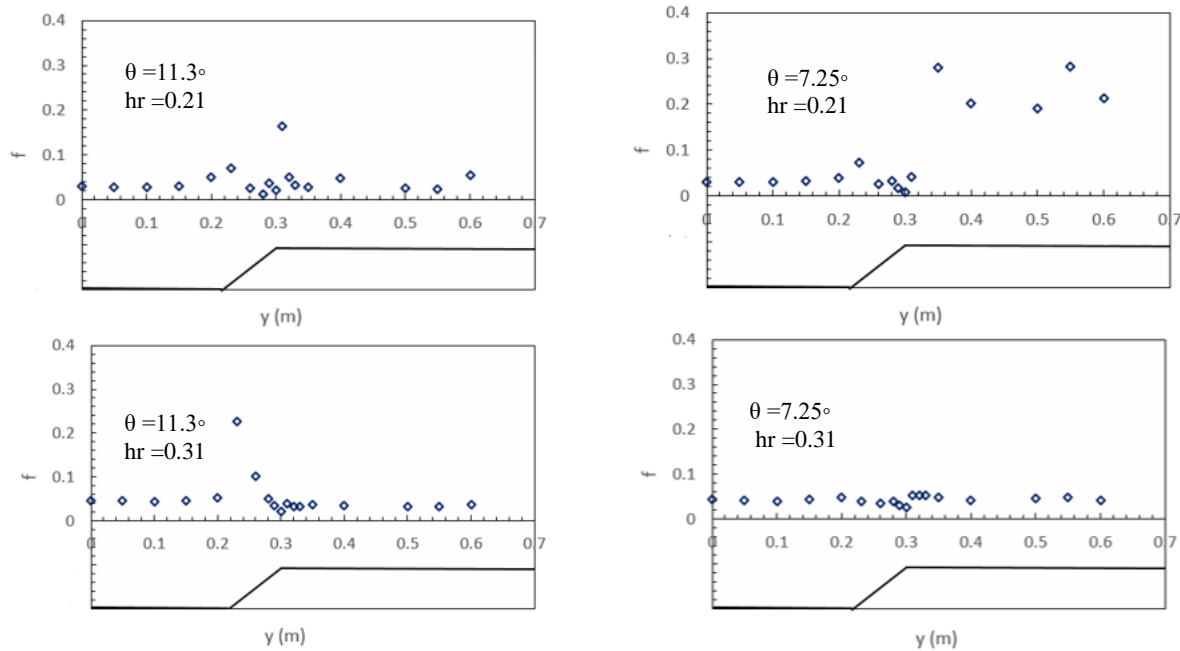


Fig. 12 Distribution of roughness coefficient,  $h_r=0.21$  and  $h_r=0.31$

شکل ۱۲ تغییرات عرضی ضریب زبری  $h_r=0.21$  و  $h_r=0.31$

برابر شکل ۱۳ روند تغییرپذیریهای عرضی فراسنجه  $MKE$  همسان با روند تغییرات سرعت جریان میانگین‌گیری شده در عمق (شکل ۱۱) است. زیرا مقدار مولفه طولی سرعت جریان در مقایسه با مولفه‌های عرضی و عمقی آن بسیار بزرگتر است و با توجه به تعریف فراسنجه  $MKE$  این روند مورد انتظار است. برابر شکل ۱۳ مشخص است که در همه‌ی آزمایش‌ها مقدار  $MKE$  در آبراهه اصلی نسبت به سیلاب‌دشت به‌طور چشمگیری بزرگتر است.

این فراسنجه به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$MKE = \frac{1}{2} \rho (\overline{U^2} + \overline{V^2} + \overline{W^2}) \quad (2)$$

که در آن  $U$ ،  $V$  و  $W$  به ترتیب مولفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان میانگین در هر نقطه است. تغییرپذیریهای عرضی این فراسنجه به‌صورت نرمال شده با میانگین سرعت برشی برای دو عمق نسبی  $0/21$  و  $0/31$  برای مقطعهای میانی زاویه‌های همگرایی  $7/25$  و  $11/3$  درجه در واحد جرم در شکل‌های ۱۳ نشان داده شده است.

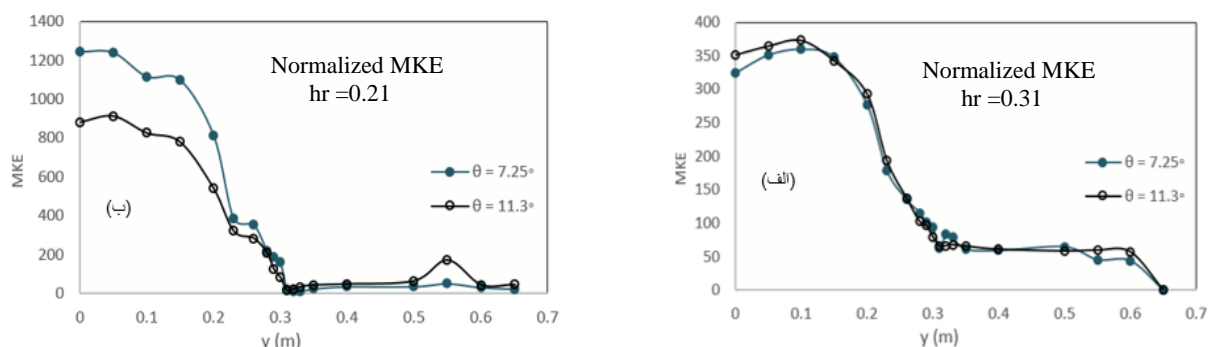


Fig. 13 Normalized mean kinetic energy per unit of mass in non-prismatic channel for  $h_r=0.21$  and  $0.31$

شکل ۱۳ میانگین انرژی جنبشی جریان نرمال شده در واحد جرم در آبراهه غیرمنشوری در عمق‌های نسبی ۰/۳۱ و ۰/۲۱.

منشوری و غیرمنشوری (دو زاویه همگرایی ۷/۲۵ و ۱۱/۳ درجه) با پوشش گیاهی مستغرق در سیلاب‌دشت‌ها بررسی و ارزیابی شده است. پوشش گیاهی از جنس علف مصنوعی مستغرق بوده و از داپلر صوتی برای اندازه‌گیری‌های سرعت و تنش برشی استفاده شده است. نتایج بررسی نشان دهنده این بوده است که حضور پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت‌ها با افزایش مقاومت جریان و اختلاف سرعت میان آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و همچنین تشکیل جریان نایکنواخت به‌علت همگرا بودن سیلاب‌دشت‌ها، باعث تغییرپذیری‌های چشمگیری در چگونگی تقسیم دبی، الگوی توزیع سرعت جریان، ساختار آشفتگی جریان، جریان‌های ثانویه و انتقال اندازه حرکت می‌شود. به‌طوری‌که نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه همگرایی از ۷/۲۵ به ۱۱/۳ درجه، دو بعدی بودن جریان در سیلاب‌دشت و سه بعدی بودن آن در آبراهه اصلی بیشتر نمایان می‌شود و مقطع‌های میانی تحت تاثیر بیشتری نسبت به مقطع‌های ابتدایی قرار می‌گیرند و بیشینه سرعت جریان که در محور میانی آبراهه اصلی اتفاق می‌افتد، با افزایش عمق نسبی و گسترش جریان‌های ثانویه، به سمت میانه آبراهه جا به جا می‌شود. افزایش سرعت در طول همگرایی آبراهه، همخوانی کاملی با تحقیقات پیشین که در شرایط همسان از لحاظ همگرایی و ناهمسان از نظر زبری (بدون پوشش گیاهی) انجام گرفته‌اند، دارد. لکن وجود نقطه‌هایی با سرعت نزدیک به صفر روی سیلاب‌دشت‌ها، نشان از گرادیان بالا در سرعت میان آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها دارد که نقش منحصر بفرد زبری ناشی از پوشش گیاهی را نسبت به تحقیقات مزبور نمایان می‌کند. به این ترتیب که پوشش گیاهی با

همچنین با افزایش عمق نسبی به ۰/۳۱، میزان  $MKE$  در مقطع‌های میانی برای هر دو زاویه همگرایی کاهش می‌یابد. در شکل ۱۴ نمودار دبی-اشل برای محور مرکزی آبراهه در مقطع میانی همگرایی رسم شده است. برابر این نمودار پیش از رسیدن عمق آب به لبه آبراهه اصلی، نقطه‌ها به‌صورت تقریبی بر روی یک خط قرار دارند اما با افزایش دبی و سرازیر شدن جریان در سیلاب‌دشت‌ها، افت انرژی قابل توجهی رخ می‌دهد و سطح آب در بیشترین دبی با افت بالایی روبه‌رو است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، وجود پوشش گیاهی ظرفیت انتقال دبی را در سیلاب‌دشت‌ها کاهش می‌دهد و سهم آبراهه اصلی را در انتقال دبی بیشتر می‌کند. این موضوع باعث جبران بخشی از افت سطح آب نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی می‌شود.

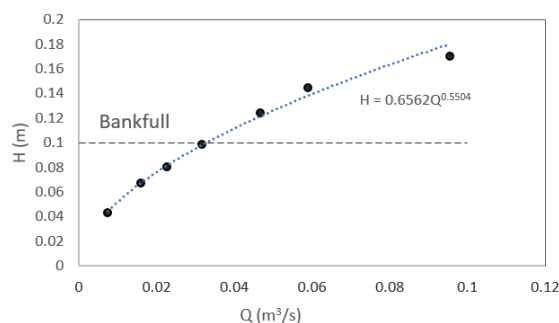


Fig. 14 Stage-Discharge curve for the center of main channel in the middle section of convergence.

شکل ۱۴ نمودار دبی-اشل برای محور مرکزی آبراهه در مقطع میانی همگرایی

#### ۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی، ساختار جریان برای عمق‌های نسبی ۰/۲۱ و ۰/۳۱ در آبراهه

Ervine, D.A., Babaeyan- Koopaei, K. and Sellin, R.H.J. (2000). Two-Dimensional solution for straight and meandering overbank flows, *Journal of Hydraulic Engineering, IAHR*, 126(9), 653-669.

Fernandes, J. N., Leal, J. B. and Cardoso, A.H. (2014). Improvement of the lateral distribution method based on the mixing layer theory. *J. Advances in Water Resources*, 69, 159-167.

Huai, W.X., Gao, M. and Zeng, Y. H. (2009). Two-dimensional analytical solution for compound channel flows with vegetated floodplains. *J. Applied Mathematics and Mechanics*, 30(9), 1121-1130.

Huang, B.S., Lai, G.W., Qiu, J. and Lin, S. Z. (2002). Hydraulics of compound channel with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulics*, 14, 23-28

Joung, Y. and Choi, S. (2008). Investigation of twin vortices near the interface in turbulent compound open-channel flows using DNS data. *J. Hydraulic Eng.* 134(12), 1744-1756.

Mohammadi, M. (2001a). Boundary shear stress around bridge piers, *Proceedings, World Water Resources Conference (WWRC2001)*, 22-24 May, Orlando, USA.

Mohammadi, M. (2001b). Boundary shear stress in a straight compound channel, *Proceedings, Conference on Hydraulics, Hydrology and Sustainable Water Resources Management: Advances in Research and Management*, 24-26 September, Kuala Lumpur, Malaysia.

Proust, S., Rivière, 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.

Rezaei, B. (2006). Overbank flow in compound channels with prismatic and non-prismatic floodplains. Ph.D. thesis, Univ. of Birmingham, Birmingham, UK.

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, IAHR*, 47(6), 716-726.

Shiono, K. and Knight, D.W. (1988). Two dimensional analytical solution for a compound channel. 3rd International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements. Japan, Tokyo.

Shiono, K. and Knight, D.W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press*, 222, 617-646.

Sterling, M., Knight, D.W. and Tang, X.N., (2011). Analytical model for streamwise velocity in

ایجاد زبری قابل توجهی در سیلابدشت‌ها، به منزله صفحه قائمی در برابر عبور جریان از این نقطه‌ها عمل می‌کند. بررسی چگونگی تقسیم بندی دبی جریان میان زیر بخش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زاویه همگرایی، به ازای عمق نسبی بیشتر، سیلابدشت‌ها در مقطع میانی نسبت به مقطع ابتدایی، تمایل کمتری به مشارکت در گذردهی دبی دارند. در مورد چگونگی تقسیم‌بندی دبی، ناهمخوانی کامل نتایج این پژوهش با تحقیقات مربوط به آبراهه‌های همگرا، نشانگر سهم قابل توجه زبری ناشی از پوشش گیاهی در انتقال مومنتوم میان آبراهه اصلی و سیلابدشت‌هاست. با افزایش عمق نسبی و همچنین افزایش سرعت میانگین عمقی در هر جزء گستره از آبراهه اصلی نسبت به سیلابدشت، از میزان ضریب زبری کاسته می‌شود و به ازاء عمق نسبی ثابت، با افزایش زاویه همگرایی میزان زبری در آبراهه اصلی و سیلابدشت افزایش می‌یابد. روند توزیع عرضی میانگین انرژی جنبشی جریان (*MKE*) نشان می‌دهد که در همه آزمایش‌ها میزان *MKE* در آبراهه اصلی به‌طور چشم‌گیری بزرگتر از میزان آن در سیلابدشت است و با افزایش عمق نسبی از ۰/۲۱ به ۰/۳۱، میزان *MKE* در مقطع‌های میانی، در هر دو زاویه همگرایی کاهش می‌یابد.

## ۵- منابع‌ها

Asgari, A., Mohammadi, M. and Manafpur, M. (2011). Flow discharge and energy grade-line in compound and river channels, *Proceedings, Journal of Water and Soil Science*, 21(1), 85-96. (In Persian)

Ayyoubzadeh, S.A. (1997). Hydraulic aspects of straight compound channel flow and bed load sediment transport, PhD Thesis, The University of Birmingham, England.

Behdarvandi Askar, M., Fathi Moghadam, M. and Mousavi Jahromi, H. (2013). Momentum exchange between main channel and flood plain using momentum and energy approaches. *Journal of Water Engineering*, 6(17), 1-14. (In Persian).

Blalock, M.E. and Sturm, T.W. (1981). Minimum specific energy in compound channel. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 107, 699-717.

Bousmar, D. and Zech, Y. (2004). Velocity distribution in non-prismatic compound channels. *Water Management*, 157(WM2), 99-108.

- straight open channel flows. *J. Hydr. Res., IAHR*, 27(1), 149-173.
- Wu, W. and He, Z. (2009). Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity. *International Journal of Sediment Research*, 24, 247-259.
- Yonesi, H., Omid, M.H. and Ayyoubzadeh, S.A. (2013). The hydraulics of flow in non-prismatic compound channel. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 396, 342-356.
- Zahiri, A., Ayyoubzadeh, S.A. and Dahanzadeh, B. (2009). Numerical solution of velocity lateral distribution in rivers (Case study: Karoun river at Molasani station). *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 16(2), 273-283. (In Persian)
- Zavistoski, R. (1994). Hydrodynamic effects of surface piercing plants. MSc. Thesis. Massachusetts Institute of Technology. Zong. USA.
- vegetated channels. *Engineering and Computational Mechanics*, 164(2), 91-102.
- 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, 430-438.
- Tang, X.N. 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.
- Thomas, T.G. and Williams, J.J.R. (1995). Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound open channel. *J. Hydraulic Res., IAHR*, 33(1), 27-41.
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H. (1989). Three-dimensional turbulent structure in