

Experimental Study of Flow in Prismatic Compound Channel with Inclined Floodplains

Saeed Derakhshandeh¹, Bahram Rezaei^{2*}

1- M.Sc. of Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

* b.rezaei@basu.ac.ir

Received: 1 May 2023, Accepted: 3 June 2023



J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: A compound channel usually consists of a main channel in the middle and one or two floodplains around it. The flow velocity in the main channel is higher than the floodplains, due to its greater depth and smaller roughness. This difference causes the formation of a shear layer at the interface between the main channel and floodplains (as shown by Sellin, 1964); Shiono and Knight, 1991; Tominaga and Nezu, 1991; Bousmar, 2002; and Rezaei, 2006). Tominaga and Nezu (1991), Rezaei (2006), and Sum (2007) investigated the velocity distribution in prismatic compound channels. Their observations showed that the highest flow velocity is below the free surface. In prismatic compound channels, as the relative depth increases, the difference between the velocity in the main channel and floodplains decreases. At high relative depths, the effect of the shear layer formed between the main channel and floodplains can be almost ignored (Knight et al., 2018). The maximum interactions between the main channel and floodplains have been observed in relative depths between 0.1 and 0.3 (Shiono and Knight, 1991; Rezaei, 2006). Investigations revealed that, so far, the effect of the floodplain's side slope in prismatic compound channels has not been investigated. The main objective of this research is the experimental study of the flow field in the prismatic compound channel with inclined floodplains.

Methodology: This research was carried out on the flume located in the hydraulic research laboratory of Bu-Ali Sina University. The flume is 18 meters long, 1.2 meters wide, and 0.6 meters deep with a bed slope of 1.63×10^{-3} . Figure 1 shows an overview of the research channel used in this research. In this flume, smooth and rigid boundaries were constructed using PVC material. As seen in Figure 2(b), the flume has a compound cross-section with a 0.4 m main channel wide, 0.05 m deep, and also two 0.4 m wide inclined floodplains (lateral slope of 0.075). The downstream end of the flume has an adjustable tailgate which is used to control the water surface profile and make uniform flow along the flume. In all experiments, the water surface profiles were measured using a pointer gauge with an accuracy of 0.1 mm. Velocity distributions were measured using an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) every 20 mm laterally and every 10 mm vertically (see Figure 3). The lateral distributions of boundary shear stress were also measured using a Preston tube (outer diameter 4 mm). The velocity distributions and boundary shear stress were measured for five discharges of 27, 30, 35, 40, and 45 lit/s.

Results and Discussion: The velocity distributions for different discharges are shown in Figure 4. From the figure, it is clear that in the vicinity of the junction edge, the isovel lines

bulge upward, and the velocity is decelerated, probably due to low mass and momentum exchanges in this region. Near the main channel walls ($0.1 \text{ m} < y < 0.18 \text{ m}$), the isovel lines bulge downward, and the velocity is accelerated. Also, near the middle of the main channel ($0 < y < 0.1 \text{ m}$), the isovel lines bulge upward, and flow is decelerated due to flowing away from the main channel bed.

As seen in Figure 3, the flume cross-sectional area was divided into subareas. The point velocity distributions were integrated numerically over the local water depth at each subarea to get the streamwise depth-averaged velocity. The results of depth-averaged velocity calculations for different relative depths are shown in Figure 5. In order to investigate the effect of the floodplain's side slope on the velocity distribution, the depth-averaged velocity has been normalized (U_d/U_m) and compared to Rezaei's Data (see Figure 7). The normalized depth-averaged velocities in the main channel, are almost equal to Rezaei's data (with some fluctuations). While on the floodplains, those velocities are less than Rezaei's Data (velocity in compound channels with flat floodplains).

Boundary shear stress is used in river engineering and in studies related to riverbed protection and sediment transport. The boundary shear stress distributions for different discharges are measured and shown in Figure 8. As seen in Figure 8, the bed shear stress distribution follows the same pattern as the depth-averaged velocity.

The apparent shear forces at the vertical interface between the main channel and floodplains can be calculated using the momentum equation for a control volume in the main channel (see Figure 12). The results of the apparent shear force calculation show that by increasing discharge or relative depth, the apparent shear force increases and reaches its peak value at a relative depth of 0.363 (see Table 3). The apparent shear forces expressed as a percentage of the total channel shear force on the vertical interface are shown in Figure 13. From Figure 13, it can be seen that the percentage of apparent shear forces at the interface between the main channel and floodplains are always smaller than those values in the compound channel with flat floodplains.

Conclusion: In this research, the flow field, including the velocity and bed shear stress distribution, in a prismatic compound channel with inclined floodplains (side slope 0.075) has been studied, experimentally. The results of experiments have been also compared with Rezaei's data. The most important results obtained from this research are as follows:

The depth-averaged velocity and boundary shear stress distributions follow the same pattern. Both of them show almost uniform flow in the main channel with some fluctuations. While in the flood plains, they are non-uniform with an extreme decreasing trend. In the main channel, the normalized depth-averaged velocity and normalized boundary shear stress are almost similar to Rezaei's Data. While on floodplains, the normalized velocity and shear stress are non-uniform and less than Rezaei' data. The study also shows that the apparent shear force at the interface between the main channel and floodplains increases with the increasing relative depth and reaches a peak value at the relative depth of 0.3. The same observations were made by Shiono and Knight (1991), and Rezaei (2006).

Keywords: Prismatic Compound Channel, Inclined Floodplains, Velocity Distribution, Boundary Shear Stress Distribution, Apparent Shear Force.



© 2023 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/>)

بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی جریان در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل

سعید درخشنده^۱، بهرام رضائی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

* b.rezaei@basu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: بررسی و ارزیابی تجربی میدان جریان در آبراهه‌های مرکب می‌تواند در پیش بینی رفتار رودخانه‌ها در زمان سیلاب، به مهندسان هیدرولیک کمک کند. در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی میدان جریان شامل نمودارهای منحنی‌های هم‌سرعت، توزیع عرضی سرعت میانگین در عمق، توزیع عرضی تنش برشی مرزی و تنش برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها در یک آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های به عرض ۴۰۰ میلی‌متر و شیب جانبی ۰/۰۷۵ (زاویه ۴/۲۹ درجه) بررسی و ارزیابی شود. برای این منظور پس از برقراری جریان یکنواخت برای پنج عمق نسبی مختلف ۰/۲۷۰، ۰/۳۱۶، ۰/۳۶۳ و ۰/۳۹۳ (متناظر با دبی‌های ۲۷، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه) سرعت‌های نقطه‌ای با استفاده از سرعت سنج صوتی داپلر (ADV) اندازه‌گیری شده است. تنش برشی مرزی نیز با استفاده از لوله پرستون اندازه‌گیری شده است. در برخی مرحله‌ها نتایج بدست آمده از این پژوهش با داده‌های موجود در آبراهه‌های مرکب منشوری با سیلابدشت‌های به عرض ۴۰۰ میلی‌متر ولی بدون شیب عرضی مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل نیز بیشترین نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین جریان در آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها در محدوده عمق نسبی حدود ۰/۳ رخ می‌دهد.

کلیدواژگان: آبراهه مرکب منشوری، سیلابدشت‌های مایل، توزیع سرعت، توزیع تنش برشی مرزی، نیروی برشی ظاهری

۱- مقدمه

گردابه‌هایی با محور قائم در این ناحیه می‌شود. در نتیجه تشکیل این گردابه‌ها جرم و اندازه حرکت بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها مبادله می‌شود (Sellin, 1964; Shiono and Knight, 1991; Tominaga and Nezu, 1991; Bousmar, 2002; Rezaei, 2006). Sellin (1964) نخستین محققى بود که به‌صورت آزمایشگاهی، جریان در آبراهه‌های مرکب را بررسی و شکل‌گیری گردابه‌های سطحی در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها را مشاهده کرد. در نیمهٔ دههٔ ۸۰ میلادی به‌منظور بررسی و ارزیابی جریان در آبراهه‌های مرکب به‌صورت تجربی، تجهیزات آزمایشگاهی بزرگ مقیاسی با عنوان FCF (Flood Channel Facility) در مرکز تحقیقات هیدرولیک والینگفورد واقع در کشور

در چند دهه اخیر، بررسی ویژگی‌های جریان در آبراهه‌های مرکب مورد توجه محققان هیدرولیک بوده است. در زمان سیلاب و با افزایش تراز سطح آب در رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی، جریان مازاد آب وارد سیلابدشت‌ها شده و آبراهه‌ای با مقطع مرکب تشکیل می‌دهد. آبراهه مرکب اغلب از یک آبراهه اصلی در وسط و یک یا دو سیلابدشت در پیرامون آن تشکیل شده است. سرعت جریان در آبراهه اصلی بدلیل عمق بزرگتر و زبری کوچکتر بیشتر از سرعت جریان در سیلابدشت‌هاست. همین اختلاف سرعت سبب شکل‌گیری یک لایه برشی در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها و تشکیل

سیلابدشت‌ها و آبراهه اصلی در عمق‌های نسبی بین ۰/۱ تا ۰/۳ مشاهده شده است (Shiono and Knight, 1991; Rezaei, 2006).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که توزیع تنش برشی بستر در پیرامون محیط مرطوب آبراهه‌های مرکب، همانند با آبراهه‌های ساده، به عامل‌های مختلفی از جمله شکل مقطع عرضی آبراهه مرکب، هندسه آبراهه در جهت جریان (منشوری یا غیرمنشوری بودن آبراهه مرکب)، تغییرپذیری‌های زبری بستر و دیواره‌های آبراهه و سلول‌های جریان‌های ثانویه بستگی دارد (Knight and Demetriou, 1983; Knight and Hamed, 1984; Shiono and Knight, 1991; Knight et al., 1984 Bousmar, 2002; Rezaei, 2006; Sun, 2007; Knight et al., 2018). بررسی‌های انجام شده نشان دهنده آن است که تاکنون تاثیر شیب عرضی سیلابدشت‌ها بر میدان جریان در آبراهه‌های مرکب منشوری بررسی نشده است. در این پژوهش هدف اصلی بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی میدان جریان شامل توزیع سرعت، تنش برشی مرزی و برهمکنش جریان بین زیر بخش‌ها (آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها) در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل (شیب عرضی ۰/۰۷۵) است. نتایج به‌دست آمده از پژوهش با داده‌های آزمایشگاهی در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های افقی مقایسه شده است

۲- آبراهه مرکب آزمایشگاهی

این پژوهش بر روی فلوم مستقر در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک گروه عمران دانشگاه بوعلی سینا، انجام شده است. این آبراهه آزمایشگاهی دارای طول ۱۸ متر، عرض ۱/۲ متر و عمق ۰/۶ متر است. برای گردش آب در این آبراهه از یک پمپ با بیشینه دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه استفاده شده است که جریان را از یک منبع زیرزمینی به مخزن بالادست آبراهه پمپاژ می‌کند. جریان در انتهای آبراهه به درون مخزن خروجی ریزش کرده و توسط یک آبراهه دوباره به مخزن زیرزمینی برمی‌گردد. شکل (۱) نمای کلی از آبراهه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش را

انگلستان ساخته شد (Knight and Sellin 1987). Shiono and Knight و Knight and Shiono (1990) (1991) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده در FCF، یک روش تحلیلی دوبعدی برای تعیین توزیع سرعت میانگین در عمق و تنش برشی بستر در آبراهه مرکب منشوری ارائه کرد. Tominaga and Nezu (1991) به‌روش آزمایشگاهی ساختار سه‌بعدی جریان ایجاد شده در آبراهه‌های مرکب منشوری را بررسی کرد. آنان دریافتند که با افزایش عمق نسبی جریان ثانویه آبراهه اصلی به‌خوبی قابل تشخیص نبوده درحالی که جریان ثانویه سیلابدشت شدیدتر شده و در سطح آزاد جریان مشخص‌تر است. بررسی‌های آنان نشان داد، که گرچه میزان بزرگای سرعت جریان‌های ثانویه نسبت به مولفه اصلی سرعت کوچک است، اما جریان‌های ثانویه بر روی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آبراهه‌های مرکب از جمله توزیع سرعت و تنش برشی اثر گذار است (Tominaga and Nezu, 1991; Sun, 2007; Terrier, 2010).

Sum و Rezaei (2006), Tominaga and Nezu (1991) (2007) توزیع سرعت در مقطع عرضی آبراهه‌های مرکب منشوری را بررسی کردند. مشاهده‌های آنان نشان داد بیشترین سرعت جریان در تراز پایین‌تر از سطح آزاد جریان رخ می‌دهد. دلیل این پدیده، تأثیر انتقال اندازه حرکت و همچنین تأثیر جریان‌های عرضی ناشی از هندسه آبراهه یا نامنظمی‌های مقطع عرضی آبراهه و یا تأثیر زبری دیواره‌ها است. سرعت میانگین در عمق در آبراهه‌های مرکب تحت تأثیر عمق نسبی جریان و ضریب شکل آبراهه (نسبت عرض آبراهه به عمق جریان) می‌باشد (Ibrahim, 2015). با افزایش عمق نسبی جریان، سرعت در کل آبراهه افزایش می‌یابد لیکن شدت افزایش سرعت در سیلابدشت‌ها بیشتر از مقطع اصلی آبراهه مرکب است. همچنین با افزایش عمق نسبی جریان، اختلاف سرعت بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها کاهش می‌یابد و در عمق‌های نسبی بالا می‌توان تا حدودی از تأثیر لایه برشی به‌وجود آمده بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها صرف نظر کرد (Knight et al., 2018). بیشترین برهمکنش بین

سیلابدشت‌ها برای محاسبه عمق نسبی جریان، طبق رابطه (۱) استفاده شده است.

$$Dr = \frac{\bar{H}_{fp}}{H} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، Dr معرف عمق نسبی جریان است، منظور از میانگین عمق جریان در سیلابدشت‌ها و همچنین H عمق کل جریان در آبراهه اصلی است (به شکل ۲(b) توجه شود).

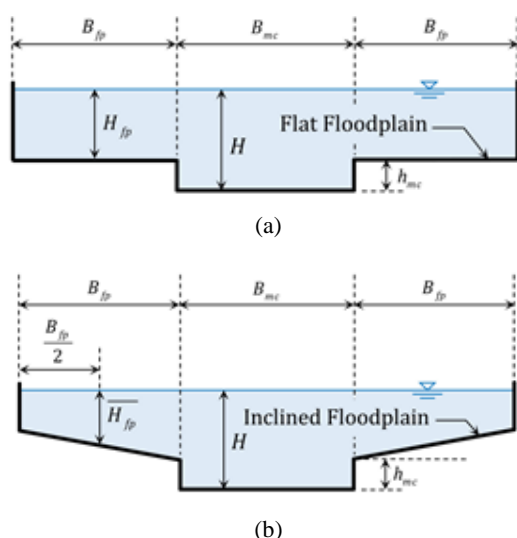


Fig. 2 Cross-section compound channel with (a) flat floodplains, (b) inclined floodplains

شکل ۲ مقطع عرضی آبراهه مرکب با (a) سیلابدشت‌های افقی (b) سیلابدشت‌های مایل

در جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌ها هیدرولیکی جریان در این آزمایش‌ها آورده شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل

Table 1 Hydraulic characteristics of flow in prismatic compound channel with inclined floodplains

Experiment	Discharge Q_t (m ³ /s)	H (m)	Dr (-)
CIF-27	0.027	0.085	0.235
CIF-30	0.030	0.089	0.270
CIF-35	0.035	0.095	0.316
CIF-40	0.040	0.102	0.363
CIF-45	0.045	0.107	0.393

۳- ابزار اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری نیمرخ سطح آب و عمق جریان در طول

نشان می‌دهد.

مقطع عرضی این آبراهه آزمایشگاهی به وسیله ورق‌های PVC به صورت مرکب، شامل مقطع اصلی مستطیلی شکل به عرض ۰/۴ متر و عمق ۰/۰۵ متر و دو سیلابدشت در دو طرف آن با شیب جانبی ۰/۰۷۵ (زاویه ۴/۲۹ درجه) و عرض ۰/۴ متر تبدیل شده است. میانگین شیب طولی کف آبراهه ۱/۶۳×۱۰^{-۳} است. برای اندازه‌گیری دبی ورودی از جریان‌سنج فراصوت (Ultrasonic flowmeter) نصب شده بر روی لوله انتقال آب استفاده شده است. در شکل (۲) مقطع عرضی آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های افقی و مایل نشان داده شده است.



Fig. 1 General view of flume with inclined floodplains
شکل ۱ نمای کلی آبراهه آزمایشگاهی با سیلابدشت‌های مایل

آزمایش‌ها بر روی آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل به عرض ۴۰۰ میلی‌متر انجام شده است. مقطع اندازه‌گیری در فاصله ۱۱ متری از ابتدای آبراهه انتخاب شده است. این فاصله بیشتر از کمترین طول پیشنهادی (Ranga Raju et al. (2000) برای ایجاد جریان توسعه یافته در آبراهه‌های باز می‌باشد.

در پایین دست آبراهه مرکب، یک دریچه قرار داده شده که از آن برای تنظیم عمق آب و ایجاد شرایط جریان یکنواخت استفاده شده است. اندازه‌گیری‌ها برای پنج دبی، ۲۷، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه (متناظر با عمق‌های نسبی ۰/۲۳۵، ۰/۲۷۰، ۰/۳۱۶، ۰/۳۶۳ و ۰/۳۹۳) انجام شده است. با توجه به مایل بودن سیلابدشت‌ها و همچنین اختلاف تراز موجود در بین دو طرف سیلابدشت، از عمق میانگین جریان بر روی

سرعت‌های نقطه‌ای خطوط هم‌سرعت برای چهار دبی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه در شکل (۴) ترسیم شده است. با توجه به شکل‌ها می‌توان دریافت که منحنی‌های هم‌سرعت در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت به سمت بالا برآمده شده و سرعت در این ناحیه کاهش می‌یابد. در فاصله عرضی بین ۰/۱ تا ۰/۱۸ متری از محور آبراهه اصلی (0.1 < y < 0.18 m) منحنی‌های هم‌سرعت با سمت پائین انحنا یافته و سرعت در این ناحیه افزایش می‌یابد. در فاصله بین محور آبراهه اصلی تا ۰/۱ متری (0 < y < 0.1 m) منحنی‌های هم‌سرعت بار دیگر به سمت بالا منحرف شده و در نتیجه سرعت جریان در این منطقه کاهش می‌یابد.

۲-۳- سرعت میانگین در عمق

به منظور محاسبه سرعت میانگین در عمق، مقطع آبراهه به نوارهایی به عرض ۲۰ میلی‌متر به گونه‌ای تقسیم شده که نقطه‌های اندازه‌گیری سرعت در مرکز این نوارها قرار گیرد (برابر شکل ۳). سپس با استفاده از رابطه (۲) و با انتگرال‌گیری عددی از مولفه طولی سرعت‌های نقطه‌ای در عمق در هر یک از این نوارها، سرعت میانگین در عمق محاسبه شده است.

$$U_d = \frac{1}{h} \sum u_i \Delta h_i \quad (2)$$

در این رابطه، U_d سرعت میانگین در عمق در هر نوار، Δh_i ارتفاع هر جز سطح در پیرامون نقطه اندازه‌گیری، u_i مولفه

آبراهه از عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. این عمق‌سنج بر روی پایه‌ای متحرک که قابلیت حرکت در امتداد آبراهه آزمایشگاهی را دارد، نصب شده است. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی نیز از دستگاه جریان‌سنج فراصوت استفاده شده است. این جریان‌سنج با فرستادن و دریافت امواج صوتی توسط دو دستگاه مبدل که در دو طرف لوله جریان ورودی به مخزن بالادست نصب شده‌اند و با اندازه‌گیری اختلاف زمان دریافت امواج صوتی توسط آن‌ها، دبی لحظه‌ای جریان در لوله را اندازه‌گیری می‌کند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان در هر نقطه از حسگر جانب‌نگر دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV) با بسامد (فرکانس) ۲۰۰ هرتز استفاده شده است. اندازه‌گیری سرعت در فاصله‌های عرضی ۲۰ میلی‌متری و فاصله‌های ارتفاعی ۱۰ میلی‌متری انجام شده است. شکل (۳) شبکه‌بندی انجام شده برای اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری تنش برشی در اطراف پیرامون محیط مرطوب با استفاده از لوله پرستون (Preston tube) با قطر بیرونی ۴ میلی‌متر در فواصل عرضی ۲۰ میلی‌متری بر روی کف مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و فاصله‌های ۱۰ میلی‌متری بر روی دیواره‌ها انجام شده است.

۳- بحث و نتایج

۱-۳- توزیع سرعت

با استفاده از داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری

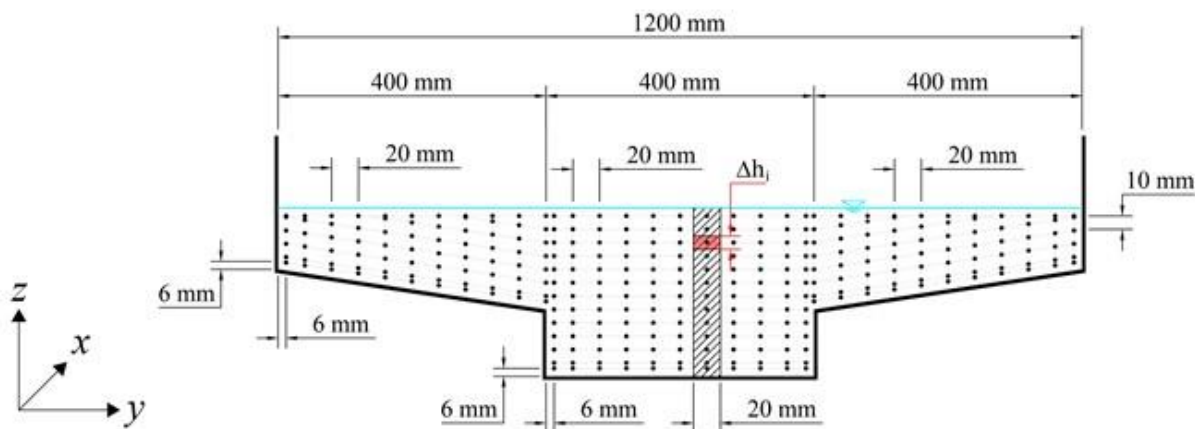


Fig. 3 Gridding of the flume cross-section for measuring velocity using ADV
شکل ۳ شبکه‌بندی مقطع عرضی آبراهه برای اندازه‌گیری سرعت به وسیله ADV

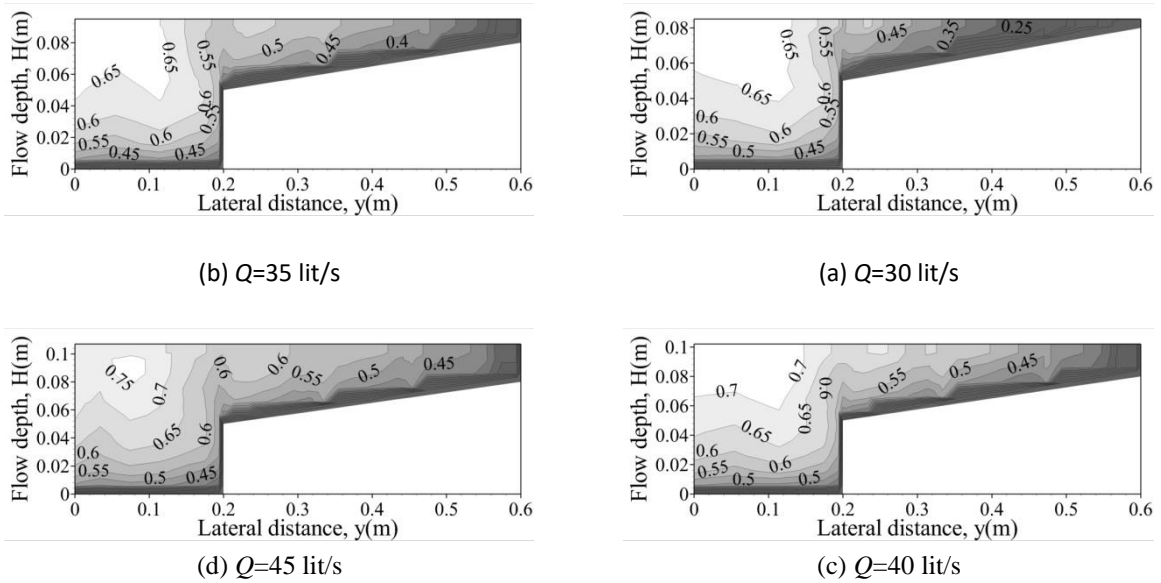


Fig. 4 Isovel diagrams for four discharges of 30, 35, 40, and 45 lit/s

شکل ۴ نمودار منحنی‌های هم‌سرعت برای چهار دبی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه

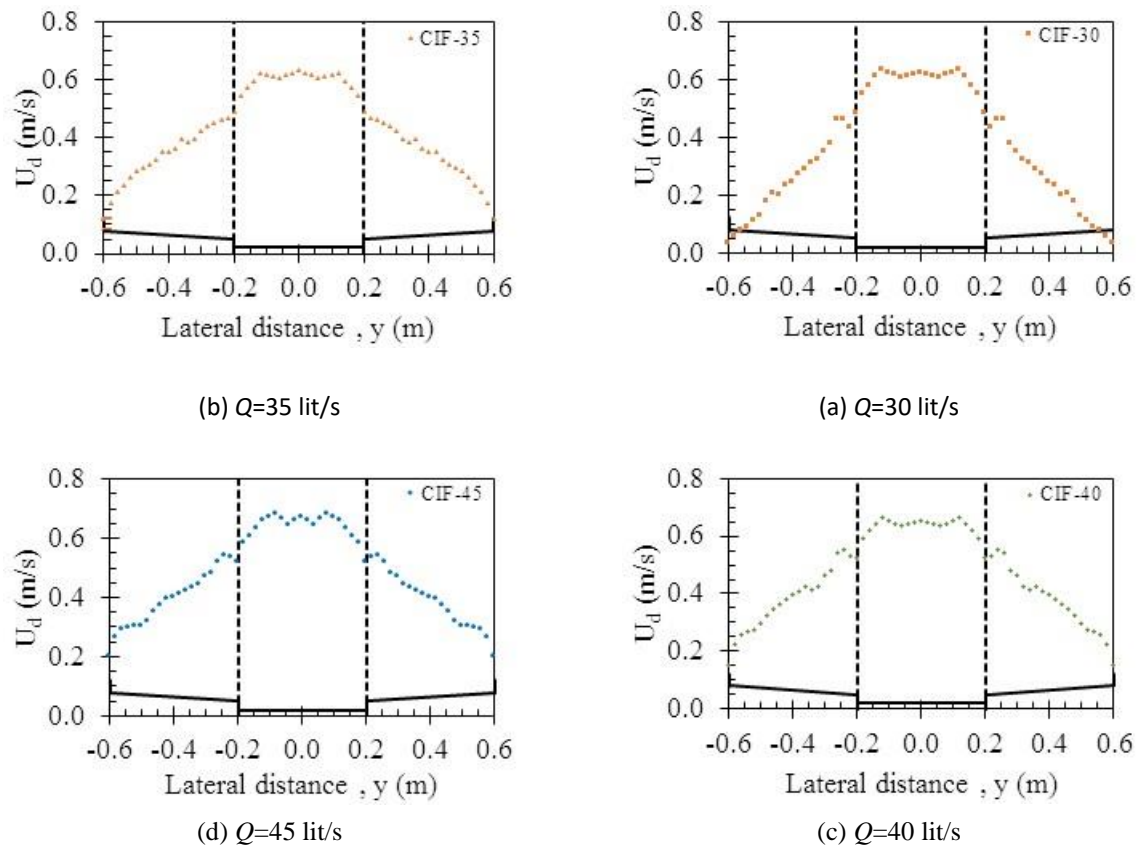


Fig 4 Depth-averaged velocity distribution (U_d) for four different discharges of 30, 35, 40, and 45 lit/s

شکل ۵ توزیع عرضی سرعت میانگین گیری شده در عمق برای چهار دبی مختلف ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه

عمق برای چهار عمق نسبی ۰/۲۷۰، ۰/۳۱۶، ۰/۳۶۳ و ۰/۳۹۳ در شکل (۵) نشان داده شده است. از شکل‌های (۵) می‌توان دریافت که توزیع عرضی سرعت

طولی سرعت نقطه‌ای و h عمق جریان هر جز سطح نواری است. نمودارهای توزیع عرضی سرعت میانگین گیری شده در

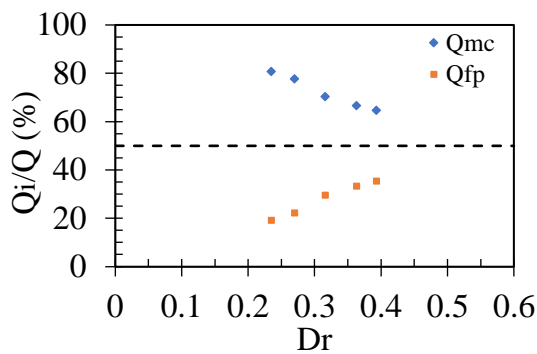


Fig. 6 Percentage of discharge in the main channel and on the floodplains in ompound channel with inclined floodplains

شکل ۶ درصد دبی عبوری از آبراهه اصلی و سیلابدشتها در آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های مایل

به منظور بررسی تاثیر شیب جانبی سیلابدشتها بر توزیع سرعت میانگین گیری شده در عمق، نمودار بدون بعد توزیع سرعت میانگین در عمق (U_d/U_m) که در این رابطه U_m سرعت میانگین جریان آب در کل آبراهه است) برای دبی‌های ۳۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه ترسیم و با نمودارهای مشابه در آبراهه مرکب با هندسه همانند ولی سیلابدشت‌های مسطح (داده‌های (Rezaei, 2006) مقایسه شده است (شکل ۷).

با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که شکل بدون بعد سرعت میانگین در عمق در آبراهه اصلی، آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های شیب‌دار و مسطح کم و بیش باهم برابر هستند. در حالی که در سیلابدشت‌ها شکل بدون بعد سرعت میانگین در عمق آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های افقی حالت یکنواخت داشته و همواره بزرگتر از آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های شیب‌دار است. این اختلاف می‌تواند ناشی از تاثیر شیب عرضی سیلابدشت‌های آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل و کاهش عمق جریان و افزایش ضریب مانینگ در این ناحیه باشد. با افزایش عمق نسبی توزیع سرعت در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های شیب‌دار افزایش یافته و به داده‌های (Rezaei (2006) نزدیک می‌شود.

در آبراهه اصلی در مقایسه با سیلابدشت‌ها حالت یکنواخت‌تری دارد. همچنین تغییرپذیری‌های سرعت میانگین در عمق در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها و نیز در آبراهه اصلی در همخوانی با نمودار منحنی‌های هم سرعت (شکل ۴) است. کاهش شدید سرعت در سیلابدشت‌ها می‌تواند ناشی از شیب جانبی سیلابدشت‌ها و کاهش عمق جریان در این ناحیه‌ها باشد. با انتگرال‌گیری عددی از سرعت میانگین در عمق، برابر با رابطه (۳)، دبی عبوری از هر زیربخش محاسبه شده است. با تقسیم دبی عبوری از هر زیربخش بر دبی کل (رابطه (۴))، درصد دبی عبوری از آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها محاسبه شده است.

$$Q_s = \sum_{i=1}^n u_{di} \Delta A_i \quad (3)$$

$$\% Q_s = \frac{Q_s}{Q} \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه‌ها، Q_s دبی عبوری از هر زیربخش، U_{di} سرعت میانگین در عمق در هر عنصر (المان) نواری، ΔA_i مساحت جز سطح نواری، Q دبی کل جریان است. دبی جریان حمل شده توسط آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ دبی حمل شده توسط آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل

Table 2 Discharge carried by the main channel and floodplains in prismatic compound channel with inclined floodplains

Experiment	D_r (-)	Q_{mc} (m^3/s)	Q_{fp} (m^3/s)
CIF-27	0.235	0.022	0.005
CIF-30	0.270	0.023	0.007
CIF-35	0.316	0.025	0.010
CIF-40	0.363	0.027	0.013
CIF-45	0.393	0.029	0.016

همچنین نمودار تغییرپذیری‌های درصد دبی عبوری از آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها بر حسب عمق نسبی در شکل ۶ نشان داده شده است.

از شکل ۶ می‌توان دریافت که با افزایش عمق نسبی درصد دبی عبوری از آبراهه اصلی کاهش و در سیلابدشت‌ها افزایش می‌یابد.

(τ_b/τ_m) برای دبی‌های ۳۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهها در آبراهه مرکب منشوری به سیلابدشت‌های مسطح و به عرض ۴۰۰ میلی‌متر مقایسه شده است (شکل ۹). که در آن تنش برشی میانگین بوده و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\tau_m = \gamma R_h S_0 \quad (5)$$

در رابطه (۵)، γ وزن مخصوص آب، R_h شعاع هیدرولیکی و S_0 شیب طولی بستر آبراهه است.

همان‌طور که در شکل ۹ می‌توان دید، تنش‌های برشی بدون بعد در آبراهه اصلی به میزان جزئی بزرگتر از داده‌های (Rezaei, 2006) بوده ولی در سیلابدشت‌ها، این تنش‌ها کوچکتر هستند.

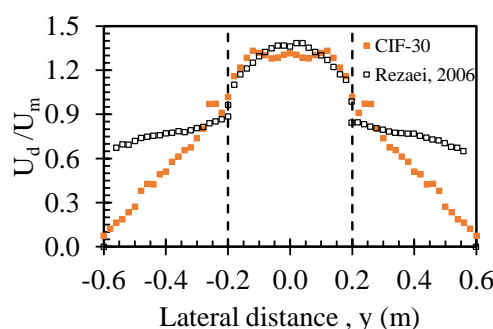
کاهش شدید تنش برشی در عرض سیلابدشت‌ها و در عمق نسبی کم می‌تواند ناشی از کاهش سرعت بدلیل شیب جانبی سیلابدشت و کاهش عمق جریان در این ناحیه باشد. با انتگرال‌گیری عددی از تنش برشی مرزی بر روی محیط تر شده (رابطه ۶)، نیروی برشی در واحد طول اعمال شده به دیواره و بستر آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها محاسبه شده است. بدین منظور برابر شکل ۱۰، دیواره‌های سیلابدشت سمت چپ و راست به ترتیب با شماره ۱ و ۷، بستر سیلابدشت‌های سمت چپ و راست با شماره ۲ و ۶، دیواره‌های آبراهه اصلی با شماره‌های ۳ و ۵ و بستر آبراهه اصلی با شماره ۴ نامگذاری شده است.

$$SF_s = \sum_{i=1}^n \tau_{bi} \Delta y_i \quad (6)$$

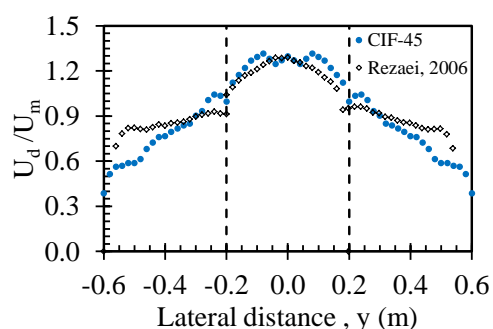
با توجه به تقارن در شکل و هیدرولیک جریان، میزان‌های نیروی برشی در واحد طول اعمال شده به چهار جز پیرامون محیط مرطوب آبراهه مرکب (SF_1, SF_2, SF_3 و SF_4) و برای دبی‌های مختلف محاسبه شده است. با تقسیم میزان‌های نیروی برشی هر یک از عنصرهای پیرامون محیط مرطوب بر نیروی مالشی کل (رابطه ۷) درصد نیروی برشی آن جز محاسبه شده است.

$$\% SF_s = \frac{SF_s}{\gamma AS_0} \quad (7)$$

در این رابطه SF_s نیروی برشی در واحد طول وارد بر جز



(a) Q=30 lit/s



(b) Q=45 lit/s

Fig. 7 Comparison between non-dimensional form of depth-averaged velocity in prismatic compound channel with inclined and flat floodplains

شکل ۷ مقایسه شکل بدون بعد سرعت میانگین در عمق در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل و افقی

۳-۳- تنش برشی مرزی

تنش برشی مرزی در مهندسی رودخانه و در بررسی و ارزیابی مربوط به حفاظت بستر رودخانه‌ها و نیز انتقال رسوب کاربرد دارد. در این پژوهش توزیع عرضی تنش برشی مرزی در پیرامون مرطوب با اندازه‌گیری اختلاف فشار پویایی و ایستائی به‌وسیله لوله پرستون و با استفاده از رابطه‌های (Patel 1965) محاسبه شده است.

شکل ۸ توزیع عرضی تنش برشی مرزی در پیرامون محیط تر شده برای چهار دبی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود توزیع عرضی تنش برشی بستر از الگوی همانند سرعت میانگین‌گیری شده در عمق پیروی می‌کند. در اینجا نیز تغییرپذیری و کاهش تنش برشی بستر در سیلابدشت‌ها بسیار سریع رخ می‌دهد

به منظور بررسی اثر شیب جانبی سیلابدشت‌ها بر توزیع تنش برشی بستر، میزان‌های تنش برشی بدون بعد

جریان است.

ام از پیرامون محیط مرطوب، و A سطح مقطع کل

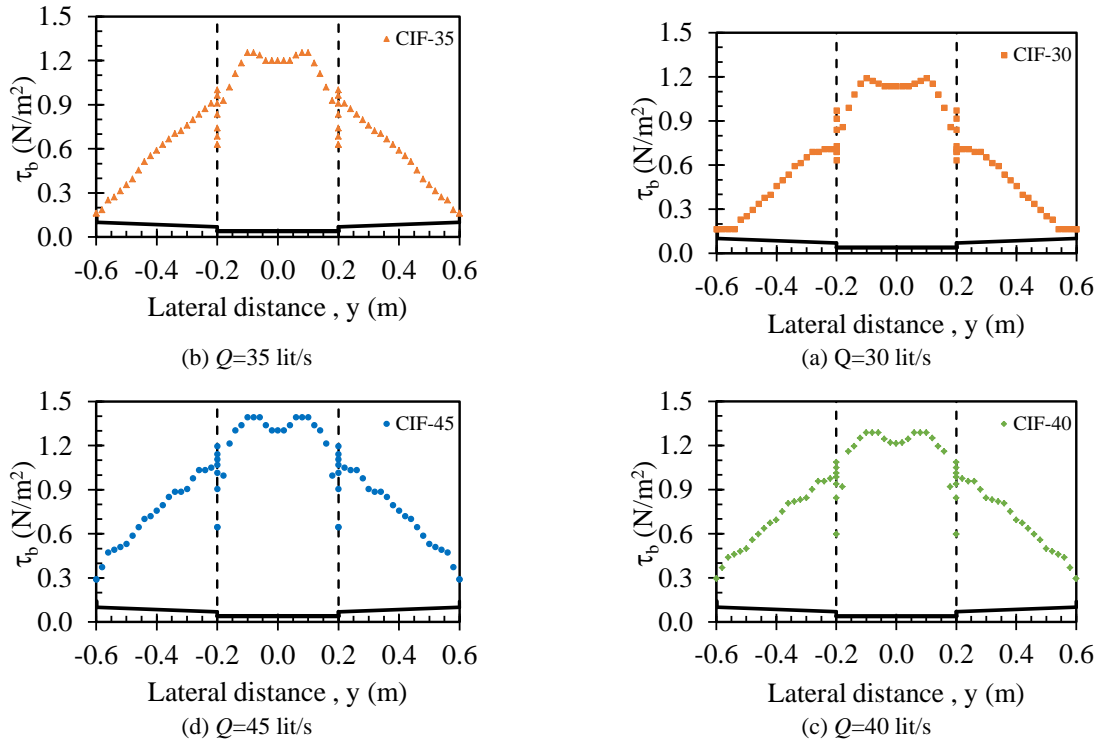


Fig. 8 Shear stress distribution in compound channels with prismatic and inclined floodplains for different discharges of 30 lit/s, 45 lit/s, 40 lit/s, and 45 lit/s

شکل ۸ توزیع عرضی تنش برشی بستر در آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های منشوری مایل برای دبی‌های مختلف، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه

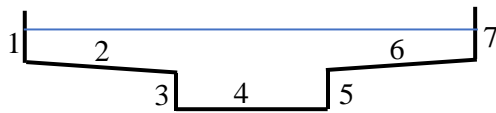


Fig. 10 Various components of wetted perimeter in the prismatic compound channel with inclined floodplains
شکل ۱۰ اجزای مختلف پیرامون مرطوب آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌ها مایل

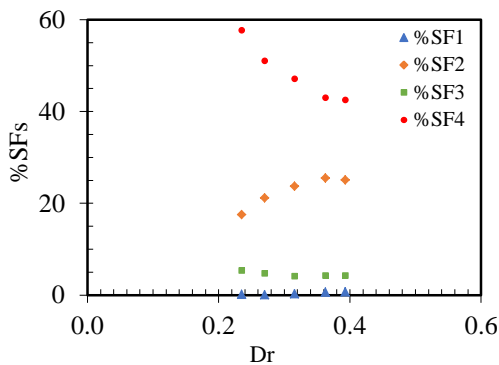


Fig. 11 Percentage of shear forces on each boundary element versus relative depth for a prismatic compound channel with inclined floodplains

شکل ۱۱ درصد نیروی برشی اعمال شده بر هر یک از اجزای محیط مرطوب در برابر عمق نسبی در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل

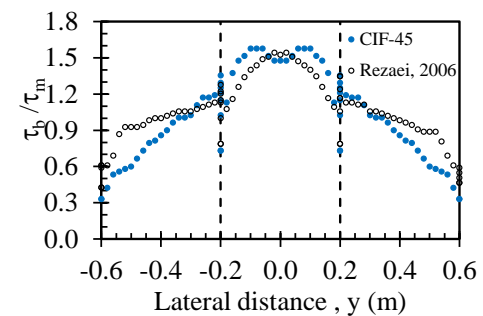
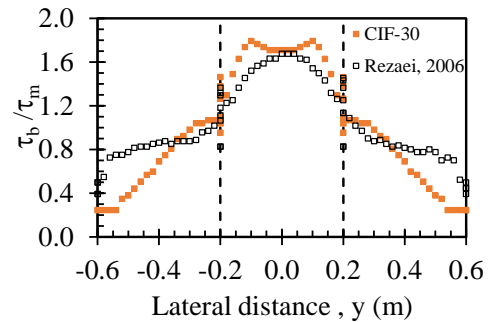


Fig. 9 A comparison between normalized bed shear stress in compound channels with inclined and flat floodplains
شکل ۹ مقایسه تنش برشی بدون بعد در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل و مسطح (افقی)

در شکل ۱۱ نمودار تغییرپذیری‌های درصد نیروی برشی وارد بر دیواره‌ها و بستر آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها بر حسب عمق نسبی ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان گفت که با افزایش عمق نسبی درصد تنش برشی وارد شده بر بستر و دیواره آبراهه اصلی (SF3 و SF4) کاهش یافته در حالی که درصد تنش برشی وارد بر بستر و دیواره سیلاب‌دشت (SF1 و SF2) روند افزایشی نشان می‌دهد.

در شکل ۱۱ نمودار تغییرپذیری‌های درصد نیروی برشی وارد بر دیواره‌ها و بستر آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها بر حسب عمق نسبی ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان گفت که با افزایش عمق نسبی درصد تنش برشی وارد شده بر بستر و دیواره آبراهه اصلی (SF3 و SF4) کاهش یافته در حالی که درصد تنش برشی وارد بر بستر و دیواره سیلاب‌دشت (SF1 و SF2) روند افزایشی نشان می‌دهد.

۳-۳- نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت

با توجه به یکنواختی جریان و برابری سرعت و عمق جریان در دو مقطع ۱ و ۲، میزان‌های نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر این دو مقطع و نیز اندازه حرکت سیال ورودی به حجم کنترل و خروجی از حجم کنترل با هم برابر خواهند بود، در نتیجه رابطه اندازه حرکت (رابطه ۸) را می‌توان به صورت زیر خلاصه و دوباره نویسی کرد.

$$2ASF_v = W_{mc} S_0 - F_{fmc} \quad (9)$$

به منظور بررسی برهمکنش بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها برابر شکل ۱۲، نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از رابطه اندازه حرکت برای حجم کنترل به طول ۱ متر در آبراهه اصلی می‌توان نوشت:

$$F_{fmc} = SF_3 + SF_4 + SF_5 \quad (10)$$

میزان نیروی اصطکاک وارد بر جدار آبراهه از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

در این رابطه SF₃ و SF₅ نیروی برشی در واحد طول وارد شده به دیواره آبراهه اصلی و SF₄ نیروی برشی وارد بر کف آبراهه اصلی است. جمله‌ها مختلف رابطه (۹) برای دبی‌های مختلف محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است.

به منظور بررسی برهمکنش بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها برابر شکل ۱۲، نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از رابطه اندازه حرکت برای حجم کنترل به طول ۱ متر در آبراهه اصلی می‌توان نوشت:

$$F_{p1mc} - F_{p2mc} + W_{mc} S_0 - F_{fmc} - 2ASF_v = \rho Q_{2mc} (U_{2mc} - U_{1mc}) \quad (8)$$

جدول ۳ جمله‌ها مختلف رابطه اندازه حرکت برای حجم کنترل در آبراهه اصلی یک آبراهه مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های مایل

سیلاب‌دشت‌های مایل

Table 3 Different terms of momentum equations for a control volume in the main channels

Experiment	$W_{mc}S_0$ (N/m)	F_{fmc} (N/m)	ASF_v (N/m)
CIF-27	0.7672	0.5245	0.0095
CIF-30	08439	0.5114	0.0288
CIF-35	09590	0.5316	0.0379
CIF-40	1.0933	0.5638	0.0442
CIF-45	1.1892	0.6075	0.0383

با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت که با افزایش دبی و در نتیجه عمق نسبی، نیروی برشی در فصل مشترک افزایش یافته و در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه (عمق نسبی ۰/۳۶۳) به بیشینه (0.0442 N/m) می‌رسد. با افزایش بیشتر عمق نسبی، نیروی برشی ظاهری کاهش می‌یابد. تغییرپذیری‌های همانندی توسط Rezaei (2006) در آبراهه مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های مسطح مشاهده

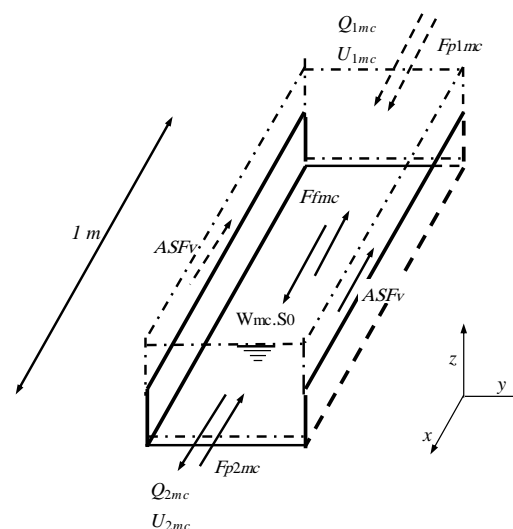


Fig. 12 Perspective view of control volume in the main channel

شکل ۱۲ نمای سه بعدی حجم کنترل در آبراهه اصلی

در این رابطه: F_p معرف نیروی فشار هیدرواستاتیک، W معرف نیروی وزن سیال موجود در حجم کنترل، F_f بیان کننده نیروی اصطکاک وارد بر جدار آبراهه در واحد طول،

شده است.

با تقسیم نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشتها بر نیروی برشی کل مقطع، درصد نیروی برشی ظاهری محاسبه و در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

$$\%ASF_v = \frac{ASF_v}{\gamma AS_0} \times 100 \quad (11)$$

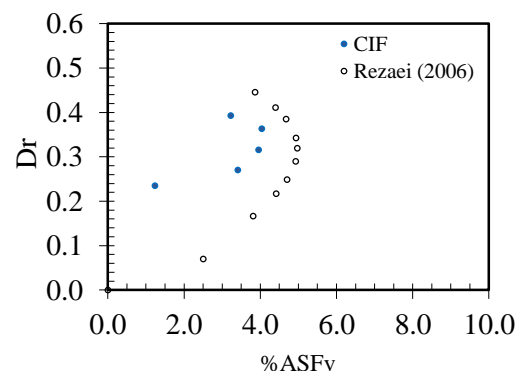


Fig. 13 A comparison between percentage of apparent shear forces in prismatic compound channel with inclined floodplains and Rezaei's data

شکل ۱۳ مقایسه درصد نیروی برشی ظاهری در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل و داده‌های رضائی

از شکل ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشتها، در آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های مایل همواره کوچکتر از این میزانها در آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های مسطح است. همچنین در این نوع آبراهه نیز بیشینه برهمکنش بین جریان آب در آبراهه اصلی و سیلابدشتها در عمق نسبی حدود ۰/۳ رخ می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش میدان جریان شامل توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل (شیب عرضی ۰/۷۵) به صورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی شده است. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری سرعت و تنش برشی بستر برای بررسی الگوی منحنی‌های هم سرعت، سرعت میانگین در عمق، دبی انتقال یافته توسط آبراهه اصلی و

سیلابدشتها و نیز برهمکنش بین جریان در آبراهه اصلی و سیلابدشتها استفاده شده است. به منظور بررسی تاثیر شیب عرضی سیلابدشتها بر توزیع سرعت و تنش برشی نتایج بدست آمده از این اندازه‌گیریها با داده‌های آزمایشگاهی در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مسطح (Rezaei, 2006) مقایسه شده است. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- بررسی منحنی‌های هم‌سرعت در آبراهه‌های مرکب منشوری نشان دهنده وجود برآمدگی و انحنا به سمت بالا در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشتها بوده که در نتیجه آن سرعت در این ناحیه کاهش یافته است.
- ۲- بررسی سرعت میانگین در عمق نشان دهنده وجود دو قله موضعی و افزایش سرعت در نزدیک دیواره‌های آبراهه اصلی است. این موضوع در همخوانی با تغییر انحنا منحنی‌های هم‌سرعت در این ناحیه‌ها است.
- ۳- در آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های مایل بدلیل تغییر عمق جریان در سیلابدشتها توزیع سرعت میانگین در عمق در این ناحیه‌ها حالت یکنواخت نداشته و دارای روند سریع کاهش است.
- ۴- مقایسه شکل بدون بعد توزیع عرضی سرعت میانگین در عمق در آبراهه‌های مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل و سیلابدشت‌های مسطح (داده‌های Rezaei, 2006) نشان می‌دهد که این سرعتها در آبراهه اصلی کم و بیش با هم برابر هستند در حالی که در سیلابدشتها شکل بدون بعد سرعت میانگین در عمق آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مسطح حالت یکنواخت داشته و همواره بزرگتر از آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های شیب‌دار است.
- ۵- توزیع عرضی تنش برشی بستر از الگوی همانند سرعت میانگین در عمق پیروی می‌کند. در اینجا نیز تغییرپذیری و کاهش تنش برشی بستر در سیلابدشتها بسیار سریع است.
- ۶- بررسی تغییرپذیری درصد نیروی برشی ظاهری در

SF_s	نیروی برشی در واحد طول جزء s ام (N)
W	نیروی وزن سیال موجود در حجم کنترل (N)
y	راستای عرضی جریان (m) نشانه‌های یونانی:
Δ	جزء بسیار کوچک
ρ	جرم ویژه سیال (kg/m^3)
γ	وزن مخصوص سیال (N/m^3)
τ_b	تنش برشی مرزی (N/m^2)
τ_m	تنش برشی میانگین بستر (N/m^2)

زیرنویس‌ها:

fp	سیلابدشت
mc	آبراهه اصلی

۶- منبع‌ها

Bousmar, D. (2002). Flow modeling in compound channels: Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains, PhD Thesis, University Catholique de Louvain, Belgium.

Ibrahim, Z.B. (2015). Flow Behaviour due to Floodplain Roughness along Riparian Zone in Compound Channels. PhD Thesis. University of Tecnology. Malaysia.

Knight, D.W., Demetriou, J.D. & Hamed, M.E., (1984). Stage-Discharge Relationships for Compound Channels. Proceedings Int. Conf. on Hydraulic Design in Water Resources Engineering: Channels and Channel Control Structures, Southampton, April, 4.21-4.25, Springer-Verlag, Heidelberg.

Knight, D.W. & Demetriou, D. (1983). Flood plain and main channel flow interaction. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 109(8): 1073-1092.

Knight, D.W. & Hamed, M. (1984). Boundary shear in symmetrical compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*, 110(10), 1412-1430.

Knight, D.W. & Sellin, R.H.J. (1987). The SERC flood channel facility. Journal of the Institution of Water and Environmental Management. *IWEM*. 1(2), 198-204.

فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها نیز نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی برهمکنش جریان بین آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها افزایش یافته و در محدوده عمق نسبی $0/3$ به بیشینه خود می‌رسید. این موضوع در همخوانی با داده‌های (Rezaei (2006) است.

۷- درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت در آبراهه مرکب منشوری با سیلابدشت‌های مایل همواره کوچکتر از آبراهه مرکب با سیلابدشت‌های مسطح است.

۵- فهرست نشانه‌ها

A	سطح مقطع کل جریان (m^2)
A_i	مساحت جزء i ام (m^2)
ASF_v	نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین آبراهه اصلی و سیلابدشت (N)
B_{fp}	عرض سیلابدشت (m)
B_{mc}	عرض مقطع اصلی آبراهه (m)
D_r	عمق نسبی جریان (-)
H	عمق جریان (m)
\bar{H}_{fp}	میانگین عمق جریان در سیلابدشت (m)
h	عمق جریان هر جز سطح نواری (m)
h_i	ارتفاع جزء سطح i ام (m)
h_{mc}	عمق آبراهه اصلی (m)
F_p	برآیند نیروی فشار هیدرواستاتیک (N)
F_f	نیروی اصطکاک وارده بر جدار آبراهه (N)
Q	دبی کل (m^3/s)
Q_s	دبی جریان زیر بخش s ام (m^3/s)
u	مولفه طولی سرعت (m/s)
U_d	سرعت میانگین گیری شده در عمق (m/s)
U_m	سرعت میانگین جریان (m/s)
R_h	شعاع هیدرولیکی (m)
S_0	شیب طولی آبراهه (-)

Knight, D.W. & Shiono, K. (1990). Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel. *Journal of Hydraulic Research*, 28, 175-196.

Knight, D.W., Hazlewood, C., Lamb, R., Samuels, P.G. & Shiono, K. (2018). *Practical Channel Hydraulics: Roughness, Conveyance and Afflux*. 2nd Edition. Taylor and Francis Group. CRC Press. Balkema. Netherlands.

Patel, V.C. (1965). Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients, *Journal of Fluid Mechanics*, 23(1), 185-208.

Ranga Raju, K.G., Asawa, G.L. & Mishra H.K. (2000). Flow-establishment length in rectangular channels and ducts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(7), 533-539.

Rezaei B. (2006). Overbank flow in compound channels with prismatic and non-prismatic floodplains. PhD Thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK.

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.

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

Sun, X. (2007). Flow Characteristics in Compound Channels with and without Vegetation. PhD Thesis. Department of Civil and Building Engineering. Loughborough University. Loughborough. UK.

Terrier, B. (2010). Flow Characteristics in Straight Compound Channels with Vegetation Along the Main Channel. Department of Civil and Building Engineering. Loughborough University, Loughborough. UK.

Tominaga, A. & Nezu, I. (1991). Turbulent structure in compound open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(1), 21-41.