

Laboratory Study of Shear Stress and Depth-Average Velocity of Flow in Meandering Compound Channel

Hosna Shafaei¹, Kazem Esmaili^{2*}, AliAsghar Beheshti²

1- Ph.D. Candidate, Department Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Associate Professor, Department Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* esmaili@um.ac.ir

Received: 24 August 2024

Accepted: 18 November 2024

Discussion: 22 December 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Most of the rivers in the world have a sinuous shape, and the migration of the meandering river over time causes the transfer and expansion of the main channel towards the flood plains and the modification of the flood plains. The momentum transfer between the main channel and the floodplains affects the velocity distribution in the cross section of the channel and emphasizes the importance of studying this complex flow phenomenon in meandering and compound meandering channels (Julian et al., 2012; Morvan et al., 2005). Key hydraulic parameters include Reynolds shear stress, turbulent kinetic energy, and the Froude number. Studies have shown that in meandering channels with moving beds, there is a higher momentum exchange leading to an increase in turbulent kinetic energy and Reynolds shear stress, especially near the bed surface (Sukhodolov & Uijttewaals, 2010; Mohanty, 2013; Pradhan et al, 2018; Pradhan et al. 2024). By studying past research, it can be said that despite the complexities of flow in meandering and compound meandering channels, it is necessary to investigate the hydrodynamic behavior of the flow in the main channel and floodplain. The importance of understanding and knowing the flow hydraulics in the meandering compound channel to investigate the changes of the river and banks during the flood event and the overbank flow conditions will greatly help the better performance of engineers and researchers.

Methodology: The present study was conducted to investigate the hydrodynamics of the flow in the main channel of a compound meandering channel in the laboratory of physical and hydraulic models of Ferdowsi University of Mashhad. The experiments were carried out in a flume equipped with a water circulation system, with a length of 10 meters, a width of 0.78 meters and a depth of 0.5 meters. The walls of the channel were made of transparent glass. The floor of the main channel and floodplain was made of concrete. Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) was used to measure the velocity components in (x, y, and z) directions. The flow rate passing through the main channel (inbank flow) was measured as 10.4 liters per second, Froude number as 0.3 and Reynolds number of 21306. The flow rate in the overbank flow with a relative depth of 0.46 was 31.64 L/s, and the Froude number and Reynolds number were 0.21 and 23,000, respectively.. The vertical distances of the measuring points of the velocity components for 8 points close to the bed were 0.5 mm and the next 8 points up to the water level were spaced at 1 cm in the main channel. In the flow of the in bank, the components of the flow velocity in

three directions were taken in eight sections of the main channel and 208 points were taken in each section, resulting in a total of 1,664 points.

Results and Discussion: By investigating the results obtained from the changes in the ratio of the depth-averaged velocity to the average velocity, it can be seen that for in bank flow in the channel in sections CS1, CS6, and CS7, the velocity at outer bend is higher than the velocity at the inner bend and center of the main channel. In sections CS2, CS3, and CS8, the velocity is maximum at the center of the main channel. In overbank flow, the ratio of the depth average velocity to the total average velocity increases in the inner bend (sections CS1 and CS2) and this increase in velocity is inclined towards the center of the main channel. In addition, in sections CS3 and CS6, the velocity is highest in the center of the main channel. By increasing relative depth, the intensity of depth velocities decreases and according to the obtained results, the amount of relative depth velocity in the flow of the main channel increased by 40%. As the relative depth increases, the kinetic energy of the flow decreases and the results show that the kinetic energy of the flow in the inbank flow is between 40% and 70% higher than the overbank flow. The maximum bed shear stress is inclined from the centerline of the main channel towards the outer bend wall as seen in sections CS1, CS2 and CS6. In the middle sections, the greatest changes in bed shear stress occur in the central area of the main channel bed, as seen in sections CS2, CS3 and CS8. In the overbank flow, the maximum bed shear stress has increased at the beginning of the flood plains and then decreased. Considering both inbank flow and overbank flow, it is observed that the highest amount of wall shear stress occurs near the bed surface ($1 \leq z \leq 8\text{cm}$). In the case of middle sections, shear stress changes have occurred near the water level for overbank flow. By changing the depth from 0.12 m to relative depth 0.46, the maximum turbulence energy in the urban bank flow has decreased by 20%.

Conclusion: In the inbank flow with a depth of 0.12 m, the maximum kinetic energy occurred in the outer bend, and overbank flow with a relative depth of 0.46 and flow on the floodplains, the maximum kinetic energy occurs in the inner bend and the flow on the floodplain connected to the wall of the inner bend. Maximum depth velocity occurred in the center part and in the distance of $4 \text{ cm} \leq z \leq 10 \text{ cm}$, which is more visible in the middle sections. In the case of overbank flow with relative depth, $D_r = 0.46$, the maximum depth velocity changes occur between $10 \text{ cm} \leq z \leq 20 \text{ cm}$.

Keywords: Secondary currents, Kinetic energy, Shear stress, Depth average velocity.

مطالعه آزمایشگاهی تنش برشی و سرعت متوسط عمقی جریان در کانال مرکب پیچان

حسنا شفائی^۱، کاظم اسماعیلی^{۲*}، علی اصغر بهشتی^۲

۱- دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، خراسان رضوی، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، خراسان رضوی، ایران.

* esmaili@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ و بگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در این پژوهش تغییرات پارامترهای هیدرولیکی از جمله تنش برشی بستر و دیواره، سرعت متوسط عمقی و انرژی جنبشی جریان در دو شرایط جریان کانال اصلی و سیلابدشتی با عمق و عمق نسبی به ترتیب ۰/۱۲ متر و ۰/۴۶ در یک کانال مرکب پیچان با سینوسیته ۱/۳ انجام شد. برای اندازه‌گیری هر سه مؤلفه سرعت (طولی، عرض و عمقی) از دستگاه سرعت‌سنج ADV استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق جریان از شرایط جریان کانال اصلی به جریان سیلابدشتی میزان تنش برشی، سرعت متوسط عمقی و انرژی جنبشی کاهش یافته است. نتایج نشان داد که حداکثر سرعت متوسط عمقی در جریان سیلابدشتی در مقایسه با جریان کانال اصلی حدود ۹۰ درصد کاهش یافته است. با افزایش عمق جریان و مقاومت اصطکاکی و کاهش سرعت در سیلابدشت میزان انرژی جنبشی جریان کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که حداکثر انرژی جنبشی در جریان کانال اصلی ۷۵ درصد بیشتر انرژی جنبشی در جریان سیلابدشتی است. مطالعه تغییرات تنش برشی به حداکثر تنش برشی بستر نشان داد که در جریان کانال اصلی حداکثر تنش برشی بستر در قوس خارجی و در مقاطع میانی در مرکز کانال رخ می‌دهد. در جریان سیلابدشتی حداکثر تنش برشی بستر در سیلابدشت با عرض بیشتر رخ داد. در مورد تغییرات تنش برشی دیواره مشاهده شد که در جریان سیلابدشتی حداکثر تنش برشی دیواره در فصل مشترک کانال اصلی و سیلابدشت به دلیل افزایش تبادلات مومنتوم در این ناحیه رخ داده و پس از آن به سمت دیواره کاهش و دوباره افزایش یافته است. در جریان کانال اصلی حداکثر تنش برشی دیواره در فواصل نزدیک بستر رخ داده است.

کلیدواژگان: جریان‌های ثانویه، انرژی جنبشی، تنش برشی، سرعت متوسط عمقی.

۱- مقدمه

زمان باعث انتقال و گسترش کلنال اصلی به سمت سیلابدشت‌ها می‌شود. این به دلیل آبشستگی رسوبات و ته‌نشینی آنها به ترتیب در امتداد سواحل خارجی و داخلی است. شکل‌گیری پیچان، پدیده‌ای پیچیده است و منجر به تشکیل انحناهای شدید در مسیر رودخانه‌ها می‌شود. وجود سازه‌ها برای محافظت از کانال در برابر فرسایش سواحل و سیلابدشت‌ها برای تثبیت نیم‌رخ، ابعاد و الگوی رودخانه و تأسیسات و مناطق مسکونی موجود در سیلابدشت‌ها ضروری است (Akbar et al., 2024). پژوهش‌های مختلفی ویژگی‌های جریان در کانال اصلی را بررسی کردند (Kumar Singh et al., 2022). توزیع سرعت در کانال‌های

کانال مرکب پیچان نوعی کانال رودخانه‌ای است که دارای یک کانال اصلی در کنار یک یا چند سیلابدشت مجاور است. این کانال‌ها با مسیرهای سینوسی خود مشخص می‌شوند که می‌توانند به طور قابل توجهی پویایی جریان را در شرایط مختلف هیدرولوژیکی به ویژه در هنگام سیل تغییر دهند. این رودخانه‌ها اغلب دارای بی‌نظمی‌های در بستر رودخانه هستند که می‌تواند بر پارامترهای هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان رودخانه تأثیر بگذارد (Mera et al., 2015). بیشتر رودخانه‌ها در جهان دارای شکل پیچان هستند و مهاجرت پیچ و خم رودخانه به مرور

پیچان بین سیلابدشت‌ها و کانال اصلی متفاوت است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد نسبت سرعت سیلابدشت به سرعت کانال اصلی کمتر از یک است (Sweet et al., 2003; Liu et al., 2019). افزون بر این، وجود پوشش گیاهی سیلابدشت می‌تواند با افزایش قابل توجه سرعت متوسط در کانال اصلی، به ویژه در عمق‌های نسبی کمتر، بر الگوهای جریان تأثیر بگذارد (McCaffrey et al., 1988). تفاوت سرعت بین کانال اصلی و سیلابدشت سبب تبادل و انتقال مومنوم بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها می‌شود و بر اهمیت مطالعه این پدیده جریان در کنال‌های پیچان تأکید می‌کند (Julian et al., 2005; Morvan et al., 2012). به طور کلی، درک توزیع سرعت بین سیلابدشت و کانال اصلی برای تجزیه و تحلیل هیدرولیکی مؤثر و مدیریت رودخانه‌های پیچان بسیار مهم است. توزیع انرژی در کانال اصلی یک کانال پیچان تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند شدت آشفتگی، تنش برشی رینولدز و انرژی جنبشی آشفته است. مطالعات نشان دادند که در کانال‌های پیچان با بسترهای متحرک، تبادل مومنوم بالاتری وجود دارد که منجر به افزایش انرژی جنبشی آشفتگی و تنش برشی رینولدز، به‌ویژه در نزدیکی سطح بستر می‌شود (Sukhodolov & Uijtewaal., 2010).

الگوی جریان در کانال اصلی یک کانال پیچان تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند عدد فرود، نسبت عرض به عمق، زاویه خم و هندسه کانال قرار می‌گیرد (Mohanty, 2013; Pradhan et al., 2018). نتایج بررسی‌ها نشان دادند که تغییرات عدد فرود بر الگوی تنش برشی تأثیر می‌گذارد، در حالی که تغییرات در نسبت عرض به عمق بر الگوی جریان ثانویه و توزیع تنش برشی تأثیر می‌گذارد. افزون بر این، برهمکنش‌های غیرخطی بین جریان اصلی و جریان ثانویه نقش مهمی در تعیین الگوی جریان در کانال‌های با سینوسیته بالا ایفا می‌کند که منجر به یک نیمرخ سرعت عرضی یکنواخت‌تر می‌شود و روند تکامل پیچان را کاهش می‌دهد (Moncho-Esteve., 2018). همچنین، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های مختلف مانند ANSYS-FLUENT و CCHE-2D با موفقیت ویژگی‌های

جریان پیچیده، از جمله جریان‌های ثانویه، در کنال‌های پیچان با هندسه‌های مختلف را به نشان دادند. Seo et al. (2006) به بررسی ویژگی‌های جریان اولیه و جریان‌های ثانویه در کانال‌های منحنی S با سینوسیته ۱/۵۲ پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که شدت آشفتگی در کانال‌های پیچان با انحرافات سرعت بیشتر در جریان اولیه و توسعه بیشتر جریان‌های ثانویه، به ویژه در خم دوم افزایش می‌یابد. شدت جریان ثانویه در ساحل خارجی به طور مشخص توسعه می‌یابد و در بخش مستقیم، کم و در قوس‌ها زیاد است. همچنین شدت جریان ثانویه در قوس‌ها دو تا سه برابر در مقطع مستقیم بوده و در قوس دوم بیشینه مقدار خود را دارد. (Kozioł, 2013) به بررسی تغییرات شدت آشفتگی مکانی در یک کانال مرکب و تأثیر پوشش گیاهی سیلابدشت (درختان صلب) بر شدت آشفتگی پرداختند. عمق نسبی (نسبت عمق جریان روی سیلابدشت به عمق کل جریان) در این کانال بین ۰/۳۴ تا ۰/۴۳ در نظر گرفته شد. بالاترین مقادیر شدت تلاطم نسبی در سیلابدشت اندازه‌گیری شد. مقادیر کمتر شدت آشفتگی نسبی بر روی سواحل شیب‌دار کانال اصلی وجود داشت. وجود درختان روی سیلابدشت، منجر به تغییرات قابل توجهی در مقادیر شدت آشفتگی نسبی در کل کانال مرکب نشدند، اما باعث تغییر در توزیع عمودی شدت آشفتگی نسبی در سه مؤلفه در سیلابدشت و در بالای کف کانال اصلی مشاهده شدند. مطالعات نشان می‌دهد که تلفات انرژی در کانال‌های مرکب پیچان تحت تأثیر عواملی مانند اصطکاک مرزی، جریان ثانویه و انبساط و انقباضها است. (Shiono et al., 1999) به بررسی تلفات انرژی ناشی از اصطکاک مرزی، جریان ثانویه، آشفتگی، انبساط و انقباض در کانال‌های مرکب پیچان با جریان روی ساحل و اتلاف انرژی ناشی از انقباض و انبساط در کمریند پیچان پرداختند. نتایج آنها نشان داد که سینوسیته و عمق نسبی به طور مستقل سبب تغییر ضریب افت انرژی برشی آشفته (K_s) می‌شود. همچنین نتایج نشان داد مقدار منفی در $Dr = 0.50$ وجود دارد، که نشان می‌دهد که سرعت جریان لایه بالایی سیلابدشت سریع‌تر از لایه پایین‌تر جریان کانال اصلی است. نتایج Akbar et al. (2024) نشان داد که

افزایش سینوسیده (نسبت طول پیچان به طول موج بین دو نقطه مشخص از کانال پیچان تعریف می‌شود) کانال پیچان، با ثلث ملدن پارامترهای دیگر مواد بستر باعث افزایش آبشستگی بستر می‌شود. بیشینه آبشستگی بدون بعد (d_s/y_n)، عمق آبشستگی به عمق جریان) تقریباً در زاویه ۴۵ درجه بود. (Pradhan et al. (2024 به بررسی ویژگی‌های جریان آشفته سه بعدی در یک کانال پیچان تحت شرایط جریان زیر بحرانی، با تمرکز روی چند پارامتر حیاتی مانند رفتار سرعت سه بعدی، انرژی جنبشی آشفته، چولگی و کشیدگی پرداختند. این مطالعه الگوها و روندهای متمایز را در سرعت، انرژی جنبشی آشفته، چولگی و کشیدگی در امتداد مسیر جریان یک کانال پیچان با بستر شنی نشان داد. مشخص شد که این پارامترها به طور قابل توجهی در بخش‌های مختلف متفاوت هستند و تأثیر هندسه کانال و شرایط جریان را برجسته می‌کنند. (Naghavi et al. (2023 رفتار جریان در کانال اصلی از یک کانال مرکب پیچان با بلوک‌ها در یک طرف سیلابدشت را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که دبی جریان در مرکز و محور خم بیشینه است و حداکثر سرعت طولی در کانال اصلی و در مقطعی با حداکثر امتداد بلوک‌ها در سیلابدشت بیشتر از مقطعی با حداقل امتداد بلوک‌ها در سیلابدشت است. حداکثر تنش برشی بر روی بستر در بخش رأس برای همه کانال‌ها در نزدیکی سمت محدب رخ می‌دهد و تنش برشی بستر در تمام مقاطع با کاهش عمق نسبی و در مقطع با حداقل گسترش بلوک‌های سیلابدشت کاهش می‌یابد. (Rao et al. (2022 توزیع سرعت در کانال مرکب پیچان به صورت عددی و آزمایشگاهی با پوشش گیاهی صلب در سیلابدشت را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نیمرخ سرعت در کانال پیچان با پوشش گیاهی از یک الگوی s شکل پیروی می‌کند. حداکثر سرعت در خط مرکزی کانال اصلی رخ داده است. با افزایش عمق نسبی سرعت جریان کاهش یافته است. (Naghavi et al. (2022 رفتار جریان در دو طرف سیلابدشت در کانال مرکب پیچان بررسی کردند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد هنگامی که که تراکم بلوک‌ها در سیلابدشت ۶/۲ درصد و کمتر است با افزایش

عمق نسبی ضریب زبری مانینگ کاهش یافته است. همچنین نتایج آنها نشان داد که در همه تراکم‌ها (۹/۷ تا ۲۳/۷ درصد) ضریب زبری مانینگ با افزایش عمق نسبی، افزایش یافته و بیشینه تنش برشی در بستر کانال اصلی و نزدیک قسمت محدب رخ داده است. (Zeng et al. (2022 توزیع سرعت، تغییر عمق و انتقال رسوب را در یک کانال مرکب پیچان با پوشش گیاهی و بستر ماسه درشت دانه بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش تراکم پوشش گیاهی سرعت جریان در کانال اصلی افزایش یافته است و تبادل مومنتوم با افزایش تراکم پوشش گیاهی افزایش یافته است. (Baghlani (2013، با استفاده از مدل‌های پراکندگی شرایط جریان در خم کانال را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که توزیع قانون توان با تخمین درستی از شدت جریان ثانویه، بهترین نتایج را در شبیه‌سازی دو بعدی جریان عمق میانگین ارائه می‌دهد. (Modalavalasa et al. (2023 رفتار هیدرودینامیکی کانال مرکب پیچان با سینوسیده کم را با طرح‌بندی‌های مختلف پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر در سیلابدشت مطالعه کردند و دریافتند که وجود تراکم بالای پوشش گیاهی سیلابدشت منجر به افزایش سرعت جریان تا ۲۳ درصد در کانال اصلی می‌شود و ساختارها و پارامترهای آشفتهگی در فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی افزایش یافته است. (Rajaratnam & Ahmadi (1979 از نتایج نشان دادند که تنش برشی بستر از مرکز کانال اصلی به سمت لبه کانال اصلی کاهش می‌یابد. پس از آن تنش برشی بستر به سرعت در حفاصل کانال اصلی و سیلابدشت افزایش می‌یابد. همچنین در قسمت سیلابدشت نزدیک به دیواره و بخشی از عرض آن کاهش می‌یابد. (Mohanty et al. (2012 با بررسی خصوصیات جریان در کانال مرکب پیچان عریض نشان دادند که تنش برشی در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت بیشینه مقدار را دارد و پس از آن به سمت دیواره مقابل و روی سیلابدشت به سمت دیواره کاهش می‌یابد.

با توجه به سازگاری بیشتر کانال‌های مرکب پیچان با آبراهه‌های طبیعی، مطالعه هیدرولیک و هیدرودینامیک جریان در این گونه کانال‌ها مورد توجه محققان مختلف است. با مرور نتایج

تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود که بیشتر ارزیابی‌ها بر روی کانال‌های مستقیم انجام شده است و برای آن دسته از مطالعات انجام شده روی کانال‌های مرکب پیچان، تأثیر عواملی چون پوشش گیاهی و انتقال رسوب در نظر گرفته شده است. با وجود رخداد سیلاب در رودخانه‌ها و گسترش جریان از آبراهه اصلی به سیلابدشت‌ها، درک بیشتر و بهتر تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در کانال‌های مرکب پیچان و پیچان برای مدیریت و رویارویی با سیل، با توجه به زیان‌های جانی و مالی فراوان آن و حفاظت سواحل بسیار ضروری است. از بین تحقیقاتی که تغییرات هیدرولیک جریان در کانال مرکب پیچان بررسی کردند، تعداد بسیار کمی به مقایسه بین شرایط جریان آبراهه اصلی و جریان سیلابدشتی پرداختند و تنها جریان در شرایط سیلابدشتی را بررسی کردند. بنابراین نیاز به درک بهتر و بیشتر تغییرات جریان بین دو شرایط جریان درون آبراهه اصلی و جریان سیلابدشتی احساس می‌شود. در این پژوهش، تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در هر دو شرایط جریان سیلابدشتی و کانال اصلی شامل تغییرات سرعت متوسط عمقی جریان، تنش برشی بستر و دیواره‌ها و لئوژی جنبشی در دو عمق ($D = 0.12 \text{ m}$) و عمق نسبی ($D_r = 0.46$) بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به منظور بررسی هیدرودینامیک جریان در کانال اصلی از یک کانال مرکب پیچان در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. آزمایش‌ها در یک فلوم مجهز به سیستم گردش آب، با طول ۱۰ متر، عرض ۰/۷۸ متر و عمق ۰/۵ متر انجام شد. دیواره کانال از جنس شیشه شفاف بود. آبراهه مرکب پیچان با دیواره و سطح سیلابدشت بتنی در داخل کانال ساخته شد. بیشینه عرض سیلابدشت ۰/۴۸ متر و کمترین مقدار عرض آن ۰/۱ متر بود. ارتفاع دیواره کانال اصلی ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شد (Mostafa et al., 2018). ضریب سینوسیته آبراهه پیچان ۱/۳ و شیب طولی در کانال اصلی و سیلابدشت ۰/۰۰۳ بود. در محل ورود آب از مخزن به داخل آبراهه پیچان از صفحه مشبک و پس از آن از مواد کاهنده انرژی برای از

بین بردن آشفتگی استفاده شد. شکل (۱(a)) فلوم آزمایشگاهی و مدل آبراهه مرکب پیچان ترسیم شده در نرم افزار Spaceclaim را نشان می‌دهد. سرعت سنج صوتی سه بعدی (ADV) برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت در جهات (x , y و z) استفاده شده است (شکل ۱(b)). به منظور تنظیم دبی جریان از دستگاه اینورتور استفاده شد، که برای هر دبی جریان (حجمی) مورد نظر، بسامد مربوط به آن ثبت و در بازه (۳۰-۶۵ هرتز) واسنجی شد و در نهایت برای دستیابی به بسامد و در نتیجه دبی مورد نظر، منحنی دبی-اشل - بسامد آن بدست آمد. دبی جریان عبوری از کانال اصلی برابر ۱۰/۴ لیتر بر ثانیه، عدد فرود برابر ۰/۳ و عدد رینولدز برابر ۲۱۳۰۶ اندازه‌گیری شد. دبی در جریان سیلابدشتی (دبی عبوری از کانال اصلی و سیلابدشت‌ها) با عمق نسبی (۰/۴۶) برابر ۳۱/۶۴ لیتر بر ثانیه و عدد فرود و رینولدز به ترتیب ۰/۲۱ و ۲۳۰۰۰ است. همه آزمایش‌ها در شرایط جریان یکنواخت و به‌طور کامل آشفتگی انجام شد. برای تنظیم عمق جریان در محدوده مورد نظر و برقراری جریان یکنواخت از یک دریچه انتهایی استفاده شد. جهت جریان در کانال اصلی پیچان با دیواره کانال اصلی موازی است. بنابراین، جهت در امتداد دیوار کانال اصلی پیچان به عنوان مختصات جریانی x و عمود بر آن به عنوان مختصات جانبی y تعریف شد. همه داده‌های آزمایشگاهی در مقاطع CS1 تا CS8 عمود بر جهت جریان اولیه در کانال اصلی ثبت شد. در کانال اصلی پیچان، ۱۳ برش از خطوط اندازه‌گیری عمودی مرتب شده و با فاصله جانبی یک سانتی‌متر از هم جدا شدند. این خطوط اندازه‌گیری در CS1-8 به ترتیب از "۱" تا "۱۳" شماره‌گذاری شدند (شکل ۱(c)). همچنین فواصل اندازه‌گیری یکسان برای ۸ نقطه نزدیک به بستر ۰/۵ میلی‌متر بین دو نقطه عمودی و ۸ نقطه بعدی به سمت سطح آب یک سانتی‌متر در کانال اصلی تعریف شد. فاصله نخستین نقطه اندازه‌گیری از دیواره‌های جانبی ۳/۵ سانتی‌متر است.

۲-۱- اندازه‌گیری سرعت جریان و مقاطع اندازه‌گیری

برای بررسی الگوی جریان و هیدرودینامیک جریان در کانال اصلی از سرعت‌سنج سه بعدی داپلر صوتی Nortek (ADV) با فرکانس ۲۵ هرتز استفاده شد. با توجه به اندازه‌گیری سرعت در سه جهت برای هر نقطه (u, v, w) در مدت زمان دو دقیقه با میانگین‌گیری ۳۰۰ داده، سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه به‌دست آمد. در طول کانال مرکب پیچان، مؤلفه‌های سرعت جریان در سه جهت در هشت مقطع از کلنال اصلی و در هر مقطع ۲۰۸ نقطه برداشت شد که در مجموع و با هشت مقطع ۱۶۶۴ نقطه برداشت شد. شکل (۱(c)) شبکه اندازه‌گیری داده‌های سرعت لحظه‌ای را در صفحه $y-z$ و در یک مقطع از کانال اصلی نشان می‌دهد. مدت زمان ثبت داده‌های سرعت

نقطه‌ای در هر موقعیت، ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده از از رسم سری زمانی مؤلفه‌های سرعت نشان داد که نوسانات سرعت بعد از گذشت ۱۰۰ ثانیه روند یکنواختی را طی می‌کند (شکل ۱(d)). شکل ۲ مقاطع اندازه‌گیری سرعت در جریان عبوری از کانال اصلی و جریان سیلابدشتی را نشان می‌دهد. در جریان کانال اصلی در ۸ نقطه از کف در کانال اصلی فواصل ۵ میلی‌متر و در نقاط نزدیک سطح آب یک سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شکل ۳ شبکه نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه بعدی سرعت برای جریان سیلابدشتی نشان می‌دهد. مؤلفه‌های سرعت برای جریان سیلابدشتی در دو قسمت سیلابدشت‌ها و کانال اصلی اندازه‌گیری شدند. در قسمت سیلابدشت با بیشترین عرض (۴۸/۰ متر) ۲۱ نقطه در جهت عرضی و برای هر نقطه، ۱۲ نقطه عمودی اندازه‌گیری

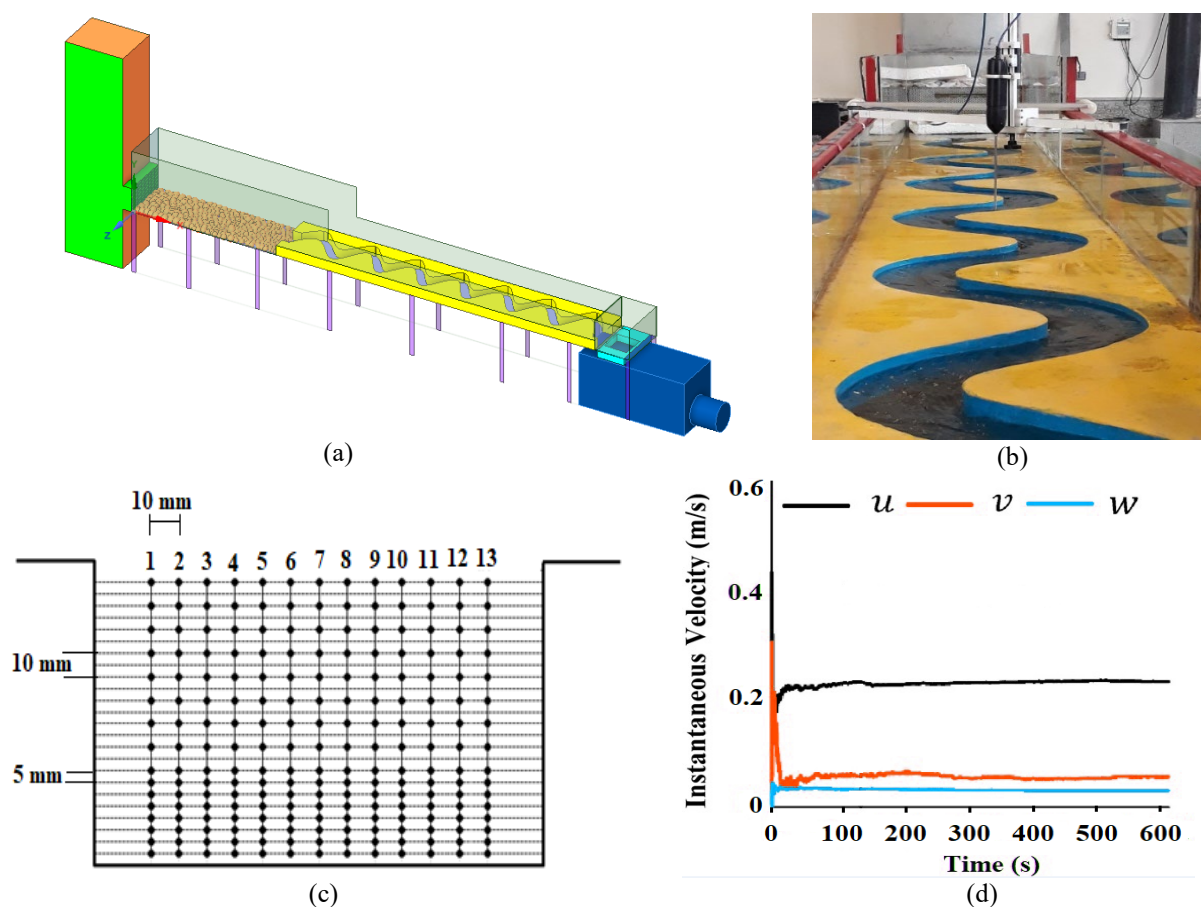


Fig. 1 (a) A view of the laboratory channel with a meandering compound channel geometry, (b) the flow in the main channel and the Acoustic Doppler velocimetry (ADV), (c) the network of velocity measurement points in a section of the main channel and d) Time series plot of average velocity data with velocimeter ADV

شکل ۱ (a) نمایی از کانال آزمایشگاهی با هندسه کانال مرکب پیچان (b) جریان در کانال اصلی و سرعت‌سنج صوتی سه بعدی (ADV) و (c) شبکه نقاط اندازه‌گیری سرعت در یک مقطع از کانال اصلی و (d) نمودار سری زمانی داده‌های سرعت متوسط با سرعت‌سنج ADV

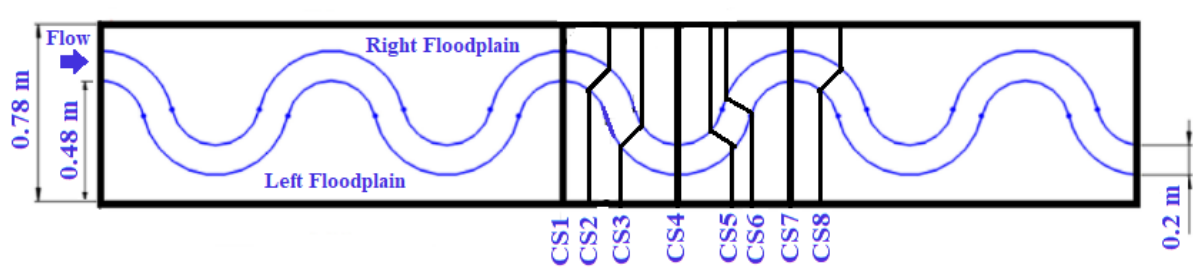


Fig. 2 Meandering compound channel with velocity measurement sections in the main channel and flood plains

شکل ۲ کانال مرکب پیچان با مقاطع اندازه‌گیری سرعت در کانال اصلی و سیلابدشت‌ها

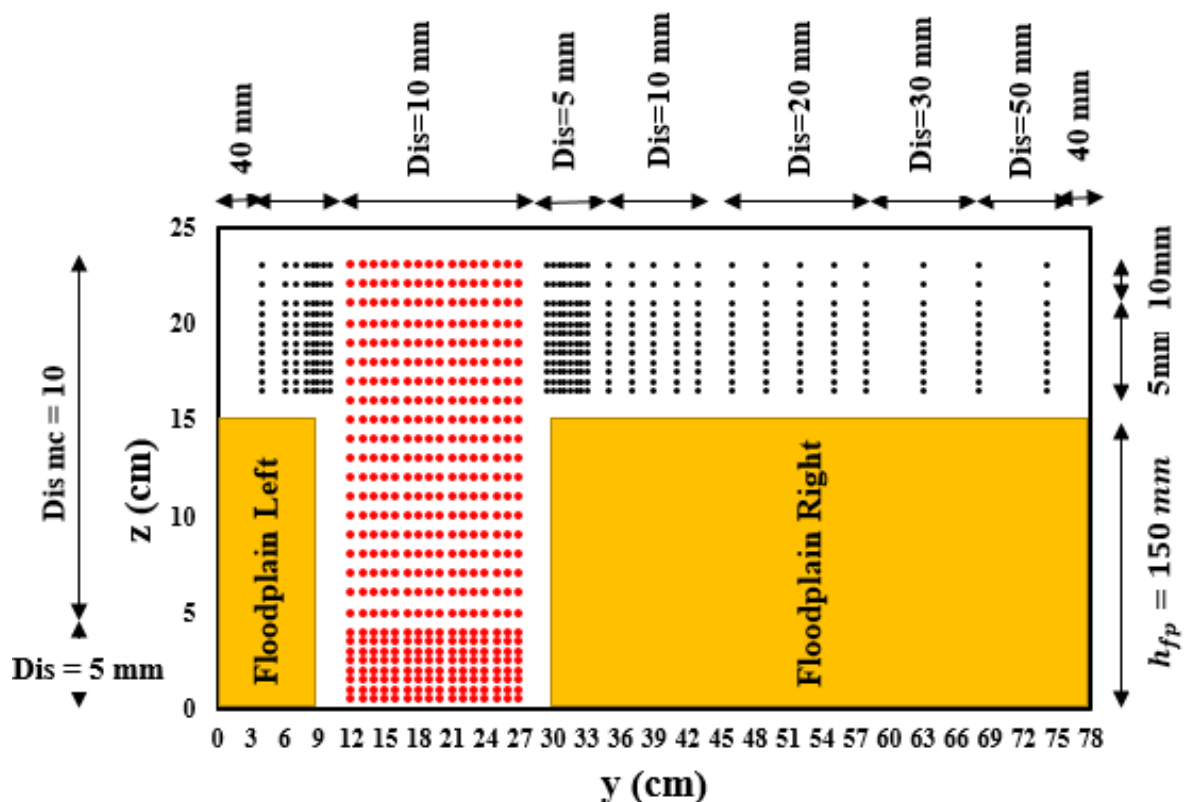


Fig. 3 The network of velocity measurement points in the transverse section (CS4) of meandering compound channel

شکل ۳ شبکه نقاط اندازه‌گیری سرعت در مقطع عرضی (CS4) از کانال مرکب پیچان

متغیر بودند. برای نقاط نزدیک بستر همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده کمترین فاصله و برای نقاط نزدیک سطح آب ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بنابراین به‌طور تقریبی در هر مقطع ۷۹۰ نقطه و در مجموع حدود ۴۷۸۰ نقطه اندازه‌گیری شد. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار WinADV، کلیه داده‌های اندازه‌گیری شده که دارای همبستگی کوچک‌تر از ۷۰ درصد و نسبت سیگنال به نویز کوچک‌تر از ۱۵ db حذف شدند.

۲-۲- استخراج داده‌ها

مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای (u , v , w) در سیستم مختصات

شد. فاصله نقاط عرضی همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بین ۵ تا ۵۰ میلی‌متر متغیر است. نقاط نزدیک فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی با فاصله ۵ میلی‌متر به دلیل اهمیت تغییرات سرعت جریان در این ناحیه اندازه‌گیری شدند. برای هر نقطه در جهت عمودی، فاصله نقاط از بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر متغیر است. برای نقاط نزدیک بستر با فاصله ۵ میلی‌متر و نزدیک سطح آب با فاصله ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. برای جریان در کانال اصلی ۱۶ نقطه در جهت عرضی و ۲۷ نقطه در جهت عمودی اندازه‌گیری شدند. فاصله بین نقاط عرضی ۱۰ میلی‌متر و فاصله نقاط عمودی بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر

حرکت کرده و به سمت سطح آب نزدیک می‌شود. تعامل بین سرعت‌های بیشتر در کانال اصلی و سرعت‌های کمتر در سیلابدشت شرایط جریان را پیچیده‌تر می‌کند. این تعامل سبب تغییر تبادلی مومنتوم می‌شود و سرعت متوسط عمقی را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. درک تغییرات سرعت متوسط عمقی در ارزیابی خطر سیلاب و مدیریت رودخانه بسیار مؤثر است. دینامیک قوس‌های پیچان منجر به رخداد سرعت‌های بالاتر و در نتیجه فرسایش در نزدیکی قوس خارجی می‌شود، در حالی که رسوب (بار نقطه‌ای) در قوس داخلی به صورت جانبی توسعه می‌یابد و دامنه خم را افزایش می‌دهد. این الگوی سرعت بیشتر و فرسایش در قوس خارجی و سرعت کمتر و رسوبگذاری در قوس داخلی سبب حفظ تکامل پیچان می‌شود. همچنین حرکت چرخشی ذرات سیال در خم کانال، جریان‌های ثانویه را توسعه می‌دهد که سبب توزیع دوباره سرعت جریان به سمت ساحل خارجی می‌شود (Baghlani, 2013). شکل ۴ تغییرات سرعت متوسط عمقی به سرعت متوسط کل را برای جریان کانال اصلی در مقاطع مختلف نشان می‌دهد. راستای جریان از چپ به راست است که برای مثال در مقطع CS1، تغییرات سرعت متوسط عمق نسبی از قوس داخلی شروع و انتهای مقطع در قوس خارجی قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که در مقاطع CS1، CS6 و CS7 سرعت در انتهای مقطع (قوس خارجی) بیشتر از سرعت در ابتدا و مرکز کانال اصلی بوده است و در مقاطع CS2، CS3، CS8 و CS2 سرعت در مرکز کانال اصلی بیشینه است. با مقایسه تغییرات سرعت متوسط عمقی در حالت جریان سیلابدشتی و جریان کانال اصلی، نتایج متفاوتی مشاهده می‌شود. شکل ۵ تغییرات سرعت متوسط عمقی را برای مقاطع مختلف جریان سیلابدشتی نشان می‌دهد. در حالت جریان سیلابدشتی نسبت سرعت متوسط عمقی به سرعت متوسط کل در قوس داخلی (مقاطع CS1 و CS2) افزایش یافته است و این افزایش سرعت به سمت مرکز کانال اصلی متمایل است. همچنین در مقاطع CS3 و CS6 سرعت در مرکز کانال اصلی بیشینه است. با در نظر گرفتن هر دو شرایط جریان کانال اصلی و سیلابدشتی مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار سرعت

دکارتی (X, Y, Z) بر مبنای تجزیه رینولدز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v', w = \bar{w} + w' \quad (1)$$

در اینجا $\bar{u}$ ، $\bar{v}$ و $\bar{w}$ میانگین زمانی مؤلفه‌های سرعت و u' ، v' و w' نوسان‌های سرعت می‌باشند.

انرژی جنبشی جریان ناشی از تغییرات سرعت در جهت‌های x ، y و z در هر نقطه به صورت رابطه (۲) بیان شده است. در این تحقیق برای بررسی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در دو حالت جریان کانال اصلی و سیلابدشتی با عمق نسبی (D_r)، ۰/۴۶ در نظر گرفته شد. عمق نسبی به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود (Spooner, 2001).

$$k' = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \quad (2)$$

$$(3)$$

$$D_r = \text{Overbank flow} = D_r > 0 \quad D_r = \frac{h_{fp}}{h_{fp} + h_{bf}}$$

که در آن، h_{mc} : عمق جریان در کانال اصلی، h_{bf} : عمق مقطع لبریز و h_{fp} : عمق جریان روی سیلابدشت و برابر ۰/۴۶ است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تغییرات سرعت متوسط عمقی در دو

شرایط جریان سیلابدشتی و جریان کانال اصلی

تغییرات سرعت متوسط عمقی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله سینوسیته و شرایط جریان است. نتایج تحقیقات نشان داد که هنگامی که سینوسیته کانال از مقدار ۱ به ۱/۶ افزایش می‌یابد، بیشینه سرعت متوسط عمقی ۰/۵۵ متر بر ثانیه به ۰/۳۸ متر بر ثانیه کاهش یافته است (Naghavi et al., 2019). این کاهش به دلیل افزایش انحنا کانال است که بر دینامیک جریان و توزیع انرژی اثر می‌گذارد. نیروی گریز از مرکز سبب افزایش سطح آب در خم خارجی در مقایسه با خم داخلی می‌شود. افزایش سطح آب سبب عدم تعادل فشار عمود بر جهت جریان اصلی و در نتیجه ایجاد جریان ثانویه می‌شود. جریان ثانویه، حرکت مارپیچی است که نزدیک خم خارجی وجود دارد و از کف کانال به سمت خم داخلی با عمق کمتر

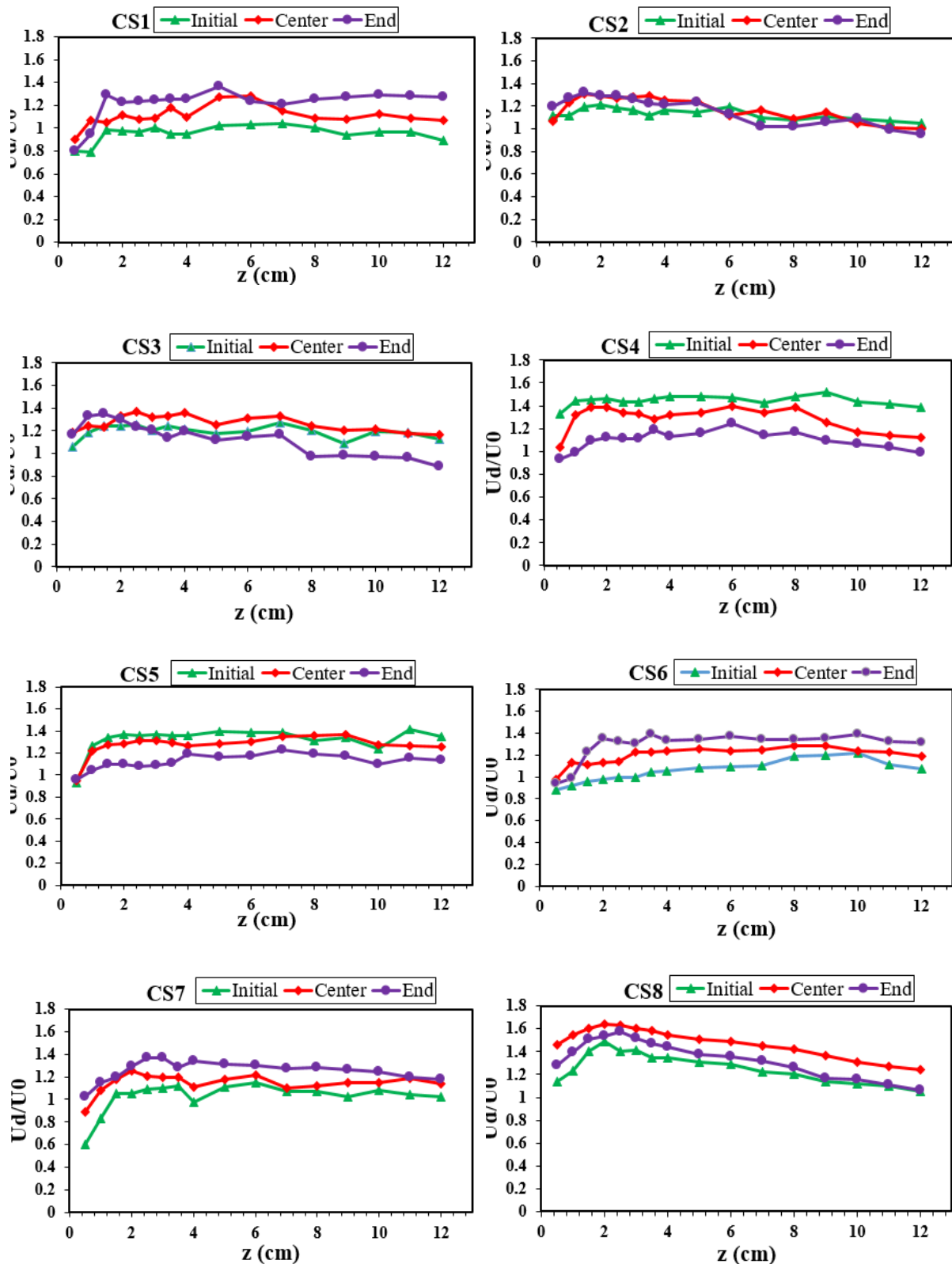


Fig. 4 Variations of transverse average velocity to total average velocity for inbank flow with depth $D = 0.12 \text{ m}$

شکل ۴ توزیع سرعت متوسط عمقی به سرعت متوسط کل جریان در شرایط جریان کانال اصلی با عمق $D = 0.12 \text{ m}$

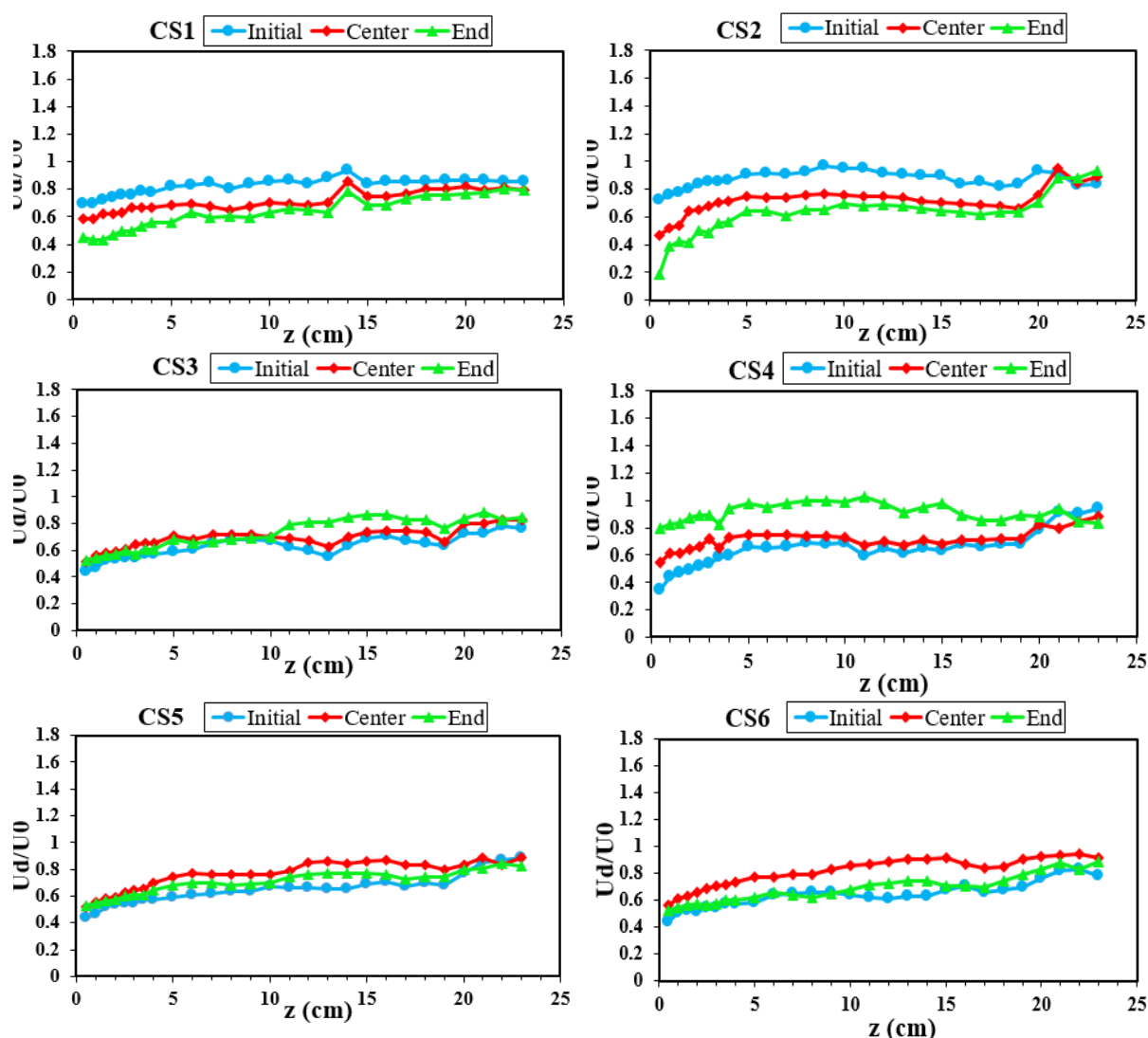


Fig. 5 Changes of transverse average velocity to total average for overbank flow with relative depth $D_r = 0.46$

شکل ۵ تغییرات سرعت متوسط عمقی به سرعت متوسط کل در شرایط جریان سیلابدشتی با عمق نسبی $D_r = 0.46$

را تحت تأثیر قرار می‌دهد. جریان در یک کنال پیچان با خطوط جریانی مشخص می‌شود که رسوب را به سمت ساحل بیرونی و داخلی هدایت می‌کند و منجر به فرسایش پیوسته در دیواره بیرونی و رسوبگذاری در دیواره داخلی می‌شود. این فرآیند فرسایش و رسوبگذاری باعث مهاجرت کنال پیچان می‌شود (Mahato et al. 2021). در یک کنال پیچان، تغییرات انرژی جنبشی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند دبی، انحنای کنال و زبری بستر قرار می‌گیرد (Singh et al., 2019; Zhang et al., 2021; Pan et al., 2022). توزیع سرعت در امتداد مسیر پیچان، تغییراتی را در ضرایب تصحیح مومنوم و انرژی به دلیل تغییرات جانبی و طولی در نیمرخ‌های سرعت نشان می‌دهد. در

متوسط عمقی به ترتیب برابر $1/7$ و $0/9$ است و با تغییر شرایط جریان از جریان کنال اصلی به سیلابدشتی، سرعت متوسط عمقی حدود ۹۰ درصد کاهش یافته است.

۳-۲ انرژی جنبشی جریان در دو شرایط جریان سیلابدشتی و جریان کنال اصلی

توزیع انرژی جنبشی در یک کنال پیچان تحت تأثیر الگوهای جریان‌های ثانویه است که به دلیل انحنای کنال ایجاد می‌شوند. وجود تناوب و پیچان‌ها منجر به توسعه جریان‌های ثانویه مانند گردابه‌ها می‌شود که بر ویژگی‌های اختلاط جریان تأثیر می‌گذارد. توزیع انرژی جنبشی در یک کنال پیچان به طور قابل توجهی پویایی انتقال رسوب

در کانال اصلی نشان می‌دهد که بیشینه انرژی جنبشی در قوس خارجی رخ داده است و به سمت مرکز کانال اصلی متمایل است (شکل ۶). در مقاطع CS2، CS3 و CS8 بیشینه انرژی جنبشی در مرکز کانال اصلی رخ می‌دهد. در شرایط جریان سیلابدشتی تغییرات انرژی جنبشی با مقدار بیشینه آن در دیواره داخلی کانال اصلی و روی سیلابدشت‌ها رخ داده است. در فاصله $55\text{ cm} \leq y \leq 65\text{ cm}$ از سیلابدشت راست (قوس داخلی) انرژی جنبشی کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش سرعت در این ناحیه بویژه در مقاطع CS2، CS3 و CS6 قابل مشاهده است. همچنین در مقاطع CS2، CS5 و CS6 مشاهده می‌شود که بیشینه انرژی جنبشی در مرکز کانال اصلی رخ داده است و به سمت قوس خارجی متمایل است (شکل ۷). حداکثر مقدار انرژی جنبشی جریان در کانال اصلی ۷۵

کانال‌های پیچان مقاومت در برابر جریان افزایش می‌یابد، و مقاومت بیشتر در جریان‌های با سینوسیته متوسط و نسبت عرض به عمق کوچک، بر تعادل انرژی جنبشی تأثیر می‌گذارد. افزون بر این، برهمکنش بین نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار در خم‌ها منجر به جریان‌های ثانویه می‌شود که بر توزیع سرعت طولی و سطوح انرژی جنبشی آشفته‌گی تأثیر می‌گذارد. درک این پویایی برای کاربردهایی مانند حفاظت از ساحل، ناوربری و مدیریت انتقال رسوب در رودخانه‌های پیچان بسیار مهم است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات انرژی جنبشی جریان در کانال اصلی و جریان سیلابدشتی را نشان می‌دهند. راستای جریان از چپ به راست است (برای مثال در مقطع CS1، قوس داخلی در سمت چپ و قوس خارجی در سمت راست است). نتایج به‌دست آمده از خطوط هم تراز انرژی جنبشی

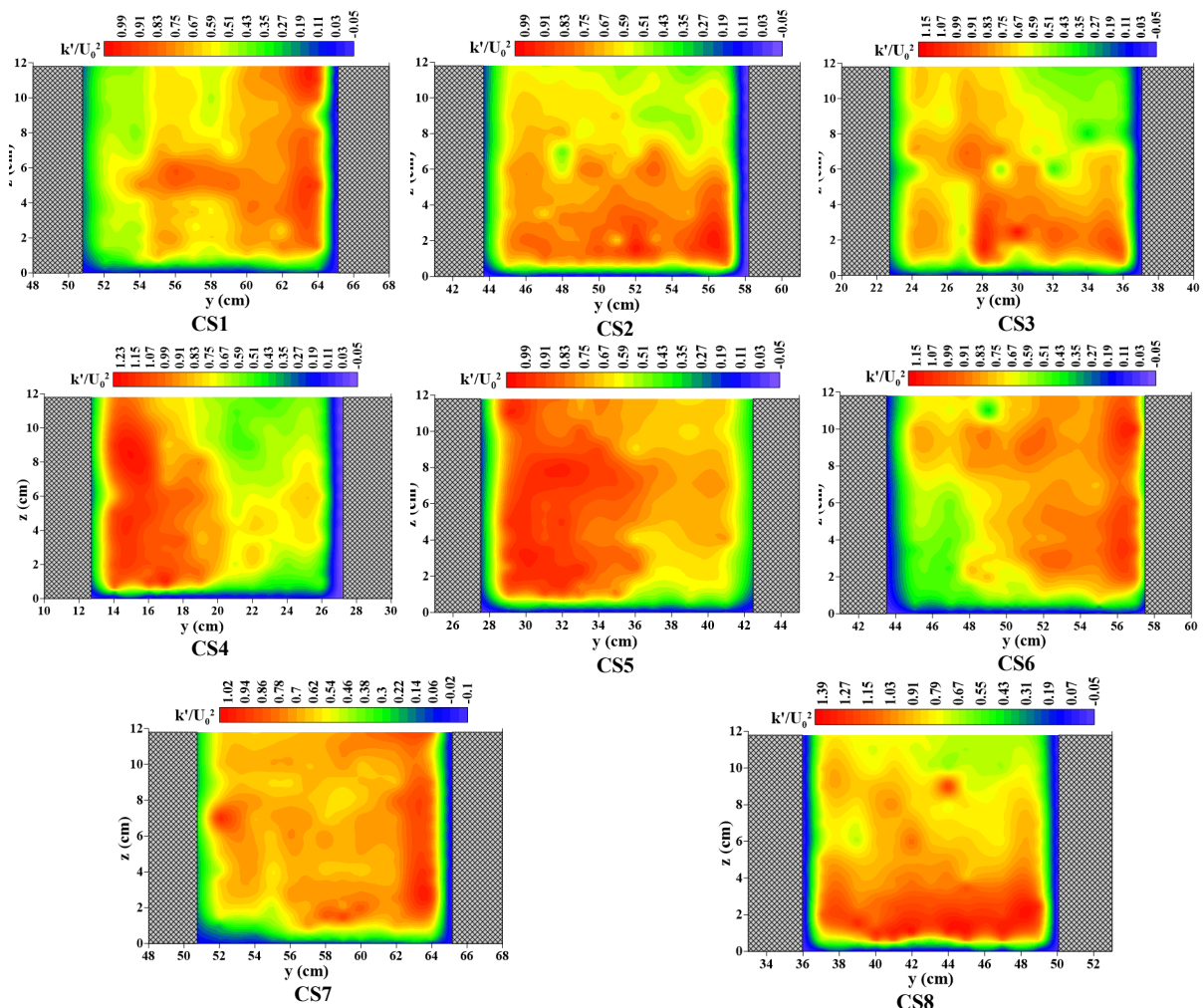


Fig. 6 Kinetic energy contours of the flow in the main channel of the meandering compound channel at different sections

شکل ۶ خطوط هم تراز انرژی جنبشی جریان در کانال اصلی از کانال مرکب پیچان در مقاطع مختلف

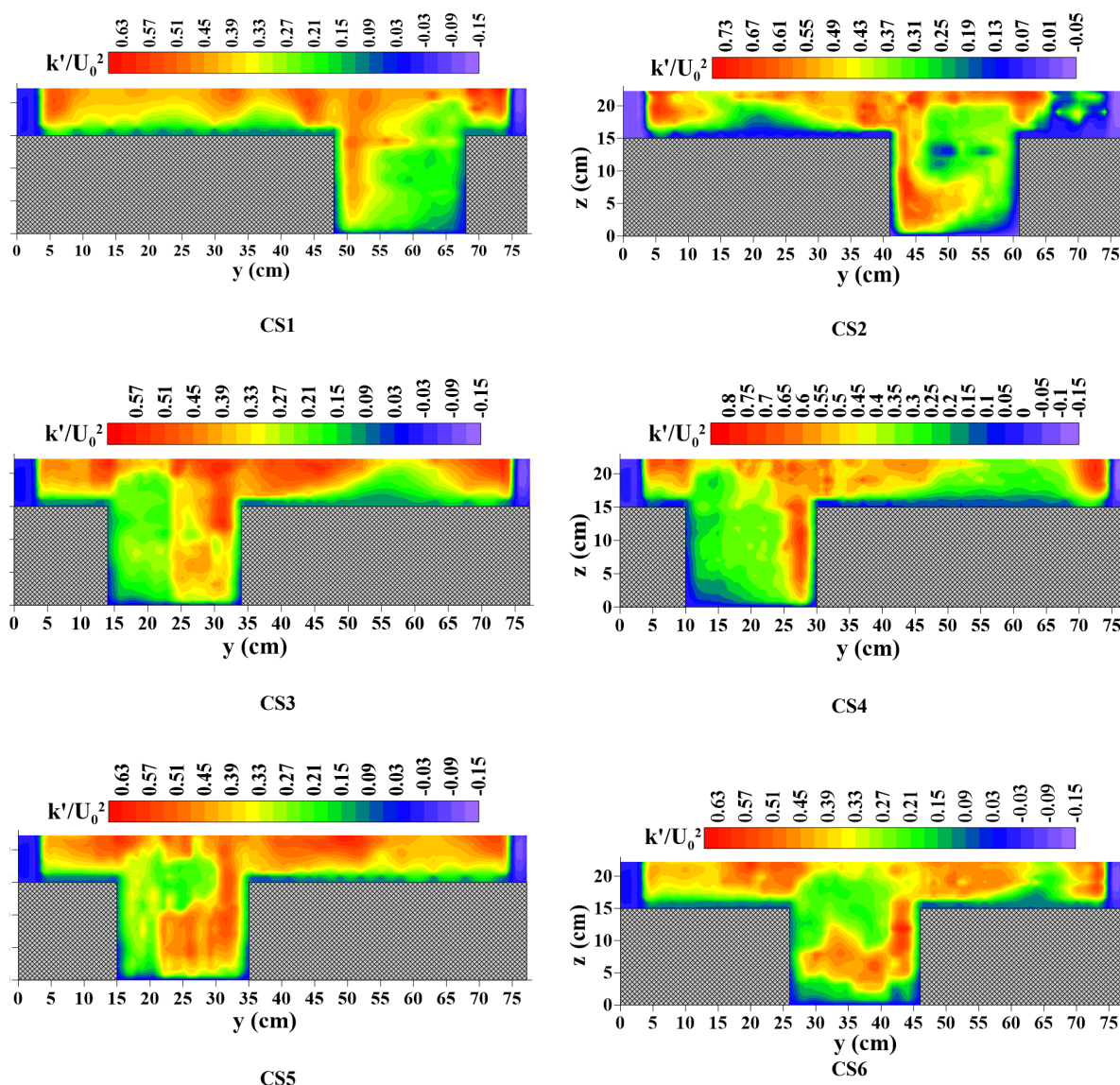


Fig. 7 Kinetic energy contours in floodplain flow of meandering compound channel at different sections
 شکل ۷ خطوط هم تراز انرژی جنبشی جریان در جریان سیلابدشتی از کانال مرکب پیچان در مقاطع مختلف

جریان سیلابدشتی و کانال اصلی

سرعت جریان در سیلابدشت به طور معمول از سرعت در کانال اصلی کمتر است. به دلیل سرعت‌های متفاوت بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها، تنش برشی در مرز بین آنها ایجاد و سبب شکل‌گیری گردابه‌ها می‌شود (Mohanta et al. 2020). تنش‌های برشی نسبی بستر برای جریان‌های سیلابدشتی و جریان کانال اصلی در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نشان داده شده است. برای محاسبه‌ی تنش برشی در کانال‌های پیچان روابط مختلفی از جمله روش لوله پرستون (Preston Tube)، روش رگرسیون خطی و روش عمق میانگین بکار می‌روند. در این مطالعه از روش عمق

درصد بیشتر از بیشینه مقدار آن در شرایط جریان سیلابدشتی است. با افزایش عمق جریان از شرایط جریان کانال اصلی به جریان سیلابدشتی و گسترش جریان، مقاومت اصطکاکی افزایش یافته و منجر به سرعت‌های کم در سیلابدشت و سرعت‌های بیشتر در کانال اصلی و در نتیجه افزایش انرژی جنبشی در کانال اصلی می‌شود. همچنین تعامل بین حرکت سریع‌تر جریان در کانال اصلی و حرکت کندتر در سیلابدشت، تبادل مومنوم قابل توجهی رخ داده و باعث اتلاف انرژی می‌شود.

۳-۳- تغییرات تنش برشی بستر و دیواره در

تنش برشی بستر در فصل مشترک کانال اصلی و سیلابدشت با عرض بیشتر به دلیل افزایش تبادل مومنتوم در این ناحیه رخ داده است و پس از آن به سمت انتهای سیلابدشت کاهش و دوباره افزایش یافته است (شکل ۹). تغییرات تنش برشی نسبی بستر برای هر دو شرایط جریان کانال اصلی و سیلابدشتی نشان می‌دهد که میزان آن بین ۰/۵ تا ۱/۱۵ متغیر است. (Randle (2020، با بررسی حداقل و حداکثر تنش برشی بدون بعد بستر (τ_R) نسبت تنش برشی موضعی در مرز منحنی شکل (τ_w/τ_0) به تنش برشی تعادلی در امتداد خط مرکزی یک کانال مستقیم طولانی با شکل مقطع یکسان (τ_0) برای سینوسیته‌های مختلف کانال پیچان (۳-۱/۱۰) نشان داد که حداقل تنش‌های برشی بی بعد با افزایش سینوسیته کلنل از مقدار ۱/۱۰ تا ۱/۵۰ به ترتیب به مقادیر ۰/۴۶ تا ۰/۸۶ کاهش یافته است. پس از آن با یک شیب ملایم روند افزایشی را دنبال می‌کند. برای مقدار سینوسیته ۱/۲۵

میانگین (Balouchi et al. 2022) استفاده شد. در روش عمق میانگین رابطه تنش برشی به صورت $\tau_{bx} = C_f \rho \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ و $\tau_{by} = C_f \rho \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ تعریف می‌شود و تنش برشی کل برابر است با: $\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2}$. در اینجا $C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$ (R) شعاع هیدرولیکی؛ n ضریب زبری مانینگ) ضریب شزی است و پارامترهای $\bar{u}$ و $\bar{v}$ سرعت متوسط عمق در جهت طول و عرض کانال است. راستای جریان از چپ به راست است (برای مثال در مقطع CS1، قوس داخلی در سمت چپ و قوس خارجی در سمت راست است). با توجه به شکل ۸ بیشینه تنش برشی بستر از خط مرکزی کانال اصلی به سمت دیواره قوس خارجی همانطور که در مقاطع CS1، CS2 و CS6 مشاهده می‌شود، متمایل است. در مقاطع میانی بیشترین تغییرات تنش برشی بستر در ناحیه مرکزی بستر کانال اصلی رخ می‌دهد، همانطور که در مقاطع CS2، CS3 و CS8 مشاهده می‌شود. در جریان سیلابدشتی حداکثر

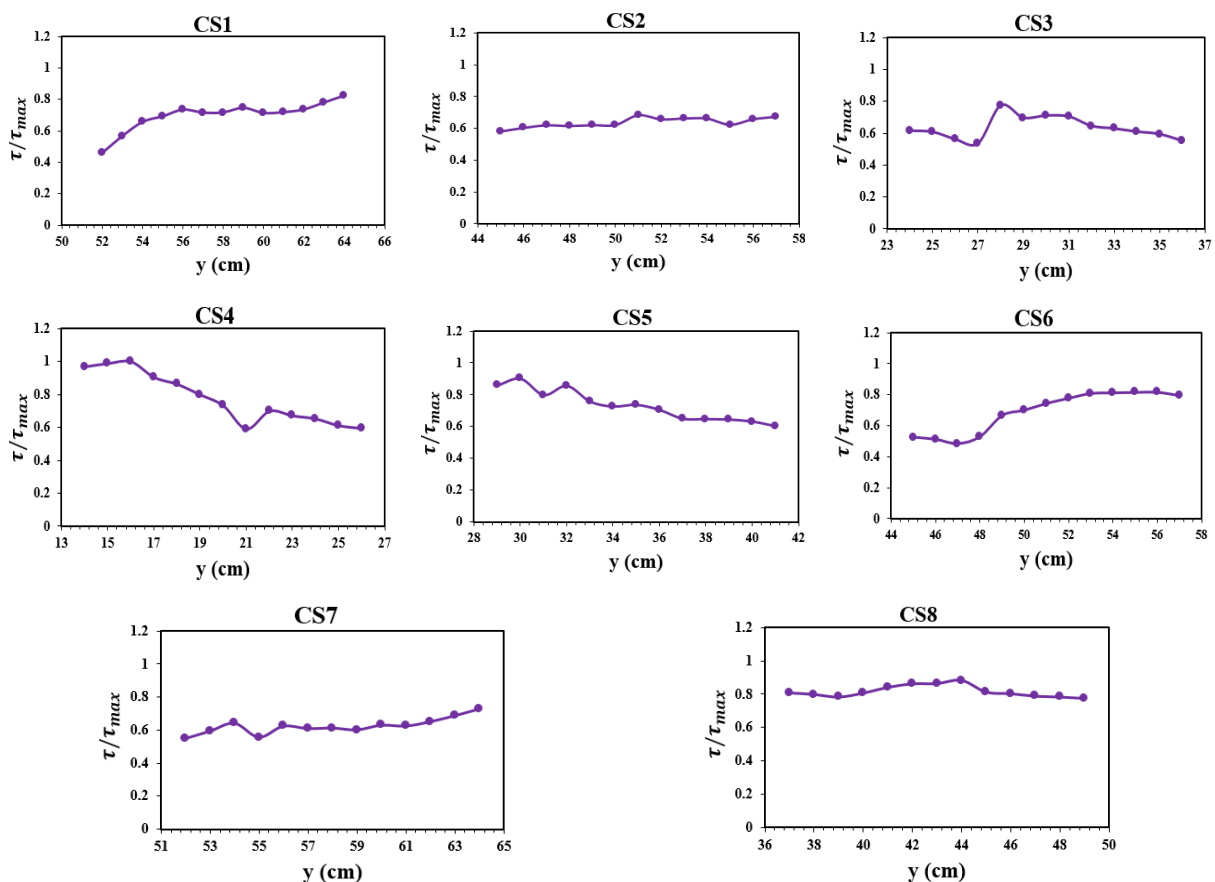


Fig. 8 Changes of bed shear stress to maximum shear for inbank flow, $D = 0.12 \text{ m}$

شکل ۸ تغییرات تنش برشی بستر به بیشینه تنش برشی در شرایط جریان کانال اصلی با عمق $D = 0.12 \text{ m}$

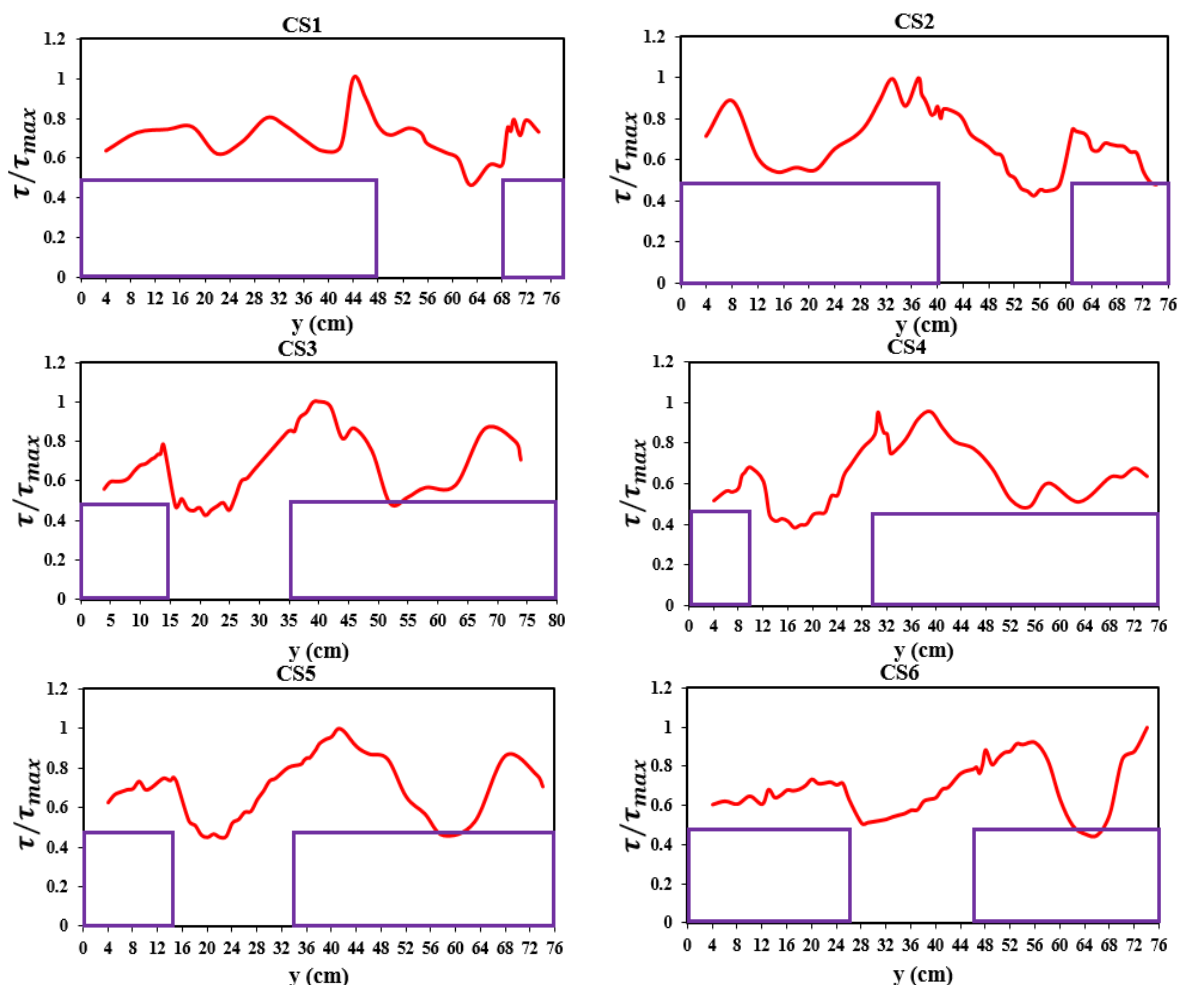


Fig. 9 Variations of bed shear stress to maximum shear stress for overbank flow with relative depth $D_r = 0.46$

شکل ۹ تغییرات تنش برشی بستر به بیشینه تنش برشی در شرایط جریان سیلابدشتی با عمق نسبی $D_r = 0.46$

تنش برشی را در حالت جریان کانال اصلی و سیلابدشتی در جهت z نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از نیمرخ تغییرات تنش برشی دیواره نشان می‌دهد بیشینه تنش برشی در حالت جریان کانال اصلی در قوس خارجی رخ داده است و در رأس قوس بیشترین تفاوت بین مقدار تنش برشی دیواره داخلی و خارجی وجود دارد و در مقاطع میانی تفاوت کمتری بین تنش‌های برشی دیواره داخلی و خارجی وجود دارد. تغییرات تنش برشی در طول دیواره‌های کلنال منجر به تغییرات فرسایش و در نتیجه تغییرات هندسه کانال‌های پیچان می‌شود. تنش برشی در مسیره‌های خم کانال در مقایسه با بخش‌های مستقیم بیشتر است و دلیل آن، اثر نیروی گریز از مرکز بر جریان است که هسته جریان با سرعت بالا را به سمت ساحل خارجی حرکت می‌دهد. نیروی گریز از مرکز در اثر انحنای

(مقدار نزدیک به سینوسیته در تحقیق حاضر، $1/3$)، حداقل تنش برشی بستر بین 0.56 تا 0.7 و بیشینه تنش برشی بستر بین $1/10$ تا $1/75$ برای دبی‌های مختلف متغیر است.

درک تغییرات تنش برشی در کانال‌های پیچان برای پیش‌بینی فرسایش ساحل و توسعه عرضی کانال، فرآیندهای انتقال رسوب بسیار ضروری است و در مهندسی رودخانه و بخش‌های مدیریتی کاربرد بسیار دارد. توزیع تنش برشی در طول کانال یکنواخت نیست. در کانال‌های پیچان، تغییرات تنش برشی بین قوس‌های خارجی و داخلی کانال قابل توجه است. همچنین وجود جریان‌های ثانویه ناشی از قوس‌های متعدد در کلنال می‌تواند توزیع تنش برشی را تحت تأثیر قرار دهد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات تنش برشی دیواره داخلی و خارجی به بیشینه

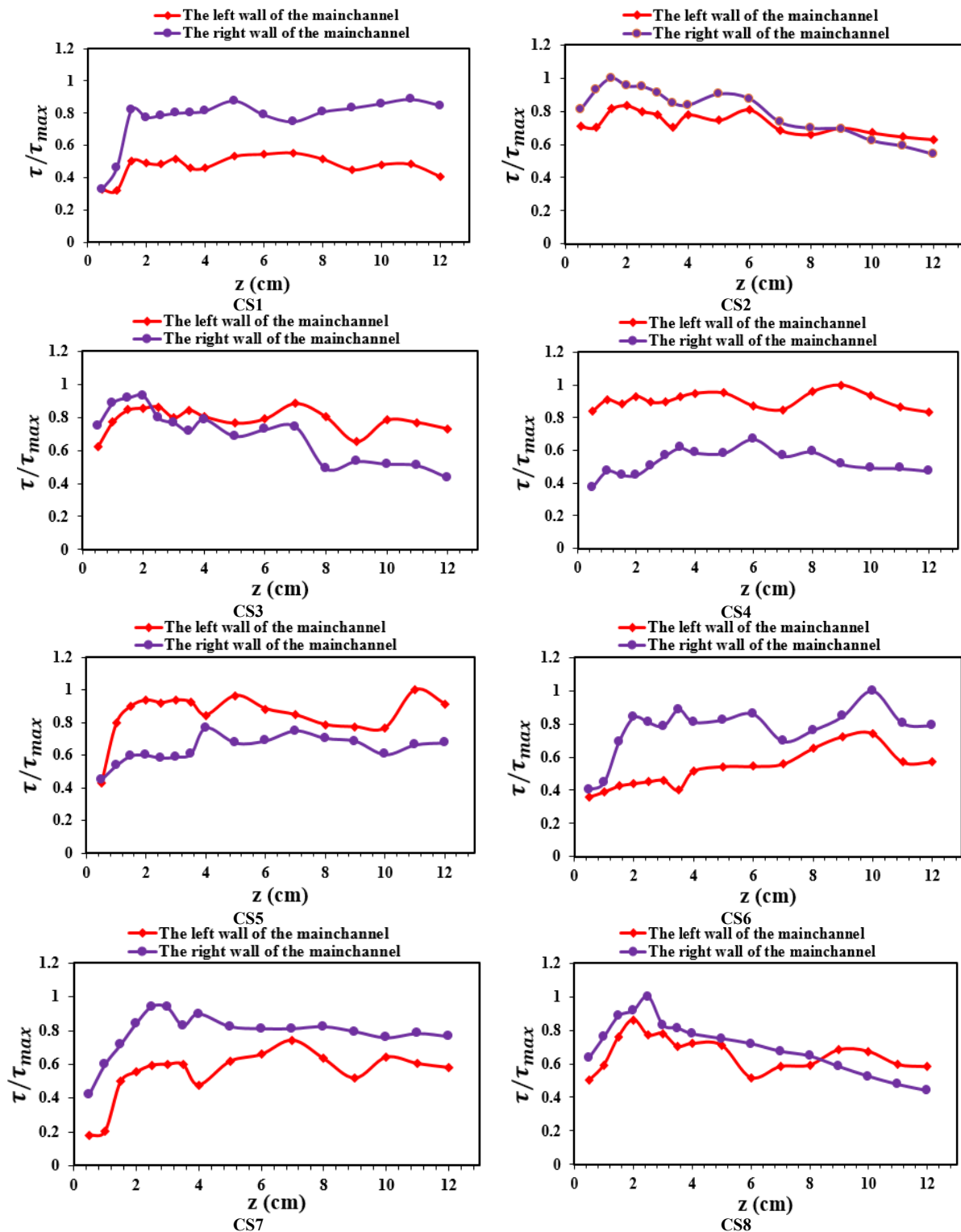


Fig. 10 Profiles of wall shear stress ratio to maximum shear stress for inbank flow $D = 0.12 \text{ m}$

شکل ۱۰ نیمرخ‌های نسبت تنش برشی دیواره به تنش برشی بیشینه در کانال اصلی با عمق $D = 0.12 \text{ m}$

می‌دهد که بیشترین تنش برشی دیواره در قوس داخلی و در مقاطع CS1 و CS2 رخ داده است. با در نظر گرفتن هر دو شرایط جریان کانال اصلی و سیلابدستی می‌توان دریافت که بیشترین مقدار تنش برشی دیواره در نزدیکی

کانال ایجاد می‌شود. توزیع تنش برشی، ظرفیت انتقال رسوب نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و با افزایش تنش برشی، فرسایش انتقال رسوب افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از تغییرات تنش برشی دیواره در حالت سیلابدستی نشان

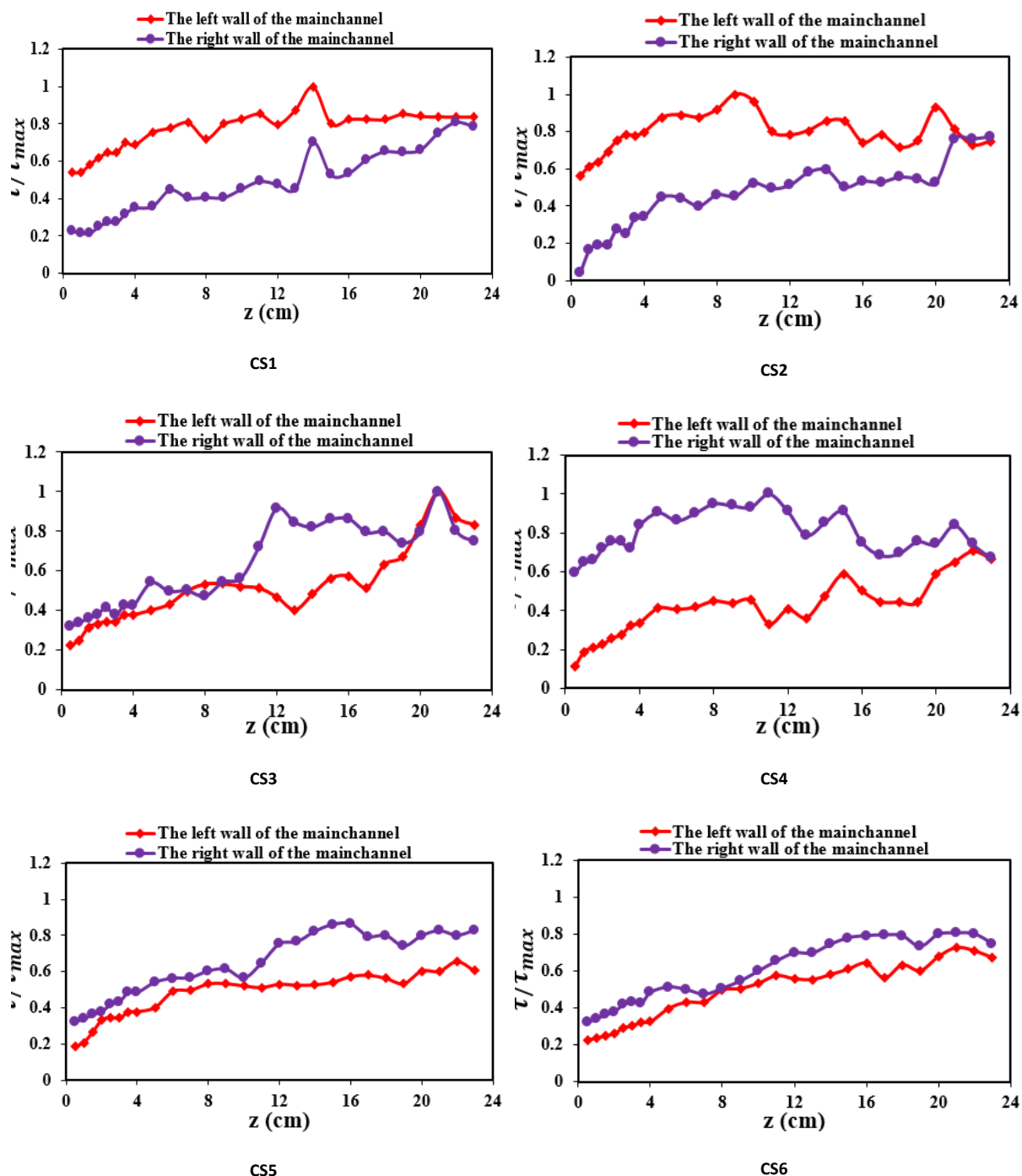


Fig. 11 Profiles of the ratio of wall shear stress to maximum shear stress for overbank flow $D_r = 0.46$

شکل ۱۱ نیمرخ‌های نسبت تنش برشی دیواره به تنش برشی بیشینه در شرایط جریان سیلابدشتی با $D_r = 0.46$

است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مشخصات جریان شامل تنش برشی دیواره، تنش برشی بستر، انرژی جنبشی و تغییرات نسبی سرعت متوسط عمقی جریان در دو شرایط جریان کانال اصلی و

سطح بستر ($1 \leq z \leq 8$ سانتی‌متر) رخ می‌دهد. در مورد مقاطع میانی، بیشینه تغییرات تنش برشی در شرایط جریان سیلابدشتی در نزدیکی سطح آب رخ داده است. در جریان سیلابدشتی تفاوت بین تنش برشی دیواره در قوس داخلی و خارجی در مقایسه با جریان کانال اصلی ناشی افزایش عمق جریان و تأثیر بیشتر مومنوم بر آن، افزایش یافته

۵- منابع

- Akbar, Z., Ahmed Pasha, G., Tanaka, N., Ghani, U. & Hamidifar, H. (2024). Reducing bed scour in meandering channel bends using spur dikes. *International J. Sediment Research*, 39, 243-256.
- Baghlani, A. (2013). On Various Dispersion Models for simulating flow at channel bends. *IJST, Transactions of Civil Engineering*, 37(C2), 285-299. (In Persian)
- Julian, J.P., Thomas, R.E., Moursi, S., Bruce, W. Hoagland, B.W. & Tarhule, A. (2012). Historical variability and feedbacks among land cover, stream power, and channel geometry along the lower Canadian River floodplain in Oklahoma. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 37(4), 449-458.
- Kumar Singh, P., Tang, X., Guan, Y. & Rahimi, H. (2022). Genetic algorithm-assisted data-driven model for boundary shear distribution and stage-discharge: compound open channel flows. *J. Hydrology*, 615(A), 128546, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128546>.
- Kozioł, A.P. (2013). Three-Dimensional Turbulence Intensity in a Compound Channel. *J. Hydraulic Engineering*, 139(8), 852-864.
- Liu, X., Shi, C., Zhou, Y., Gu, Z. & Li H. (2019). Response of Erosion and Deposition of Channel Bed, Banks and Floodplains to Water and Sediment Changes in the Lower Yellow River, China. *Water*, 11(2), 357, <https://doi.org/10.3390/w11020357>.
- Mera, I., Francat, M.J., Anta, J. & Pena, E. (2015). Turbulence anisotropy in a compound meandering channel with different submergence conditions. *Advances in Water Resources*, 81, 142-151.
- McCaffrey, W.F., Blodgett, J.C. & Thornton, J.L. (1988). Channel morphology of Cottonwood Creek near Cottonwood, California, from 1940 to 1985. Water-Resources Investigations Report. No. 87-4251. <https://doi.org/10.3133/wri874251>.
- Modalavalasa S., Chembolu, V., Dutta S. & Kulkarni. (2023). Laboratory investigation on flow structure and turbulent characteristics in low sinuous compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydrology*, 618, 129178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129178>.
- Mohanta, A., Patra, K. & Pradhan, A. (2020). Enhanced channel division method for estimation of discharge in meandering compound channel. *Journal of Water Resource Management*, 34(3), 1047-1073.
- Mohanty, L. (2013). Velocity distribution in trapezoidal meandering channel. MSc thesis, National Institute of Technology, Rourkela.
- سیلابدشتی در دو عمق به ترتیب ($D = 0.12 m$) و ($D_r = 0.46$) در یک کانال مرکب پیچان با سینوسیته $1/3$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد.
- با بررسی تغییرات سرعت متوسط عمقی به سرعت متوسط کل در شرایط جریان کانال اصلی با عمق $D = 0.12 m$ در ابتدا، انتها و مرکز کانال اصلی نتایج نشان داد که در رئوس قوس، بیشینه سرعت متوسط عمقی در قوس خارجی و کمترین مقدار آن در قوس داخلی است. در مورد مقاطع میانی بیشینه سرعت متوسط عمقی در مرکز کانال و در فاصله‌ی $4cm \leq z \leq 10cm$ رخ داد که بیشتر در مقاطع میانی قابل مشاهده است.
- در مورد جریان با عمق نسبی $D_r = 0.46$ بیشینه تغییرات سرعت متوسط عمقی در حدفاصل $10cm \leq z \leq 20cm$ رخ می‌دهد. در مقاطع میانی (حدفاصل دو قوس و پس از آن) بیشینه سرعت متوسط عمقی در مرکز کانال اصلی و در رئوس قوس‌ها در قوس داخلی و کمترین مقدار قوس خارجی است.
- در جریان کانال اصلی با عمق 0.12 متر بیشینه انرژی جنبشی در قوس خارجی رخ داد که به سمت مرکز کانال اصلی متمایل است. در مورد مقاطع میانی بیشینه انرژی جنبشی جریان در مرکز کانال اصلی است و در شرایط جریان با عمق نسبی 0.46 و جریان روی سیلابدشت‌ها بیشینه انرژی جنبشی در قوس داخلی و جریان روی سیلابدشت مشترک با دیواره داخلی رخ می‌دهد.
- تنش برشی بستر در شرایط جریان کانال اصلی بیشترین مقدار تنش برشی بستر در قوس خارجی و کمترین مقدار آن در قوس داخلی و در مقاطع میانی در مرکز کانال اصلی رخ داد.
- تنش برشی دیواره در شرایط جریان با عمق 0.12 متر در دیواره قوس خارجی بیشینه و در مقاطع میانی در نزدیکی بستر رخ داد. همچنین در عمق نسبی 0.46 بیشترین تنش برشی دیواره در قوس داخلی و در حدفاصل $4cm \leq z \leq 12cm$ است و در مورد مقاطع میانی در نزدیکی سطح آب رخ می‌دهد.

- channel under subcritical flow condition. *Ocean Engineering*, 302, 117557, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117557>.
- Rajaratnam, N. & Ahmadi, R.M. (1979). Interaction between main channel and floodplain Flows. *J. Hydr.Div. ASCE*, 105(HY5), 573-588
- Randle, J.T. (2020). Use of multidimensional models to investigate boundary shear stress through meandering river channels. *Water*, 12(2), 3506, <https://doi.org/10.3390/w12123506>.
- Rao, L.P., Prasad, B.S.S., Sharma, A. & Khatua, K.K. (2022). Experimental and numerical analysis of velocity distribution in a compound meandering channel with double layered rigid vegetated flood plains. *Flow Measurement and Instrumentation*, 83, 102111, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102111>.
- Seo, I.W., Lee, K.W. & Baek, K.O. (2006). Flow Structure and Turbulence Characteristics in Meandering Channel. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 26(5B), 469-479.
- Shiono, K., Muto, Y., Knight, D.W. & Hyde, A.F.L. (1999). Energy losses due to secondary flow and turbulence in meandering channels with overbank flows. *Journal of Hydraulic Research*, 37(5), 641-664.
- Spooner, J. (2001). Flow structures in a compound meandering channel with flat and natural bedforms. Loughborough University, Thesis. <https://hdl.handle.net/2134/6825>.
- Sukhodolov, A.N. & Uijttewaalt, W.S.J. (2010). Assessment of a River Reach for Environmental Fluid Dynamics Studies. *J. Hydraulic Engineering*, 136(11), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000026](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000026).
- Sweet, R.J., Nicholas, A., Walling, D.E. and Fang, X. (2003). Morphological controls on medium-term sedimentation rates on British lowland river floodplains. *Journal of Hydrobiology*, 494, 177-183.
- Zeng, C., Bai, Y., Zhou, J., Qiu, F., Ding, S., Hu, Y. & Wang, L. (2022). Large Eddy Simulation of Compound Open Channel Flows with Floodplain Vegetation. *Water*, 14, 3951. <https://doi.org/10.3390/w14233951>.
- Zhang, H.T., Dai, W.H., da Silva, A.M.F. & Tang, H.W. (2022). Numerical study on resistance to flow in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148, 1-14.
- Mohanty, P.K., Saine, S.D. & Kishanjit, K.K. (2012). Flow Investigations in a Wide Meandering Compound Channel. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(6), 83-94.
- Mohato, R.K., Dey, S. & Ali, S.Z. (2021). Instability of a meandering channel with variable width and curvature: Role of sediment suspension. *Journal of Physics Fluids*, 33, 11401, <https://doi.org/10.1063/5.0074974>.
- Moncho-Esteve, I.J., García-Villalba, M., Muto, Y., Shiono, K. & Palau- Salvador, G. (2018). A numerical study of the complex flow structure in a compound meandering channel. *Advances in Water Resources*, 116, 95-116.
- Morvan, H.P. (2005). Channel Shape and Turbulence Issues in Flood Flow Hydraulics. *J. Hydraulic Engineering*, 131(10), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:10\(862\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:10(862)).
- Mostafa, M.M., Ahmed, H.S., Ahmed, A.A., Abdel-Raheem, G.A. & Ali, N.A. (2018). Experimental study of flow characteristics around floodplain single groyne. *Journal of Hydro-Environment Research*, 22, 1-13.
- Naghavi, M., Mohammadi M.A., Mahtabi, G. (2019). Flow Velocity in Meandering Compound Channel under the Influence of Sinusoidal Change. *MCEJ*, 19(5), 208-219. (In Persian)
- Naghavi, M., Mohammadi, M. & Mahtabi, G. (2022). An experimental evaluation of the blocks in floodplain on hydraulic characteristics of flow in a meandering compound channel. *Journal of Hydrology*, 612(A), 127976, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127976>.
- Naghavi, M., Mohammadi, M., Mahtabi, G. & Abraham, J. (2023). Experimental assessment of velocity and bed shear stress in the main channel of a meandering compound channel with one-sided blocks in floodplain. *J. Hydrology*, 617, 129073, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129073>.
- Pan, Y., Liu, X. & Yang, K. (2022). Effects of discharge on the velocity distribution and riverbed evolution in a meandering channel. *J. Hydrology*, 607(3), 127539, <https://doi.org/10.1016/j.jhdrol.2022.127539>.
- Pradhan, A., Khatua, K.K. & Sankalp, S. (2018). Variation of Velocity Distribution in Rough Meandering Channels. *Advances in Civil Engineering*, 2018, Article ID 1569271, <https://doi.org/10.1155/2018/1569271>.
- Pradhan, B., Pradhan, S. & Khatua, K.K. (2024). Experimental investigation of three-dimensional flow dynamics in a laboratory-scale meandering



© 2025 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/>)