



## Investigating Changes in Kinetic Energy of Turbulence and Depth Average Velocity in Meandering Compound Channel

Hosna Shafaei<sup>1</sup> | Kazem Esmaili<sup>2</sup> | AliAsghar Beheshti<sup>3</sup>

1. Department Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: [shafaeihosna@gmail.com](mailto:shafaeihosna@gmail.com)
2. Corresponding Author, Department Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: [esmaili@um.ac.ir](mailto:esmaili@um.ac.ir)
3. Department Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: [beheshti@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:beheshti@ferdowsi.um.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 24 August 2024

Received in revised form

1 November 2024

Accepted 3 January 2025

Published online 17 May 2025

#### Keywords:

Depth average velocity

Meandering compound channel

Turbulence kinetic energy

Turbulence intensity

### ABSTRACT

In recent decades, due to factors such as the effects of climate change, human activities, the occurrence of floods has increased all over the world. With the occurrence of floods, the water level in the rivers increases and the flow spreads from the main section of the river towards the floodplains. Considering the increase in population and the development of residential areas on the banks and riverbanks and the loss of life and money caused by floods, the study of turbulence and velocity changes in the meandering and meandering compound rivers for the more accurate implementation of flood management and river engineering projects is essential. In this research, the changes of hydraulic parameters including depth average velocity, turbulence intensity and energy of flow turbulence in two conditions of main channel flow (non-flood) and floodplain (flood flow) were investigated at depth and relative depth of 0.12 m and 0.46, respectively. The results showed that in the flow of the main channel, the maximum depth average velocity and turbulence intensity occur in the outer arc and in the middle sections in the center of the main channel. The maximum depth average velocity in the main channel flow has increased by 140% compared to the floodplain flow. In the conditions of the main channel flow, the magnitude of the turbulence energy was observed in the outer arc and in the floodplain flow in the inner arc. The maximum kinetic energy in the main channel has increased by 20% compared to its value in the floodplain.

**Cite this article:** Shafaei, H., Esmaili, K., & Beheshti, A. A. (2025). Investigating Changes in Kinetic Energy of Turbulence and Depth Average Velocity in Meandering Compound Channel. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 93-108. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.381039.1176>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.381039.1176>

Publisher: University of Tehran Press.



## بررسی تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی و سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب پیچان

حسنا شفائی<sup>۱</sup> | کاظم اسماعیلی<sup>۲</sup> | علی اصغر بهشتی<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: [shafaeihosna@gmail.com](mailto:shafaeihosna@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: [esmaili@um.ac.ir](mailto:esmaili@um.ac.ir)
۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: [beheshti@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:beheshti@ferdowsi.um.ac.ir)

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                                               | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۰۶/۰۳</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۰۸/۱۱</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۳/۱۰/۱۴</p> <p><b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۴/۰۲/۲۷</p> <p><b>کلیدواژه‌ها:</b><br/>انرژی جنبشی آشفتگی<br/>سرعت متوسط عمقی<br/>کانال مرکب پیچان<br/>شدت آشفتگی</p> | <p>در دهه‌های اخیر به دلیل عواملی از جمله اثرات تغییر اقلیم، فعالیت‌های انسانی، وقوع سیلاب در سراسر جهان افزایش یافته است. با وقوع سیل، سطح آب در رودخانه‌ها افزایش یافته و جریان از مقطع اصلی رودخانه به سمت سیلاب‌دشت‌ها گسترش می‌یابد. با توجه به افزایش جمعیت و توسعه مناطق مسکونی در سواحل و کناره‌های رودخانه و خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیلاب، مطالعه آشفتگی و تغییرات سرعت در رودخانه‌های پیچان و مرکب پیچان برای اجرای دقیق‌تر پروژه‌های مدیریت سیل و مهندسی رودخانه ضروری است. در این پژوهش تغییرات پارامترهای هیدرولیکی شامل سرعت متوسط عمقی، شدت آشفتگی و انرژی آشفتگی جریان در دو شرایط جریان کانال اصلی (غیرطغیانی) و سیلاب‌دستی (جریان طغیانی) در عمق و عمق نسبی به ترتیب ۰/۱۲ متر و ۰/۴۶ بررسی شد. نتایج نشان داد در جریان کانال اصلی سرعت متوسط عمقی در قوس خارجی و در مقاطع میانی حداکثر سرعت متوسط عمقی و شدت آشفتگی جریان در مرکز کانال اصلی بیشینه است. حداکثر سرعت میانگین عمقی در جریان کانال اصلی در مقایسه با جریان سیلاب‌دستی ۱۴۰ درصد افزایش یافته است. در شرایط جریان کانال اصلی، بزرگی انرژی آشفتگی در قوس خارجی و در جریان سیلاب‌دستی بزرگی انرژی جنبشی در قوس داخلی مشاهده شد. حداکثر انرژی جنبشی در کانال اصلی در مقایسه با مقدار آن در جریان سیلاب‌دستی ۲۰ درصد افزایش یافته است.</p> |

**استناد:** شفائی، حسنا؛ اسماعیلی، کاظم و بهشتی، علی اصغر (۱۴۰۴). بررسی تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی و سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب پیچان. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۱)، ۹۳-۱۰۸. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.381039.1176>



## ۱. مقدمه

رودخانه‌های پیچان به دلیل پیچیدگی جریان در آن‌ها و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مختلف با رودخانه‌های مستقیم متفاوت است. این رودخانه‌ها اغلب دارای بی‌نظمی‌های بستر طبیعی و ناهمواری هستند که می‌تواند بر جریان رودخانه تأثیر بگذارد (Mera et al., 2015). اکثر رودخانه‌ها در جهان دارای شکل پیچان هستند و مهاجرت پیچ و خم رودخانه به مرور زمان باعث انتقال و گسترش کانال اصلی به سمت سیلاب‌دشت و تغییر سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. توزیع سرعت در کانال‌های پیچان بین سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی متفاوت است (Sweet et al., 2003; Liu et al., 2019). علاوه بر این، وجود پوشش گیاهی سیلاب‌دشت می‌تواند با افزایش قابل توجه سرعت متوسط در کانال اصلی، به‌ویژه در اعماق نسبی کم‌تر، بر الگوهای جریان تأثیر بگذارد (McCaffrey et al., 1988). علاوه بر این، انتقال مومنتوم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها بر توزیع سرعت در سطح مقطع کانال تأثیر می‌گذارد و بر اهمیت مطالعه این پدیده جریان پیچیده در کانال‌های پیچان تأکید می‌کند (Julian et al., 2012; Morvan et al., 2005). به‌طور کلی، درک توزیع سرعت بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی برای تجزیه و تحلیل هیدرولیکی مؤثر و مدیریت رودخانه‌های پیچان (فرایندهای انتقال رسوب، آبستگي، مدیریت سیل و اجرای سازه‌های حفاظت سواحل) 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 مومنتوم 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). مطالعات نشان دادند که تغییرات عدد فرود بر الگوی تنش برشی تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که تغییرات در نسبت عرض به عمق بر الگوی جریان ثانویه و توزیع تنش برشی تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، برهم‌کنش‌های غیرخطی بین جریان اصلی و جریان ثانویه نقش مهمی در تعیین الگوی جریان در کانال‌های با سینوسیته بالا بازی می‌کنند که منجر به یک پروفیل سرعت عرضی یکنواخت‌تر می‌شود و روند تکامل پیچان را کاهش می‌دهد (Moncho-Estevé, 2018). علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های مختلف مانند ANSYS-FLUENT و CCHE2D با موفقیت ویژگی‌های جریان پیچیده، از جمله جریان‌های ثانویه، در کانال‌های پیچان با هندسه‌های مختلف را به تصویر کشیدند. 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 شدت آشفتگی در کانال‌های پیچان با انحرافات سرعت بیش‌تر در جریان اولیه و توسعه بیش‌تر جریان‌های ثانویه، به‌ویژه در خم دوم افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد جریان‌های ثانویه در خم دوم دارای مقادیر بیش‌تری از خم اول است. شدت جریان ثانویه در ساحل بیرونی به طور مشخص توسعه می‌یابد و در بخش مستقیم کم و در خم‌ها افزایش می‌یابد. همچنین شدت جریان ثانویه در خم‌ها دو تا سه برابر در مقطع مستقیم بوده و در خم دوم حداکثر مقدار خود را دارد. Kozioł (2013) به بررسی تغییرات شدت تلاطم مکانی در یک کانال مرکب و تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت (درختان) صلب و بر شدت تلاطم پرداختند. عمق نسبی 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 تلاطم نسبی بر روی سواحل شیب‌دار کانال اصلی وجود داشت. درختان روی سیلاب‌دشت منجر به تغییرات قابل‌توجهی در مقادیر شدت تلاطم نسبی در کل کانال مرکب نشدند، اما باعث تغییر در توزیع عمودی شدت تلاطم 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، تلاطم، انبساط و انقباض در کانال‌های مرکب پیچان با جریان روی ساحل و اتلاف انرژی ناشی از انقباض و انبساط در کمر بند پیچان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سینوسیته و عمق نسبی به طور مستقل سبب تغییر ضریب افت انرژی برشی آشفته می‌شود. همچنین نتایج نشان داد مقدار منفی در  $Dr=0/50$  وجود دارد، که نشان می‌دهد که جریان لایه بالایی سیلاب‌دشت سریع‌تر از لایه پایین‌تر جریان کانال اصلی است. نتایج Akbar et al. (2024) نشان داد که افزایش سینوسیته کانال پیچان، با ثابت ماندن پارامترهای دیگر مانند جریان، مواد بستر باعث افزایش آبستگي بستر می‌شود. حداکثر آبستگي بدون بعد ( $Ds/yn$ ) تقریباً در زاویه ۴۵ درجه بود. Pradhan et al. (2024) به بررسی خواص جریان آشفته‌گی سه‌بعدی در یک کانال پیچان تحت شرایط جریان زیر بحرانی، با تمرکز روی چند پارامتر حیاتی مانند رفتار سرعت سه‌بعدی، انرژی جنبشی آشفته، چولگی و کشیدگی پرداختند. آن‌ها دریافتند که سرعت طولی به سمت قوس خارجی به دلیل جریان ثانویه در قوس داخلی افزایش یافته است. نتایج آن‌ها نشان داد در یک کانال پیچان، سرعت با ناحیه محدب کانال دارای حداقل سرعت و قسمت بیرونی یا مقعر دارای حداکثر سرعت است. آبراهه و رودخانه‌های طبیعی در جهان دارای مسیر پیچان هستند و بنابراین رفتار جریان با توجه به درجه انحنای کانال، زبری بستر، عمق جریان و سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی دیگر پیچیده است. نتایج پژوهش‌ها نشان داد که تغییرات انرژی جنبشی آشفته‌گی به تغییرات تنش برشی نرمال وابسته است (Abad & Garcia, 2009). Naghavi et al. (2023) رفتار جریان در کانال اصلی از یک کانال مرکب پیچان با بلوک‌ها در یک طرف سیلاب‌دشت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دبی در مرکز و محور خم ماکزیمم 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 بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد پروفیل سرعت در کانال پیچان با پوشش گیاهی از یک الگوی s شکل پیروی می‌کند. حداکثر سرعت در خط مرکزی کانال اصلی رخ داده است و 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 آن‌ها نشان داد زمانی که تراکم بلوک‌ها در سیلاب‌دشت  $6/2$  درصد و کم‌تر است با افزایش عمق نسبی ضریب زبری مانینگ کاهش یافته است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که در همه تراکم‌ها ( $9/7$  تا  $23/7$  درصد) ضریب زبری مانینگ با افزایش عمق نسبی، افزایش یافته و حداکثر 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. Modalavalasa et al. (2023) رفتار هیدرودینامیکی کانال مرکب پیچان با سینوسیته کم را با طرح‌بندی‌های مختلف پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر در سیلاب‌دشت مورد مطالعه قرار دادند 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. بیش‌تر مطالعات انجام‌شده در کانال‌های مستقیم انجام شده و یا تعداد بسیار کمی به مقایسه بین شرایط جریان آبراهه اصلی و جریان سیلاب‌دشتی پرداختند و تنها جریان در شرایط سیلاب‌دشتی را بررسی کردند. شناخت و دانش بیش‌تر در مورد چگونگی تغییرات هیدرودینامیک جریان و تأثیرات آن‌ها بر انتقال رسوب، آبستگي و تکامل کانال به پیش‌بینی‌ها و ارزیابی دقیق‌تر پژوهش‌گران و کارشناسان در مدیریت پروژه‌های مهندسی رودخانه و سیلاب کمک خواهد کرد. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش اثر تغییرات اقلیم، افزایش

سطح آب دریاها، وقوع سیلاب و گسترش جریان از درون رودخانه به سمت سیلاب‌دشت‌ها افزایش یافته است. بنابراین، مطالعه تغییرات جریان در شرایط جریان سیلابی و مقایسه با شرایط جریان غیرسیلابی ضروری است. در این پژوهش، تغییرات شدت آشفتگی طولی جریان، انرژی جنبشی آشفتگی و تغییرات سرعت میانگین عمقی در عرض کانال برای دو شرایط جریان کانال اصلی با عمق ۰/۱۲ و جریان سیلاب‌دشتی با عمق ۰/۴۶ بررسی شده است.

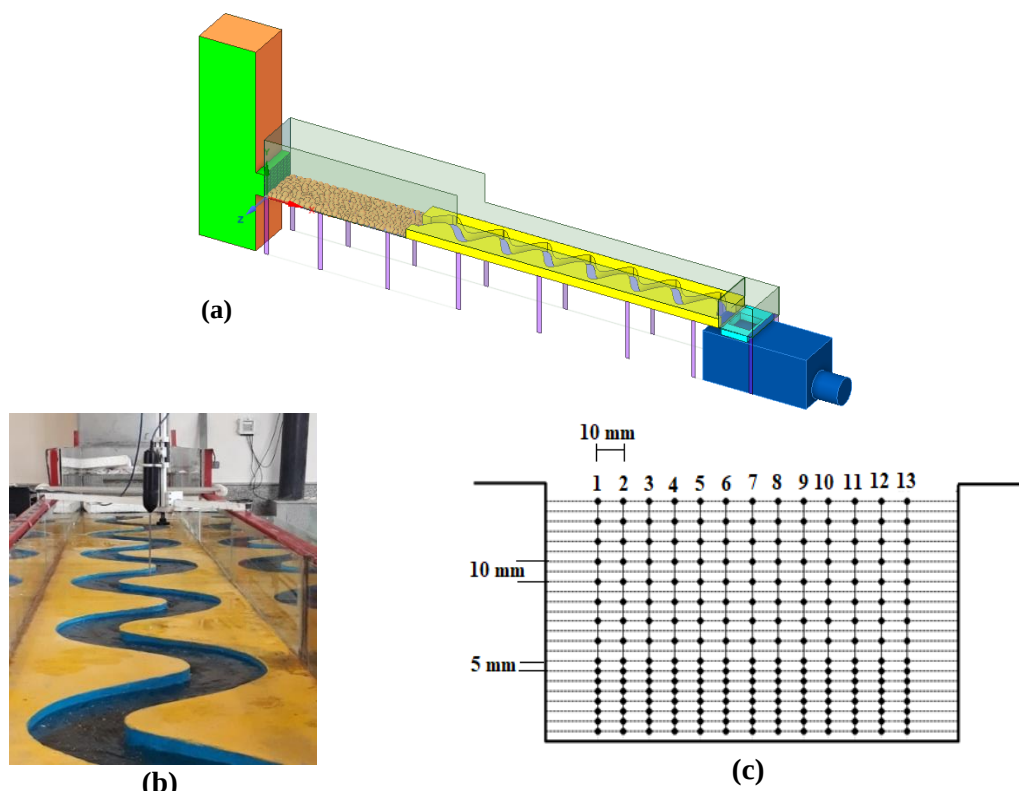
## ۲. مواد و روش‌ها

مطالعه 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. حداکثر عرض سیلاب‌دشت ۰/۴۸ متر و کم‌ترین مقدار عرض آن ۰/۱ متر بود. ارتفاع دیواره کانال اصلی ۰/۱۵ متر و عرض آن ۰/۲ 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 ترسیم‌شده در نرم‌افزار Spaceclaim را نشان می‌دهد. سرعت‌سنج صوتی سه‌بعدی (ADV) برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت در جهات  $x$  و  $y$  و  $z$  استفاده شده است (شکل ۱-b). به‌منظور تنظیم دبی جریان از دستگاه اینورتور استفاده شد، که برای هر دبی جریان (حجمی) موردنظر، فرکانس مربوط به آن ثبت و در بازه (۳۰-۶۵ لیتر بر ثانیه) کالیبره شد و در نهایت برای دستیابی به فرکانس و در نتیجه دبی موردنظر، منحنی دبی-اشل-فرکانس آن به‌دست 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 و عمق جریان ۰/۱۲ متر بود. 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 به‌ترتیب ۰/۲۱ و ۲۳۰۰۰ است. عمق نسبی برابر  $D_r = \frac{h_{fp}}{h_{fp} + h_{bf}} = 0.46$  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 (Spooner, 2001). همه آزمایش‌ها در شرایط جریان یکنواخت و کاملاً آشفته انجام شد. برای تنظیم عمق جریان در محدوده موردنظر 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 به‌عنوان مختصات جریانی  $x$  و عمود بر آن به‌عنوان مختصات جانبی  $y$  تعریف شد. تمام 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 مقاطع CS1-8 به‌ترتیب از "۱" تا "۱۳" شماره‌گذاری شدند (شکل ۱-c). هم‌چنین فواصل اندازه‌گیری یکسان برای هشت نقطه نزدیک به بستر ۰/۵ میلی‌متر بین دو نقطه عمودی و هشت نقطه بعدی به سمت سطح آب یک سانتی‌متر در کانال اصلی تعریف شد. فاصله اولین 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 سه‌بعدی 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 ۳۰۰۰ داده، سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه به‌دست آمد. در طول کانال مرکب پیچان، مؤلفه‌های سرعت جریان

در سه جهت در هشت مقطع از کانال اصلی و در هر مقطع ۲۰۸ نقطه برداشت شد که در مجموع و با هشت مقطع ۱۶۶۴ نقطه برداشت شد. شکل (۱-۳) شبکه اندازه‌گیری 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. شکل (۲) مقاطع اندازه‌گیری سرعت در جریان عبوری از کانال اصلی و جریان سیلاب‌دستی را نشان می‌دهد. در جریان کانال اصلی در هشت نقطه از کف در کانال اصلی فواصل پنج میلی‌متر و در نقاط نزدیک سطح آب یک سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شکل (۳) شبکه نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت برای جریان سیلاب‌دستی نشان می‌دهد. مؤلفه‌های سرعت برای جریان سیلاب‌دستی در دو قسمت سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی اندازه‌گیری شدند. در قسمت سیلاب‌دشت با بیش‌ترین عرض (۰/۴۸ متر) ۲۱ نقطه در جهت عرضی و برای هر نقطه، ۱۲ نقطه عمودی اندازه‌گیری شد. فاصله نقاط عرضی همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است بین پنج 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 پنج تا ۱۰ میلی‌متر متغیر است. 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 پنج تا ۱۰ میلی‌متر متغیر بودند. بنابراین به‌طور تقریبی در هر مقطع ۷۹۰ نقطه و در مجموع حدود ۴۷۸۰ نقطه اندازه‌گیری شد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار WinADV، کلیه داده‌های اندازه‌گیری شده که دارای همبستگی کوچک‌تر از ۷۰ درصد و نسبت سیگنال به نویز کوچک‌تر از ۱۵ db حذف گردید (Keshavarzi et al., 2016; Pasupuleti et al., 2022).



**Figure 1.** (a) A view of the laboratory channel with a compound meandering channel geometry (b) the flow in the main channel and the three-dimensional acoustic velocimeter (ADV) device and (c) the network of velocity measurement points in a section of the main channel

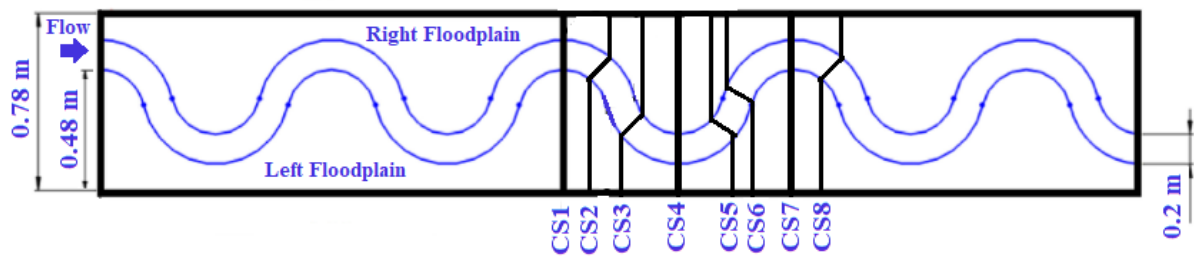


Figure 2. Compound meandering channel with velocity measurement sections in the main channel and floodplains

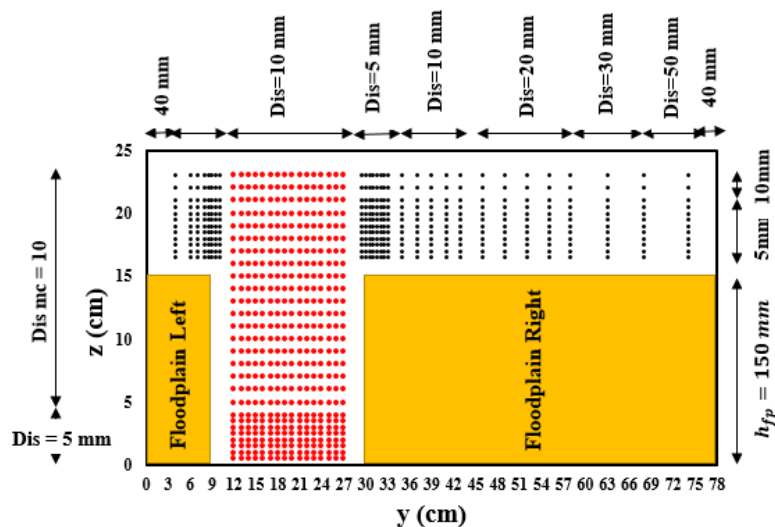


Figure 3. The network of velocity measurement points in the cross section of meandering compound channel

## ۲.۲. استخراج داده‌ها

مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای  $(u, v, w)$  در سیستم مختصات دکارتی  $(X, Y, Z)$  براساس تجزیه رینولدز به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v', w = \bar{w} + w' \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن،  $\bar{u}$ ،  $\bar{v}$  و  $\bar{w}$  میانگین زمانی مؤلفه‌های سرعت و  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  نوسانات سرعت می‌باشند.

شدت آشفتگی طولی جریان و  $u_{rms}$ ،  $v_{rms}$  و  $w_{rms}$  به ترتیب شدت آشفتگی عرضی و عمودی جریان می‌باشند. جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت از طریق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$u_{rms} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه (۲)}$$

یکی از پارامترهای مهم برای بیان نوسانات آشفتگی، شدت آشفتگی نسبی است که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\hat{w} = \frac{\sqrt{w'^2}}{\bar{w}} = \frac{w_{rms}}{\bar{w}} \quad \hat{v} = \frac{\sqrt{v'^2}}{\bar{v}} = \frac{v_{rms}}{\bar{v}} \quad \hat{u} = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

## ۳. نتایج و بحث

### ۳.۱. توزیع شدت آشفتگی طولی جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها

انرژی جنبشی آشفتگی، بزرگی نوسانات را نشان می‌دهد (Sahoo & Sharma, 2023). شدت آشفتگی طولی به صورت

( $u_{rms}/U_0$ ) نشان داده می‌شود که شدت آشفتگی در جهت جریان است. مطالعات انجام‌شده در مورد ساختارهای جریان آشفته در کانال‌های پیچان و نقش نوسانات سرعت سه‌بعدی، جریان‌های ثانویه و انرژی جنبشی جریان در فرایندهای انتقال رسوب تأکید کرده است (Vaghefi et al., 2016). شدت تلاطم در کانال اصلی به طور قابل توجهی بر رفتار جریان و انتقال انرژی در رودخانه‌ها، توسعه لایه مرزی و کیفیت جریان تأثیر می‌گذارد (Sanjou & Nezu, 2009; Seo et al., 2006). تغییرات شدت آشفتگی در کانال‌های مرکب منجر به تغییرات انرژی آشفتگی و اندازه گردابه‌ها می‌شود که بر دینامیک جریان و انتقال انرژی در سیستم‌های رودخانه تأثیر می‌گذارد (Kozioł, 2013). درک و تجزیه و تحلیل شدت تلاطم برای درک الگوهای جریان و تبادل انرژی در رودخانه‌ها ضروری است. شدت آشفتگی طولی در مقاطع مختلف از کانال اصلی در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر شدت آشفتگی در قوس خارجی رخ داده و به سمت قوس داخلی متمایل است. ساختار جریان در یک کانال مرکب پیچان و سینوسی شکل نشان می‌دهد که جریان به دلیل تبادل مومنتوم شدید بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، تحت تأثیر جریان عرضی و جریان ثانویه است. با بررسی شکل‌های (۴) و (۵) برای شدت‌های آشفتگی طولی در جریان کانال اصلی و جریان سیلاب‌دشتی مشاهده می‌شود که در جریان کانال اصلی، حداکثر شدت آشفتگی طولی در قوس خارجی رخ می‌دهد. با افزایش شدت آشفتگی طولی در قوس خارجی و به دنبال آن وجود گردابه‌های بیش‌تر در قوس خارجی و افزایش اندازه آن‌ها، منجر به فرسایش بیش‌تر دیواره و بستر کانال اصلی و ته‌نشینی رسوبات در قوس داخلی می‌شود. با افزایش عمق جریان و گسترش جریان از مقطع اصلی کانال به سمت سیلاب‌دشت‌ها، محل حداکثر شدت آشفتگی طولی از قوس خارجی به سمت قوس داخلی منتقل می‌شود. در جریان کانال اصلی با حرکت جریان از مقطع CS1 به سمت CS8 مشاهده می‌شود که در مقاطع میانی (CS2، CS3، CS7 و CS8) حداکثر شدت آشفتگی در مرکز کانال رخ داده است. در جریان سیلاب‌دشتی (عمق نسبی ۰/۴۶) با افزایش تعامل بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی ناشی از تبادل مومنتوم بین آن‌ها، شدت آشفتگی از مقطع کانال اصلی به سمت سیلاب‌دشت توسعه می‌یابد. در جریان سیلاب‌دشتی حداکثر مقادیر شدت آشفتگی از فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت با عرض بیش‌تر به سمت دیواره افزایش یافته است. در مقطع اصلی آن، شدت آشفتگی در قوس داخلی حداکثر است و به سمت مرکز مقطع متمایل است در نتیجه دیواره قوس داخلی مستعد فرسایش است. در مقاطع میانی با کاهش انحنای قوس و کاهش اثر نیروی گریز از مرکز، حداکثر شدت آشفتگی در مرکز مقطع اصلی رخ داده است.

### ۳.۲. انرژی جنبشی آشفتگی در جریان کانال اصلی و سیلاب‌دشت

انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گردابه‌هاست و از طریق تعامل تنش برشی آشفته و تنش برشی متوسط ایجاد می‌شود و به صورت رابطه  $k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$  بیان می‌شود. در یک کانال پیچان، انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) تحت تأثیر عواملی مانند انتقال رسوب، دبی و هندسه کانال تغییرات قابل توجهی را متحمل می‌شود که ماهیت پیچیده دینامیک جریان در کانال‌های پیچان را نشان می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که سطوح انرژی آشفتگی جریان در شرایط بستر متحرک به دلیل افزایش شدت تلاطم و ناهمسانگردی بالاتر است و باعث انتقال رسوب می‌شود (Sahoo & Sharma, 2023; Yilmazer & Guner, 2024). علاوه بر این، انرژی آشفتگی جریان با دبی افزایش می‌یابد، به‌ویژه در ناحیه جریان اصلی، که نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین نرخ جریان و سطوح انرژی آشفتگی جریان است (Pan et al., 2022). وجود رسوب، انرژی آشفتگی جریان را در نزدیکی بستر و سطح آب افزایش می‌دهد و بر تأثیر رسوب بر ویژگی‌های جریان تأکید بیش‌تری می‌کند (Zhang et al., 2023). در بسترهای متحرک انرژی جنبشی آشفتگی در نزدیکی بستر کاهش می‌یابد و به سمت لایه بیرونی در هر دو شرایط بستر متحرک و غیرمتحرک در یک کانال پیچان با انتقال رسوب افزایش می‌یابد (Sahoo & Sharma, 2023).



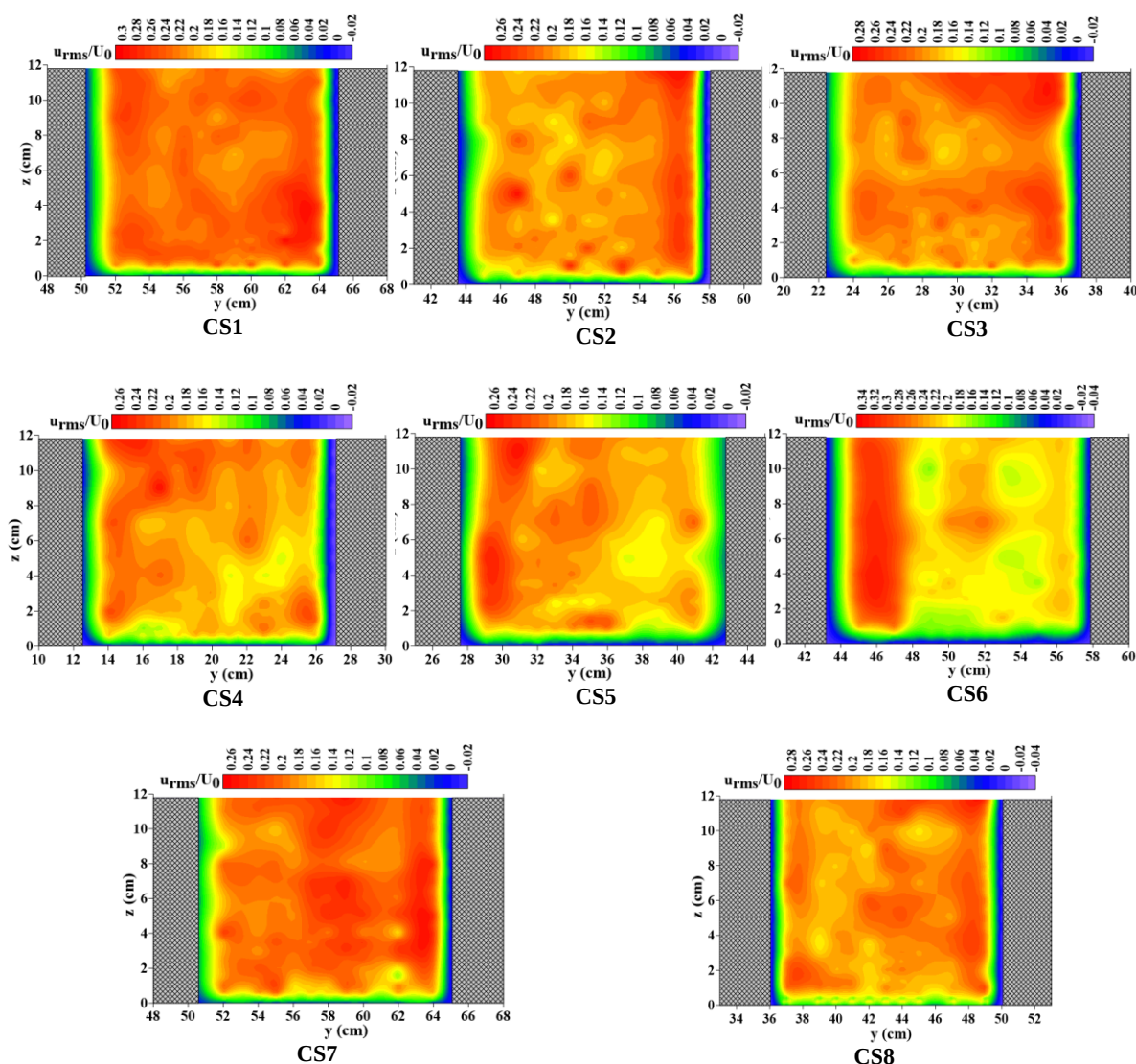


Figure 4. Longitudinal turbulence intensity contours at different sections of the main channel with a depth of 0.12 m

انرژی جنبشی آشفتگی نشانگر فرسایش و رسوبگذاری در نقاط مختلف از کانال و رودخانه است و سبب شکل‌گیری جریان‌های ثانویه می‌شود و از طریق تبادل مومنتوم و افزایش و توسعه گردابه‌ها ایجاد می‌شود. رخداد و شدت انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل تولید جریان ثانویه و اثر انحنای خم است. تغییرات انرژی آشفتگی در شکل‌های (۶) و (۷) برای مقاطع مختلف از جریان کانال اصلی و جریان سیلاب‌دستی در صفحه  $y-z$  نشان داده شده 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 بررسی تغییرات انرژی آشفتگی در مقاطع مختلف کانال اصلی مشاهده می‌شود که حداکثر انرژی آشفتگی در سمت قوس خارجی قرار دارد و به سمت مرکز کانال و قوس داخلی متمایل است. در مورد دو مقطع CS1 و CS4 حداکثر انرژی آشفتگی در قوس خارجی قرار دارد و در همه مقاطع از بستر و دیوار قوس خارجی به سمت مرکز کانال گسترش می‌یابد و در مقاطع میانی (CS2، CS3، CS5، CS7 و CS8) می‌توان مشاهده کرد که بیشینه انرژی آشفتگی در مرکز مقطع رخ می‌دهد. این نتایج به دست آمده دلالت بر آن دارد که در شرایط جریان کانال اصلی فرسایش در قوس خارجی و رسوبگذاری در قوس داخلی بیش‌تر خواهد بود. در شرایط جریان

سیلاب‌دستی مشاهده می‌شود که بیش‌ترین انرژی آشفتگی در قوس داخلی رخ می‌دهد و به سمت مرکز کانال و سپس قوس خارجی متمایل است. نتایج به‌دست آمده از تغییرات انرژی آشفتگی با نتایج حاصل از مطالعه Naghavi *et al.* (2023) مطابقت دارد. آن‌ها در مطالعه خود با بررسی سینوسیته‌های مختلف نشان دادند که در کانال اصلی یک کانال مرکب پیچان با افزایش سینوسیته حداکثر انرژی آشفتگی به سمت مرکز کانال و سپس قوس داخلی گسترش می‌یابد. در هر دو شرایط جریان انرژی آشفتگی در نزدیکی سطح آب کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که حداکثر مقدار انرژی آشفتگی در جریان کانال اصلی در مقایسه با جریان سیلاب‌دستی به میزان ۲۰ درصد افزایش یافته است.

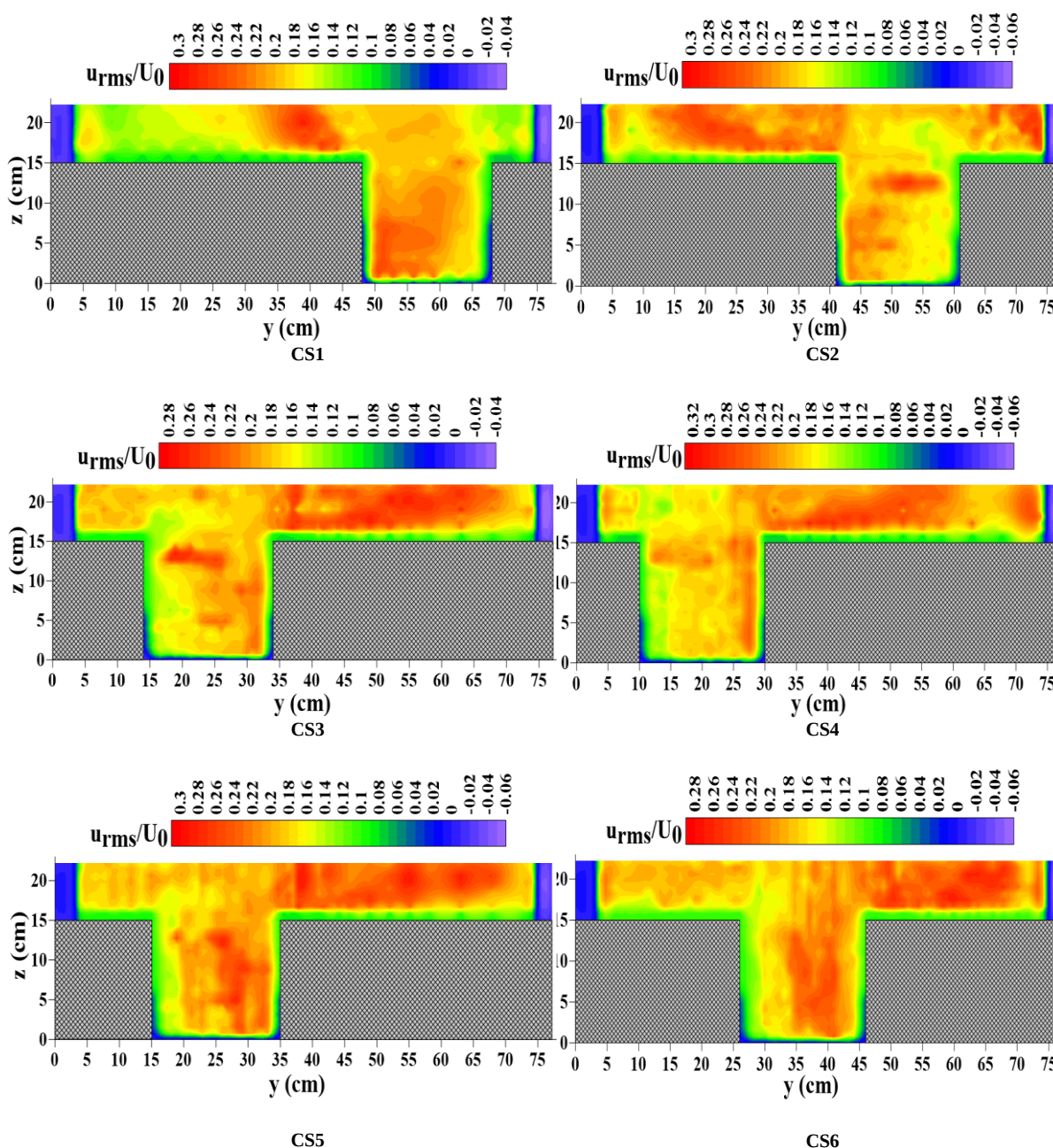


Figure 5. Longitudinal turbulence intensity contours in overbank flow at different sections with a relative depth of 0.46

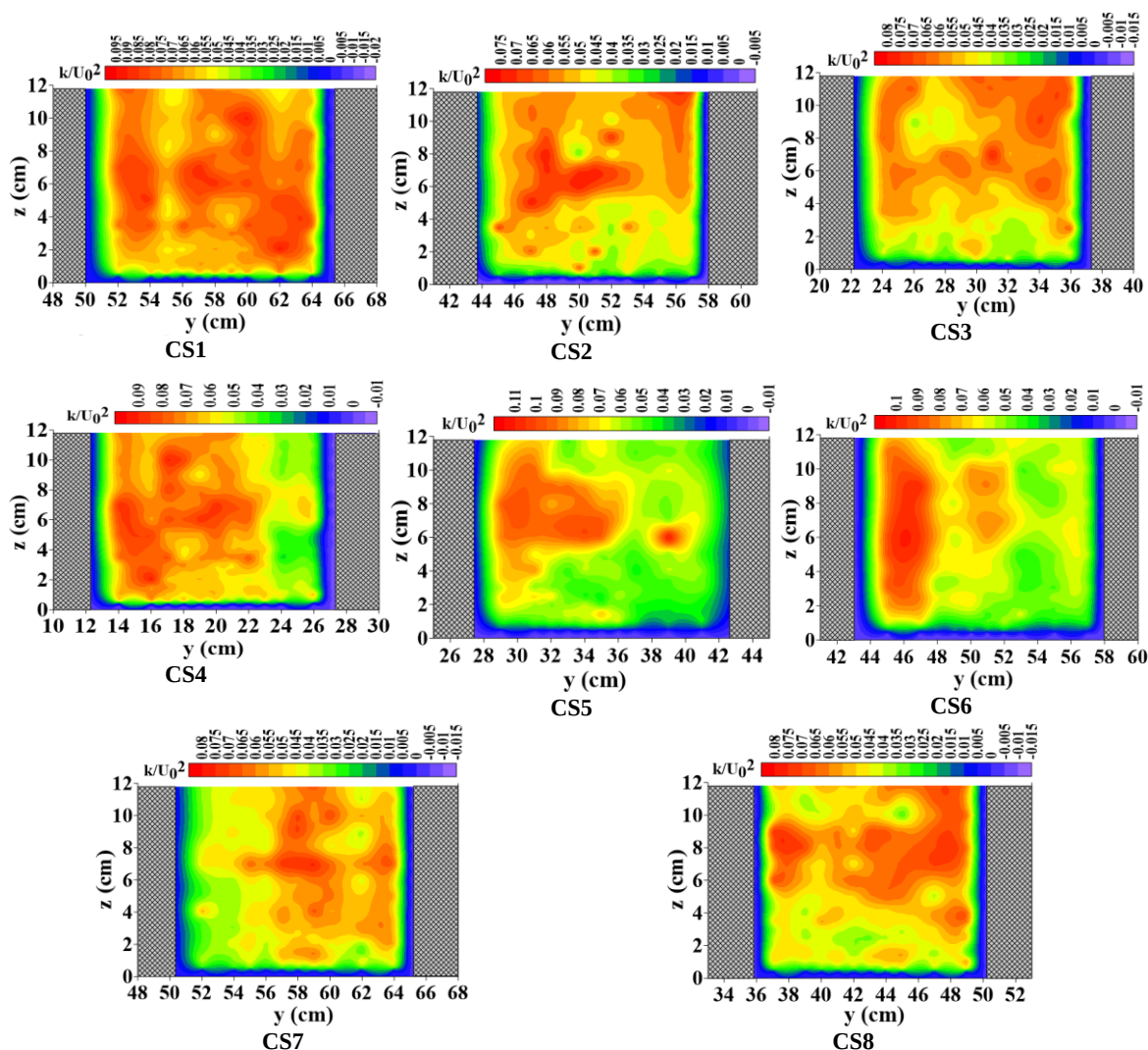


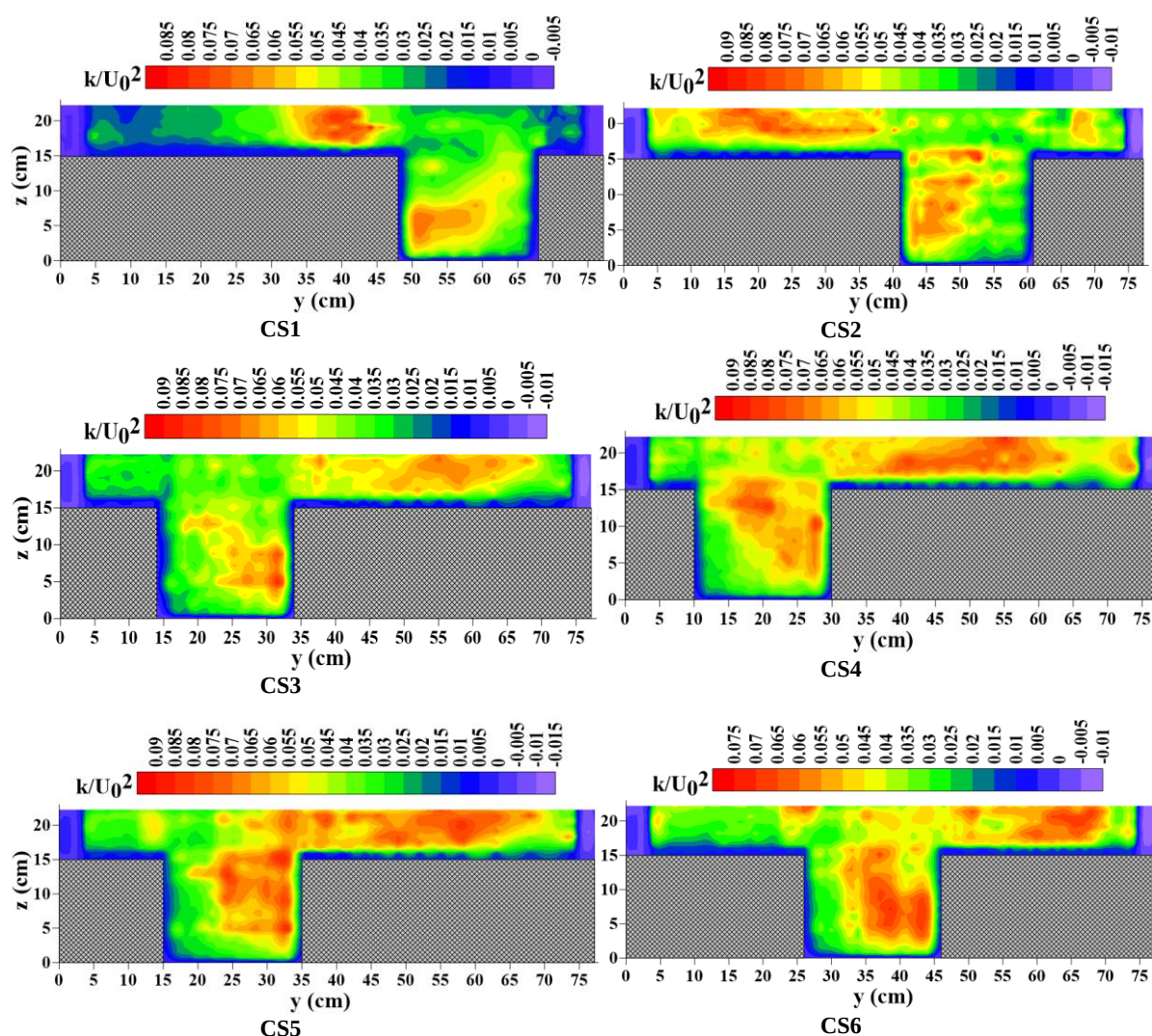
Figure 6. Turbulence kinetic energy contours in the main channel of compound meandering channel with depth of -0.12 m

### ۳.۳. تغییرات میانگین عمقی در کانال اصلی و سیلابدشت

توزیع سرعت در کانال‌های پیچان بین سیلابدشت‌ها و کانال اصلی متفاوت است. در کانال‌ها یا رودخانه‌های پیچان در دیواره قوس خارجی آن فرسایش ایجاد می‌شود و در دیواره داخلی آن رسوبگذاری رخ می‌دهد. در قوس خارجی، مؤلفه سرعت طولی تحت تأثیر نیروهای گریز از مرکز است که باعث شتاب جریان در امتداد ساحل خارجی می‌شود. انحنای خم به دلیل طول مسیر کوتاه‌تر در مقایسه با ساحل داخلی، سرعت بیشتری را در نزدیکی ساحل خارجی ایجاد می‌کند. این منجر به یک پروفیل سرعت طولی با بزرگی بالاتر در نزدیکی ساحل خارجی و بزرگی کمتر به سمت ساحل داخلی می‌شود (Pradhan et al., 2024). انتقال مومنوم بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها بر توزیع سرعت در سطح مقطع کانال تأثیر می‌گذارد و بر اهمیت مطالعه این پدیده جریان پیچیده در کانال‌های پیچان و مرکب پیچان تأکید می‌کند (Julian et al., 2012; Morvan, 2005). در شکل‌های (۸) و (۹) تغییرات سرعت میانگین عمق برای جریان در کانال اصلی و جریان سیلابدشتی به ترتیب نشان داده شده است. راستای جریان از چپ به راست است (برای مثال در مقطع CS1، قوس



داخلی در سمت چپ و قوس خارجی در سمت راست). سرعت میانگین عمق در کانال‌های مستقیم ساده در مرکز مقطع حداکثر مقدار را دارد، اما در کانال‌های پیچان به دلیل تأثیر بیش‌تر فاکتورهای هندسی و به دنبال آن هیدرولیکی، توزیع سرعت در قوس‌های داخلی، خارجی و مقاطع میانی متفاوت است. براساس تغییرات پروفیل‌های سرعت میانگین عمق شکل (۸) مشاهده می‌شود که در جریان کانال اصلی در مقاطع CS1، CS2، CS6 و CS7 بیش‌ترین توزیع سرعت میانگین عمق در قوس خارجی است و در مقاطع CS3 و CS8 بیش‌ترین مقدار سرعت میانگین عمق همانند مقاطع در کانال مستقیم در مرکز کانال رخ می‌دهد. در جریان کانال اصلی به دلیل عمق جریان کم‌تر در مقایسه با جریان روی سیلاب‌دشت‌ها و حرکت سریع‌تر جریان، انتقال مومنتوم و اثر آن بر جریان قابل توجه است و با افزایش عمق جریان این اثر کاهش می‌یابد. برهم‌کنش بین نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار در خم‌ها منجر به تولید جریان‌های ثانویه می‌شود که بر توزیع سرعت تأثیر 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.



**Figure 7.** Turbulence kinetic energy contours at different sections of the meandering compound channel for overbank flow with a relative depth of 0.46

اثر نیروی گریز از مرکز در قوس خارجی و وجود جریان‌های ثانویه باعث فرسایش در قوس خارجی می‌شود و در قوس داخلی با عمق کم اصطکاک افزایش و بنابراین سرعت کاهش می‌یابد. در جریان سیلاب‌دستی (شکل ۹) افزایش سرعت میانگین عمق از مقطع کانال اصلی به سمت سیلاب‌دشت در قوس داخلی مشاهده می‌شود. افزایش سرعت روی سیلاب‌دشت، تا نزدیکی دیواره آن ادامه دارد و پس از آن کاهش و دوباره افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، بیشینه سرعت میانگین عمق در منطقه مرکزی کانال اصلی و فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت رخ می‌دهد. نتایج پژوهش‌گران نشان داده است که این کاهش سرعت متوسط جریان در مواردی که عمق جریان سیلاب‌دستی کم‌تر باشد، شدیدتر است. نتایج به‌دست‌آمده برای بررسی توزیع سرعت میانگین عمق با نتایج مطالعات دیگر (Rathor *et al.*, 2022; Pradhan, 2015) مطابقت دارد. با مقایسه سرعت‌های میانگین عمق می‌توان دریافت که حداکثر سرعت متوسط در جریان کانال اصلی با مقدار حدود ۰/۶ متر بر ثانیه، ۱۴۰ درصد در مقایسه با جریان سیلاب‌دستی با مقدار ۰/۲۵ متر بر ثانیه افزایش یافته است.

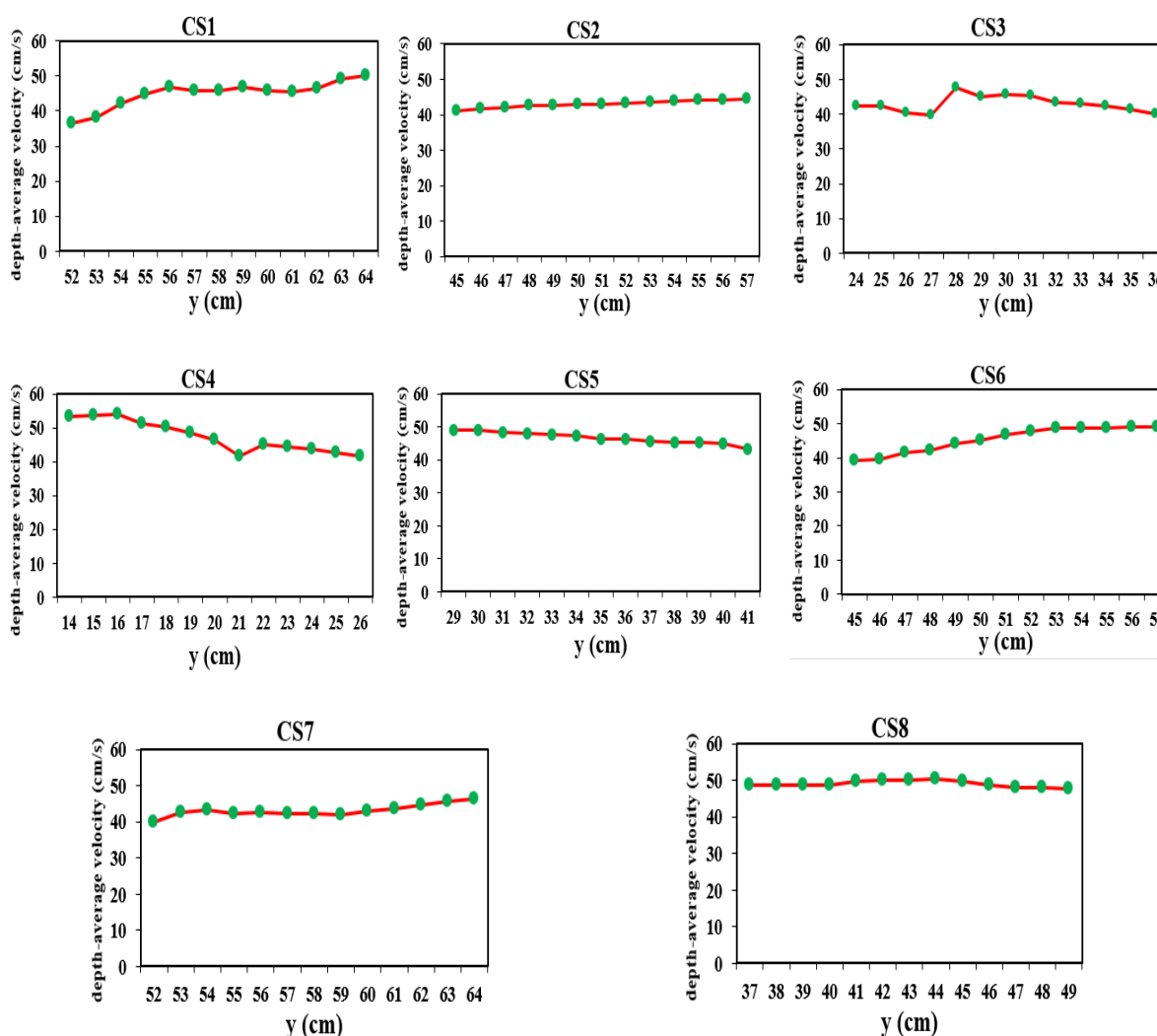
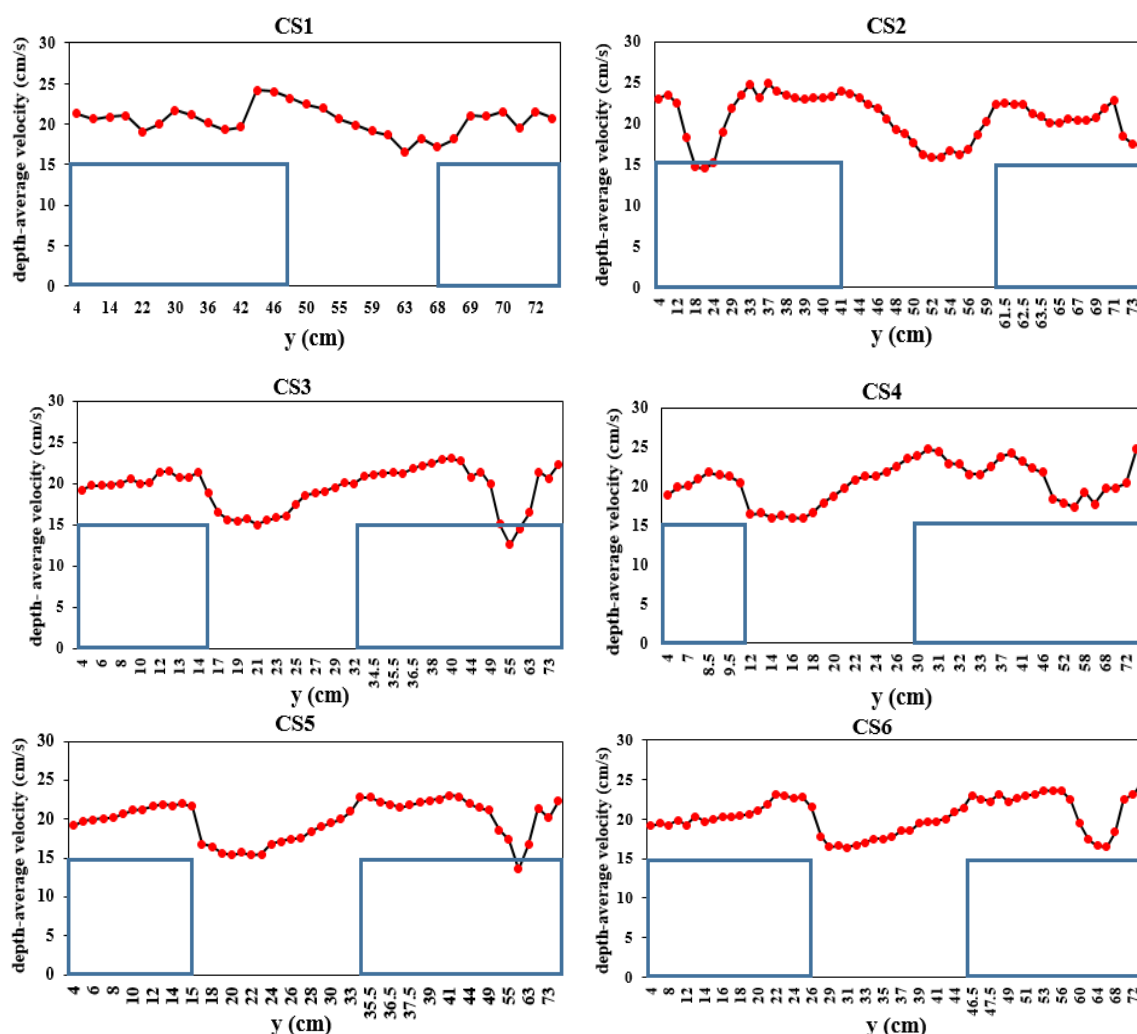


Figure 8. Depth average velocity distribution profiles at different sections and transverse direction for inbank flow ( $D = 0.12 \text{ m}$ )



**Figure 9.** Depth average velocity distribution profiles at different sections and transverse direction for overbank flow ( $D_r = 0.46$ )

## ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش تغییرات شدت آشفتگی جریان، تغییرات انرژی آشفتگی جریان و تغییرات سرعت متوسط عمق در دو شرایط جریان کانال اصلی و جریان سیلابدشتی با عمق و عمق نسبی به ترتیب (۰/۱۲ متر) و (۰/۴۶) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر به شرح زیر است.

- تغییرات شدت آشفتگی طولی در عمق ۰/۱۲ متر و عمق نسبی ۰/۴۶ نشان داد که در شرایط جریان کانال اصلی شدت آشفتگی در قوس خارجی بیش تر بوده و در مقاطع میانی به سمت مرکز کانال اصلی متمایل است. همچنین با بررسی تغییرات شدت آشفتگی طولی در جریان سیلابدشتی مشاهده شد که در قوس داخلی و سیلابدشت متصل به دیواره قوس داخلی مقدار شدت آشفتگی بیشینه است و در داخل کانال اصلی آن شدت آشفتگی به سمت مرکز کانال اصلی متمایل است. همچنین در مقاطع میانی (CS3، CS5 و CS6) در مقایسه با مقاطع رؤس قوس ها (CS1 و CS4) شدت آشفتگی در سیلابدشت های راست و چپ بیش تر است.

- انرژی جنبشی آشفتگی در جریان کانال اصلی در قوس خارجی مقدار بیشینه را دارد و در مقاطع میانی بیشترین مقدار انرژی آشفتگی در مرکز کانال اصلی مشاهده می‌شود. در حالت جریان سیلاب‌دستی بیشترین انرژی جنبشی آشفتگی در قوس داخلی و سیلاب‌دست متصل به دیواره داخلی کانال اصلی حداکثر مقدار آن مشاهده می‌شود و از دیواره داخلی کانال اصلی به سمت مرکز کانال اصلی متمایل است. حداکثر انرژی آشفتگی در مقاطع میانی در مرکز کانال اصلی و سیلاب‌دست‌ها مشاهده می‌شود.

- سرعت متوسط عمقی در جریان کانال اصلی با عمق ۰/۱۲ متر در قوس خارجی بیشینه است که در مقاطع CS1، CS2، CS4 و CS7 قابل مشاهده است. همچنین در مقاطع میانی شامل CS3، CS8 و CS6 بیشترین تغییرات سرعت متوسط عمقی در مرکز کانال اصلی مشاهده می‌شود. در حالت شرایط جریان سیلاب‌دستی سرعت متوسط عمقی در سیلاب‌دست متصل به قوس داخلی افزایش یافته است و تا نزدیکی مرکز کانال اصلی بیشینه است. پس از آن یک کاهش تدریجی در مقدار سرعت متوسط عمقی مشاهده می‌شود. در مقاطع میانی سرعت متوسط عمقی در سیلاب‌دست‌ها تفاوت کمتری را نسبت به تغییرات سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی دارد.

## ۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۶. منابع

- Abad, J., & Garcia, M.H. (2009). Experiment in a high- amplitude Kinoshita meandering channel. Implication of bend orientation on mean turbulent flow structure. *Journal of Water Resource Research*, 45(2).
- Akbar, Z., Ahmed Pasha, G., Tanaka, N., Ghani U., & Hamidifar, H. (2024). Reducing bed scour in meandering channel bends using spur dikes. *International Journal of Sediment Research*, 39, 243-256. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.01.001>
- 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. *J. Earth Surface Processes and Landforms*, 37(4), 449-458. <https://doi.org/10.1002/esp.2272>
- Keshavarzi, A., Hamidifar, H., & Ball, J. (2016). Bed morphology in vegetated estuarine river with mild-curved meander bend. *Hydrological Sciences Journal*, 61 (11), 2033-2049.
- Kozioł, A. P. (2013). Three-Dimensional Turbulence Intensity in a Compound Channel. *J. Hydraulic Engineering*, 139(8), 852-864. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000739 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000739
- Liu, X., Shi, Ch., Zhou, Y., Gu, Zh., & 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. *Journal of Water*, 11(2), 357. <https://doi.org/10.3390/w11020357>
- Mera, I., Franca, M. J., Anta, J., & Peña, 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*, 87-4251. <https://doi.org/10.3133/wri874251>.
- Mohanty, L. (2013). Velocity distribution in trapezoidal meandering channel. A thesis submitted to National Institute of Technology, Rourkela In partial fulfillment for the award of the degree of Master of Technology in Civil Engineering With specialization in Water Resources Engineering.
- Modalavalasa, S., Chembolu, V., Dutta, S., & Kulkarni, V. (2023). Laboratory investigation on flow structure and turbulent characteristics in low sinuous compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydrology*, 618, 129178-129178.



- 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. *Journal of Advances in Water Resources*, 116, 95-116. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.03.013>
- Morvan, H.P. (2005). Channel Shape and Turbulence Issues in Flood Flow Hydraulics. *Journal of 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. doi:10.1016/j.jher.2018.08.003
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, Gh. (2022). An experimental evaluation of the blocks in floodplain on hydraulic characteristics of flow in a meandering compound channel. *Journal of Hydrology*, 612, Part A, 127976. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127976>
- Naghavi, M., Mohammadi, M., Mahtabi, Gh., & 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. *Journal of 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. *Journal of Hydrology*, 607(3):127539. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127539>
- Pasupuleti, L.N., Timbadiya, P.V., & Patel, P.L. (2022). Flow fields around tandem and staggered piers on a mobile bed. *International Journal of Sediment Research*, 37 (6), 737-753.
- Pradhan, A., Kumar Khatua, K., & Sankalp, S. (2018). Variation of velocity distribution in rough meandering channels. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), 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 channel under subcritical flow condition. *J. Ocean Engineering*, 302, 117557. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117557>
- Rathor, S.K., Mohanta, A. & Patra, K.C. (2022). Validation of Computational Fluid Dynamics Approach of Lateral Velocity Profile Due to Curvature Effect on Floodplain Levee of Two-stage Meandering Channel. *Journal Water Resources Management*, 36, 5495-5520. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03308-9>
- 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 floodplains. *J. Flow Measurement and Instrumentation*, 83 (102111). <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102111>
- Sanjou, M., & Nezu, I. (2009). Turbulence structure and coherent motion in meandering compound open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 47(5), 598-610. doi:10.3826/jhr.2009.3485
- Seo, Il. W., Lee, K.W., & Baek, K.H. (2006). Flow Structure and Turbulence Characteristics in Meandering Channel. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 26(5B), 469-479, 1015-6348(pISSN)
- Sahoo, S., & Sharma, A. (2023). Turbulent flow mechanisms in meandering channel with sediment transport. *Journal of Water Practice & Technology*, 18(3), 484. Doi: 10.2166/wpt.2023.035
- Spooner, J. (2001). Flow structures in compound meandering channel with flat and natural bedforms. Thesis, University of Loughborough. <https://hdl.handle.net/2134/6825>
- 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. doi:10.1080/0022168990949852110.1080/00221689909498521
- Sukhodolov, A.N., & Uijtewaal, W.S.J. (2010). Assessment of a River Reach for Environmental Fluid Dynamics Studies. *Journal of 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. , & Fang, X. (2003). Morphological controls on medium-term sedimentation rates on British lowland river floodplains. *Journal of Hydrobiology*, 494, 177-183. <https://doi.org/10.1023/A:1025462214977>
- Vaghefi, M., Safarpour, Y., & Hashemi, S.S. (2016). Effect of Sediment Density on the Bed Topography in a Channel Bend Using Numerical Modeling. *Journal of Engineering Research (TJER)*, 13(1). 22-32.
- Yilmazar, C., & Guner, H.A.A. (2024). Physical and numerical modeling of flow in a meandering channel. *Journal of Water*, 16, 1547. <https://doi.org/10.3390/w16111547>
- 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. (2023). Numerical study on resistance to flow in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148, 1-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001946](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001946)