



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۱ | فروردین ۱۴۰۱ (ص ۲۰۳-۱۸۹)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.332406.669104>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Experimental Study of Flow Hydrodynamics in Meandering Compound Channels with Parallel Floodplain Wall

SOBHAN MORADI¹, KAZEM ESMAILI^{1*}, SAEED REZA KHODASHENAS¹

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

(Received: Oct. 15, 2021- Revised: Feb. 4, 2022- Accepted: Feb. 8, 2022)

ABSTRACT

Predicting the flow behavior in the arch of meandering compound channels has a great importance in coastal protection programs (sediment transport and deposit pattern), pollution propagation and flood control. Therefore; the hydrodynamics of the flow in the composite-meander channel with a constant sinuosity factor 1.3, and at two relative depths 0.3 and 0.55 were investigated using a laboratory model. Due to the three-dimensional structure of the flow in the channel bend, the data were analyzed in seven cross sections with angles of zero, 30 and 60 degrees to the vertices of the bending apex using an ADV velocity-meter in lattice plates with dimensions 3*3 cm² and perpendicular to the flow. The results showed that the gradient of three components of velocity at relative depths 0.3 are greater than 0.55 which shows more vortex power and intensity of turbulence in less amount of relative depth. average velocity ratio on the outer beach of the floodplain to the average velocity of the whole section, similar to the inner beach, has been a function of the relative depth of the flow, and is less and more than one, respectively. For this reason, the flow in the outer floodplain, unlike the inner floodplain, has a reducing effect on the flow velocity in the main channel. Also, as the relative depth increases from 0.3 to 0.55, the ratio of the average flow velocity in the main channel to the total average velocity decreases and approaches one. Reynolds stress ($\overline{u'w'}$) had maximum and positive values near the main channel bed, and by moving away from the bed, it has reached a negative value and it shows its minimum amount near the flow surface. The value of this local parameter also increases at the edge of floodplains.

Keywords: River bend, Momentum Transmission, Turbulent Flow, Compound Meander Channel.

*Corresponding Author's Email: esmaili@um.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی هیدرودینامیک جریان در آبراهه‌های مرکب پیچان با دیواره سیلاب‌دشت هم‌راستا

سبحان مرادی^۱، کاظم اسماعیلی^{۱*}، سعیدرضا خدانشناس^۱

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

چکیده

پیش‌بینی رفتار جریان در قوس رودخانه‌های مرکب پیچانی در برنامه‌های حفاظت سواحل (الگوی انتقال و ته‌نشست رسوبات)، انتشار آلودگی و کنترل سیلاب کاربردی و دارای اهمیت زیادی می‌باشد. از این‌رو؛ هیدرودینامیک جریان در آبراهه مرکب - پیچان با ضریب خمیدگی ثابت $1/3$ ، و هم‌راستایی دیواره سیلاب‌دشت با کانال اصلی در دو عمق نسبی $0/3$ و $0/55$ با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی شد. به دلیل ساختار سه‌بعدی جریان در قوس آبراهه، تجزیه و تحلیل داده‌ها در هفت مقطع عرضی با زوایای صفر، 30 و 60 درجه نسبت به رئوس قوس با استفاده از سرعت‌سنج ADV در صفحه‌های مشبک با ابعاد $3 \times 3 \text{ cm}^2$ و عمود بر جریان انجام گرفت. نتایج نشان داد؛ گرادیان هر سه مؤلفه سرعت در عمق نسبی $0/3$ بیش‌تر از $0/55$ است که نشان از قدرت بیشتر گرداب‌ها و شدت آشفتگی در عمق نسبی کمتر دارد. نسبت سرعت متوسط در ساحل خارجی سیلاب‌دشت به سرعت متوسط کل مقطع، مشابه ساحل داخلی، تابع عمق نسبی جریان بوده و به ترتیب کمتر و بیشتر از یک است. به همین علت، جریان در سیلاب‌دشت خارجی بر خلاف سیلاب‌دشت داخلی اثر کاهنده بر سرعت جریان در آبراهه اصلی دارد. همچنین نسبت سرعت متوسط جریان در آبراهه اصلی به سرعت متوسط کل به‌ازای افزایش عمق نسبی تقریبی از $0/3$ به $0/55$ کاهش یافته و به یک نزدیک می‌گردد. تنش رینولدز $u'w'$ در نزدیک بستر آبراهه اصلی، دارای مقادیر بیشینه و مثبت بوده و با فاصله گرفتن از بستر، با روندی کاهشی، به مقدار منفی رسیده و کمینه خود را در نزدیکی سطح جریان نشان می‌دهد. همچنین در لبه دشت‌های سیلابی نیز مقدار این پارامتر موضعی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: قوس رودخانه، انتقال مومنوم، جریان آشفته، پیچان‌رود مرکب.

مقدمه

معمولاً هیچ رودخانه‌ای در یک مسیر طولانی، دارای راستای مستقیم و مقطع عرضی ساده نیست. بیشتر مسیل‌های طبیعی دارای مقاطعی با خصوصیات مقطع مرکب هستند و معمولاً از یک مقطع اصلی برای انتقال جریان پایه و یک یا دو سیلاب‌دشت تشکیل شده‌اند که در مواقع سیلابی بخشی از جریان را انتقال می‌دهند. یکی از شرایط هیدرولیکی خاص و متمایزکننده مفهوم مقاطع مرکب نسبت به مقاطع منظم و ساده، اختلاف قابل توجه عمق جریان و زبری مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها است که با بروز اختلاف سرعت زیاد و تبادل انرژی در محل اتصال این دو ناحیه، سبب افزایش اتلاف انرژی و کاهش دبی عبوری خواهد شد (Yang et al., 2007). از سوی دیگر؛ باید در نظر داشت که جریان در پیچ‌وخم رودخانه‌های مرکب به علت تبادل قوی مومنوم و همچنین تأثیر نیروی گریزازمرکز، متفاوت از رودخانه‌های ساده - مستقیم می‌باشد. به‌طوری که در رودخانه‌های پیچانی ساده، نیروی گریزازمرکز عامل اصلی ایجاد جریان‌های ثانویه و در

رودخانه‌های پیچانی با مقطع مرکب علاوه بر نیروی گریزازمرکز، تنش برشی عرضی و تبادل قوی مومنوم بین جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز مهم بوده و باعث تشدید قدرت جریان - های ثانویه می‌شود (Da Silva, 2006). با وجود مطالعات زیاد محققین در زمینه قوس رودخانه‌ها، تاکنون بررسی جامع و دقیقی برای تحلیل ساختار جریان در قوس رودخانه‌ها با مقطع مرکب و دیواره هم‌راستا به‌صورت آزمایشگاهی انجام نشده است و در تعداد محدود، از نرم‌افزارهای دوعبده و یا روش‌های کدنویسی استفاده شد، که این مسئله علاوه بر ساختار پیچیده و سه‌بعدی جریان در قوس رودخانه‌ها به کمبود شدید داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی در این زمینه نیز مرتبط است.

از این‌رو؛ Sellin (1964) نخستین کسی بود که با بررسی آزمایشگاهی روی مقاطع مرکب منشوری نشان داد که لایه برشی و الگوهای قوی آشفتگی ناشی از انتقال مومنوم صورت‌گرفته از آبراهه اصلی به سیلاب‌دشت‌ها، منجر به تشکیل جریان‌های گردابی و کاهش دبی کل انتقالی مقطع می‌گردد.

متوسط، تنش برشی و انرژی جنبشی جریان در مرز مشترک آبراهه اصلی و دشت سیلابی می‌شود. (Yonesi et al., 2013) بیان کردند که در آبراهه‌های مرکب، مشابه آبراهه‌های مستقیم ساده، جریان‌های چرخشی توسط آشفتگی‌های غیرایزوتروپیک ایجاد می‌شود و خصوصیاتشان را تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله هندسه مقطع عرضی آبراهه، نسبت شکل، عمق نسبی و مقدار آشفتگی دانستند. (Liu et al., 2014) برای محاسبه تأثیر جریان‌های ثانویه بر روی دبی تخلیه آبراهه، روی راس قوس‌های آبراهه مرکب پیچانی مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که در قوس‌ها سرعت‌های عرضی ایجاد شده می‌توانند دارای مقادیر مثبت یا منفی باشند. در آبراهه اصلی پیچان به واسطه نیروی گریزازمرکز شکل گرفته، جریان‌های ثانویه افزایش می‌یابد، اما در سیلاب‌دشت‌ها ضعیف است. به طوری که پارامتر جریان ثانویه در آبراهه اصلی تقریباً سه برابر مقدار پارامتر متناظر در محدوده سیلاب‌دشت است. (Dupuis et al., 2017) با زیر کردن بستر سیلاب‌دشت‌ها به کمک دو پوشش چمن و میله‌های استوانه‌ای (درختچه‌های آبرفتی) اثرگذاری جریان کم‌عمق سبب عدم همخوانی مقادیر عرضی سرعت و آشفتگی جریان در اعماق نسبی مختلف شد و در فصل مشترک آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها مبادله مومنتم توسط تنش‌های رینولدز مهار می‌شود. در نهایت نتیجه گرفتند که در آبراهه اصلی، هر دو تنش رینولدز و جریان‌های ثانویه به شتاب انتقال مومنتم کمک می‌کنند. (Shahsavari et al., 2020) با بررسی هیدرولیک جریان در آبراهه مرکب پیچان مستقیم، بیان کردند که مقادیر هر سه مؤلفه سرعت متوسط جریان با کاهش عمق نسبی افزایش می‌یابد. ایشان دلیل این رخداد را قدرت بیشتر گرداب‌ها و شدت اندرکنش بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت در عمق نسبی کم‌تر گزارش کردند. (Mohanta and Patra, 2021) با استفاده از برنامه نویسی بیان ژن (GEP) و در نظر گرفتن چهار پارامتر بی‌بعد مانند عمق نسبی، سینوسیته، پارامتر پیوستگی و نسبت تخلیه (Q_{vdm}/Q_{bf}) بر ارائه مدل تجربی برای برآورد دبی جریان کانال‌های مرکب پیچان متمرکز است. نتایج صحت‌سنجی مدل پیشنهادی ایشان بواسطه روش‌های مختلف تخمین دبی تخلیه موجود نتایج مطلوبی به همراه داشته است.

باتوجه به بالا بودن خسارات مالی و جانی در سیلاب‌های مخرب، مدل‌سازی آزمایشگاهی و به‌ویژه تطبیق نتایج با بررسی‌های میدانی، با ساده‌سازی پیچیدگی‌ها به توان تحلیل ساختار جریان سیلابی می‌افزاید. با استناد به مرور بر منابع می‌توان

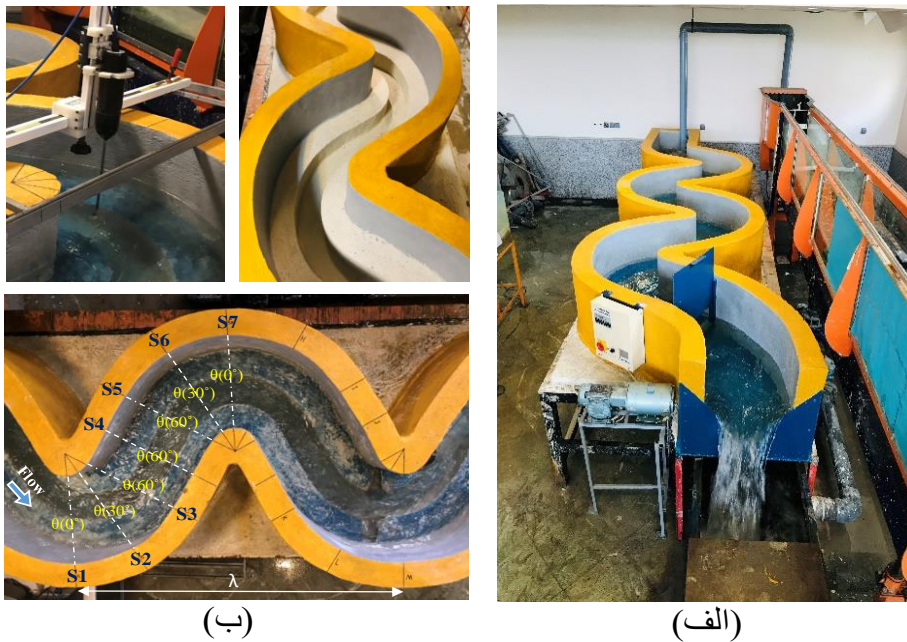
پس از گزارش Sellin (1964)، پژوهش‌های زیادی با هدف بررسی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب انجام شده است. به طور مثال می‌توان به (Shiono et al., 2009)، (Al-Khatib et al., 2014)، (Parsaie, 2016)، (Pan et Hamidifar et al., 2016)، (Mohanty et al., 2019) اشاره کرد.

(Myers, 1978) بر اساس اندازه‌گیری تنش برشی بستر و جدار و برقراری تعادل نیروها، مقادیر تنش برشی ظاهری روی مرزهای جدایی قائم را محاسبه کرد. (Shiono and Knight, 1991) با اعمال اثر جریان‌های ثانویه، مدل ریاضی ارائه شده خود در سال ۱۹۸۸ را اصلاح نموده و دقت نتایج شبیه‌سازی هیدرولیک جریان را برای شرایط خاصی از قبیل وجود دشت‌های سیلابی در مقاطع مرکب و وجود قوس در مسیر رودخانه را افزایش داده‌اند. (Shiono and Muto, 1998) با بررسی مکانیزم الگوی جریان در آبراهه ماریچ مرکب با مقطع مستطیلی، علت اصلی به‌وجود آمدن جریان‌های چرخشی در آبراهه اصلی را نیروی گریزازمرکز گزارش کردند، نقش تعامل بین جریان آبراهه اصلی و جریان سیلاب‌دشت در منطقه متقاطع را در ایجاد جریان ثانویه تولید شده در بخش سیلاب‌دشت‌ها مهم دانستند. در چنین آبراهه‌هایی، تنش‌های برشی موجود در منطقه متقاطع، در مقایسه با تنش‌های برشی بستر در اندازه‌های بزرگ‌تری می‌باشند. آن‌ها بیان کردند که اهمیت ویژه‌ای در تنش رینولدز $\rho U \bar{w}$ است، که معمولاً در مقایسه با سایر اجزای تنش، به عنوان عامل جریان ثانویه، در نظر گرفته می‌شود. (Kang and choi, 2005) با تجزیه و تحلیل جریان‌های گردابه‌ای بیان کردند که هر دو پارامتر ناهمسان تنش نرمال رینولدز و تنش برشی رینولدز به تولید جریان‌های ثانویه کمک می‌کنند. در نهایت مدل تنش رینولدز را کامل‌ترین و بهترین مدل آشفتگی برای تقریب تلاطم جریان گزارش کردند. (Zahiri et al., 2012) با استفاده از حل عددی مدل Shiono and Knight به روش اجزاء محدود، توزیع عرضی سرعت و نیز رابطه دبی - اشل رودخانه میناب در استان هرمزگان را در شرایط سیلاب استخراج نمودند. (Hamidifar and Omid, 2013) الگوی تلاطمی جریان در مقاطع مرکب منشوری تحت تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت با مسیر مستقیم را بررسی کردند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال آبراهه در حضور پوشش گیاهی در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی تا ۳۱ درصد کمتر است. همچنین آن‌ها گزارش کردند که جریان‌های ثانویه قوی و انتقال مومنتم بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت منجر به ایجاد گرداب‌های شدید در منحنی توزیع سرعت جریان

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. آبراهه پیچان آزمایشگاهی با مقطع عرضی مستطیلی، از جنس مصالح بنایی به طول پیچان ۷/۳۶ متر، عرض ۰/۴۶ متر و ارتفاع ۰/۴۸ متر، دارای ۴/۵ قوس متوالی طراحی و ساخته شد. مطابق نظر Da Silva (۱۹۹۵) آبراهه حاضر با ضریب سینوسیته ثابت ۱/۳ از نوع پیچان‌رود انتقالی می‌باشد. به منظور ایجاد مقطع مرکب، پله‌ای به عرض ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر در مقطع عرضی آبراهه به صورت متقارن و هم‌راستا با دیواره سیلاب-دشت‌ها احداث شد. نسبت عرض دشت سیلابی به عرض آبراهه اصلی ثابت و برابر یک در نظر گرفته شد. شیب طولی بستر آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها ثابت و مقدار آن بر اساس محدودیت‌های آزمایشگاهی برابر با ۰/۰۱۲ می‌باشد. شکل ۱ آبراهه مرکب پیچان به همراه تجهیزات و مقطع مورد بررسی در آزمایش را نشان می‌دهد.

نتیجه گرفت که هیدرولیک جریان تا حد زیادی متأثر از مورفولوژی مقطع مرکب آبراهه می‌باشد. از این رو، پیش‌بینی دقیق پارامترهای هیدرولیکی جریان در قوس مرکب رودخانه در بسیاری از طرح‌های مهندسی رودخانه، نظیر روندیابی سیلاب، تعیین حریم بستر و حفاظت از سواحل، امری ضروری خواهد بود. مطابق آنچه گفته شد، به نظر می‌رسد با وجود تحقیقات زیادی که توسط محققان مختلف در زمینه هیدرولیک جریان در آبراهه‌های مرکب مستقیم انجام شده، هنوز درک کاملی از تأثیر هم‌راستایی دیواره سیلاب‌دشت با آبراهه اصلی در این مقاطع پیچیده، وجود ندارد؛ بنابراین، در این پژوهش نویسندگان با عقیده بر متفاوت بودن هیدرودینامیک جریان در شرایط هم‌راستایی دیواره‌های سیلاب‌دشت توأم با مرکب بودن مقطع عرضی و پلان مارپیچ آبراهه اصلی و لزوم درک بهتر این موضوع، سعی بر آن دارند تا با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی، مشخصه‌های دینامیک جریان شامل توزیع گرادیان سرعت متوسط و تنش برشی رینولدز، مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱- نمایی از: (الف) آبراهه پیچان‌رود با مقطع مرکب. (ب) هم‌راستایی دیواره‌های سیلاب‌دشت با آبراهه پیچان اصلی به همراه مقاطع صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه برداشت داده توسط سرعت‌سنج ADV

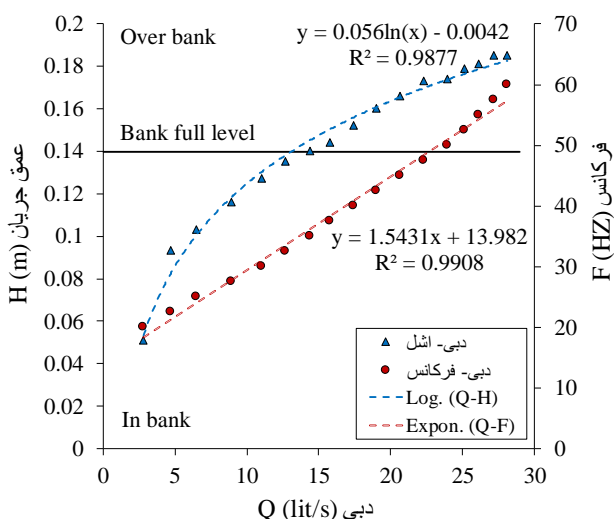
تغییرات عمق جریان در طول آبراهه با نصب اشل‌هایی در دو طرف دیواره سیلاب‌دشت اندازه‌گیری گردید. دبی جریان به صورت حجمی با مقادیر عددی فرانکس دستگاه اینورتور در بازه ۲/۵-۲۸ لیتر بر ثانیه کالیبره شد. برای تنظیم عمق جریان در محدوده عمق نسبی ۰/۳ تا ۰/۵۵ و برقراری جریان یکنواخت، از یک دریچه انتهایی استفاده شد ($D_r = \frac{H-h}{H}$ = عمق نسبی). در اینجا؛ H و h به ترتیب عمق جریان آبراهه اصلی و

مطابق توصیه Tominaga et al., (1989) و به منظور عدم تأثیرگذاری شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست بر مشخصه‌های جریان، محدوده اندازه‌گیری داده‌ها با معیار $L/3$ در فاصله ۴ متری از ابتدای آبراهه در نظر گرفته شد. در تحقیق حاضر نظر به اینکه عمق جریان در دو طرف دیواره سیلاب‌دشت به دلیل قوس و نیروی گریز مرکز ایجاد شده در عرض هر مقطع، متفاوت است، لذا برداشت اطلاعات در مقطع علیرغم متقارن بودن مقطع عرضی آبراهه، در تمامی سطح مقطع برداشت گردید. لازم به ذکر است؛

این پژوهش کلیه داده‌های با همبستگی کوچک‌تر از ۷۰ درصد و نسبت سیگنال به نویز کوچک‌تر از ۱۵ db با استفاده از نرم‌افزار WinADV غربال و حذف گردید. بنا بر محدودیت سرعت‌سنج ADV داده‌برداری در صفحه‌ای مشبک با ابعاد ۳*۳ سانتی‌متر مربع و به فاصله ۳/۵ سانتی‌متر از دیواره‌ها و ۶ سانتی‌متر از کف آبراهه انجام شد. فاصله از کف به طوری انتخاب شد که در فاصله ۰/۵ سانتی‌متری از کف داده‌برداری انجام شود. داده‌برداری‌ها در ۷ مقطع عرضی S1 تا S7 با زوایای صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه نسبت به رئوس قوس و در هر مقطع ۱۴ پروفیل عمقی سرعت در عرض آبراهه مرکب برداشت شد. به دلیل تشابه الگوی جریان در یک طول موج کامل از آبراهه، داده‌برداری‌ها در نصف یک طول موج (۰/۸ متر) انجام گرفت.

نتایج و بحث

شکل ۳ رابطه دبی اشل را برای جریان در مقطع اصلی و سیلاب-دشت در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. مطابق مشاهدات حداکثر تراز آب در کانال اصلی در دبی ۱۴ لیتر بر ثانیه مشاهده گردید و با افزایش جریان و جاری شدن جریان در سیلاب‌دشت‌ها رابطه دبی اشل نشان می‌دهد که شیب افزایش تراز آب به علت گسترش آب در سیلاب‌دشت‌ها و افزایش محیط تماس آب با جداره کاهش می‌یابد که این با موارد ثبت شده در منابع همخوانی دارد.

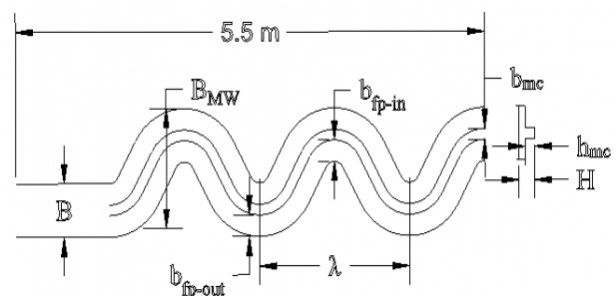


شکل ۳- فرکانس کالیبره شده با منحنی دبی - اشل در مقطع S4 آبراهه مرکب پیچانی تحقیق حاضر

خطوط هم سرعت

در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ خطوط هم سرعت (w,v,u) در اعماق نسبی ۰/۳ و ۰/۵۵ برای مقاطع مختلف به کمک نرم‌افزار (Surfer) ترسیم شده است.

دشت‌های سیلابی می‌باشد. مطابق شکل ۱- ب مقاطع برداشت داده همواره به صورت صفحه‌ای عمود بر امتداد جریان در نظر گرفته شد. از این‌رو؛ جهت‌یابی محورهای مختصات منطبق بر مسیر پیچان آبراهه و سرعت‌های u، v و w بر اساس جهت قراردادی شاخک‌های سرعت‌سنج ADV به ترتیب نشان‌دهنده راستای طولی آبراهه x، ارتفاع آبراهه z و در جهت عرض آبراهه y می‌باشد.



شکل ۲- مشخصه‌های هندسی آبراهه پیچان هم‌راستا با مقطع مرکب ماندندی

مشخصه‌های هندسی آبراهه اصلی پیچان بر اساس آبراهه Mohanta and Patra (2019) و باتوجه به محدودیت امکانات آزمایشگاهی موجود، مورداستفاده قرار گرفته است (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصه‌های هندسی آبراهه مرکب پیچان (متر)

ردیف	پارامترهای آبراهه	مدل
۱	زاویه انحناء آبراهه اصلی (ϕ_{mc})	60°
۲	زاویه انحناء سیلاب‌دشت (ϕ_{fp})	60°
۳	سینوسیته آبراهه اصلی (S_{mc})	۱/۳
۴	سینوسیته سیلاب‌دشت (S_{fp})	۱/۳
۵	طول موج آبراهه اصلی (λ)	۱/۶
۶	عرض آبراهه اصلی (b_{mc})	۰/۱۶
۷	عرض کل آبراهه (B)	۰/۴۶
۸	ارتفاع دیواره آبراهه اصلی (h)	۰/۱۴
۹	عرض سیلاب‌دشت خارجی (b_o)	۰/۱۵
۱۰	عرض سیلاب‌دشت داخلی (b_i)	۰/۱۵
۱۱	عرض کمربند ماندند (B_{MW})	۱/۲

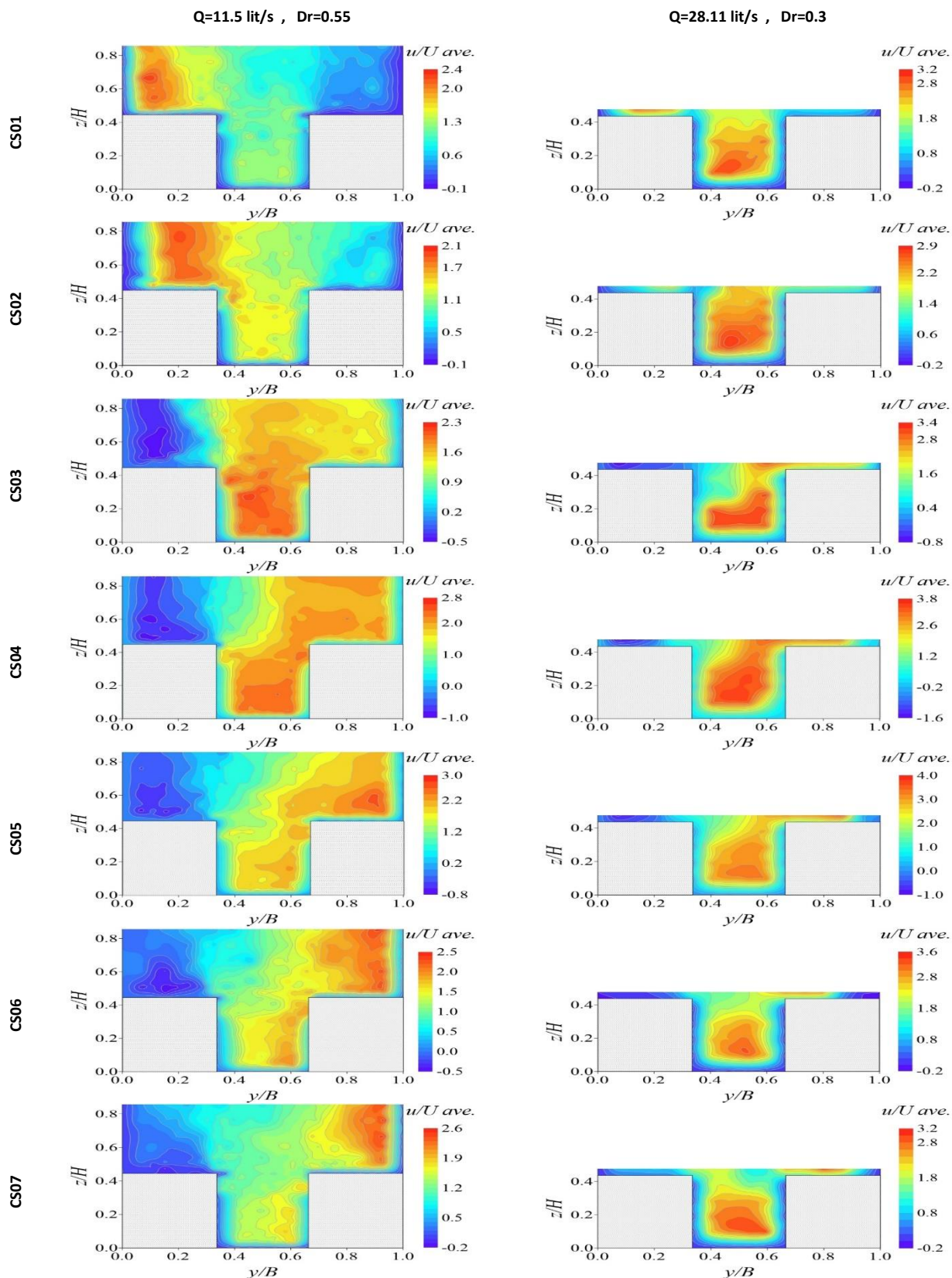
با اندازه‌گیری نقطه‌ای مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت و همچنین نوسانات سرعت به وسیله سرعت‌سنج ADV، به برآورد و تحلیل مشخصه‌های جریان از جمله توزیع گرادیان سرعت و تنش برشی رینولدز و شدت آشفتگی جریان پرداخته شد. برداشت داده‌های سرعت در تمام آزمایش‌ها، در مدت زمان ۱ دقیقه و با فرکانس ۲۵ هرتز انجام گردید؛ بنابراین سرعت متوسط نقطه‌ای (u,v,w) از میانگین‌گیری ۱۵۰۰ داده سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه محاسبه شده است. شایان‌ذکر است که در

سرعت‌های بیشینه طولی در آبراهه اصلی به سمت قوس خارجی متمایل است و با افزایش عمق آب، سرعت‌های حداکثری به سمت قوس داخلی سیلاب‌دشت‌ها منتقل می‌شوند. شایان ذکر است، در هر دو عمق نسبی و برای مقاطع S3 تا S7 وجود هسته‌های گردابه‌ای با سرعت طولی منفی در ساحل سیلاب‌دشت سمت چپ، نشان از برگشت جریان و تشکیل منطقه بدون فرسایش و سکون جریان^۲ را دارد.

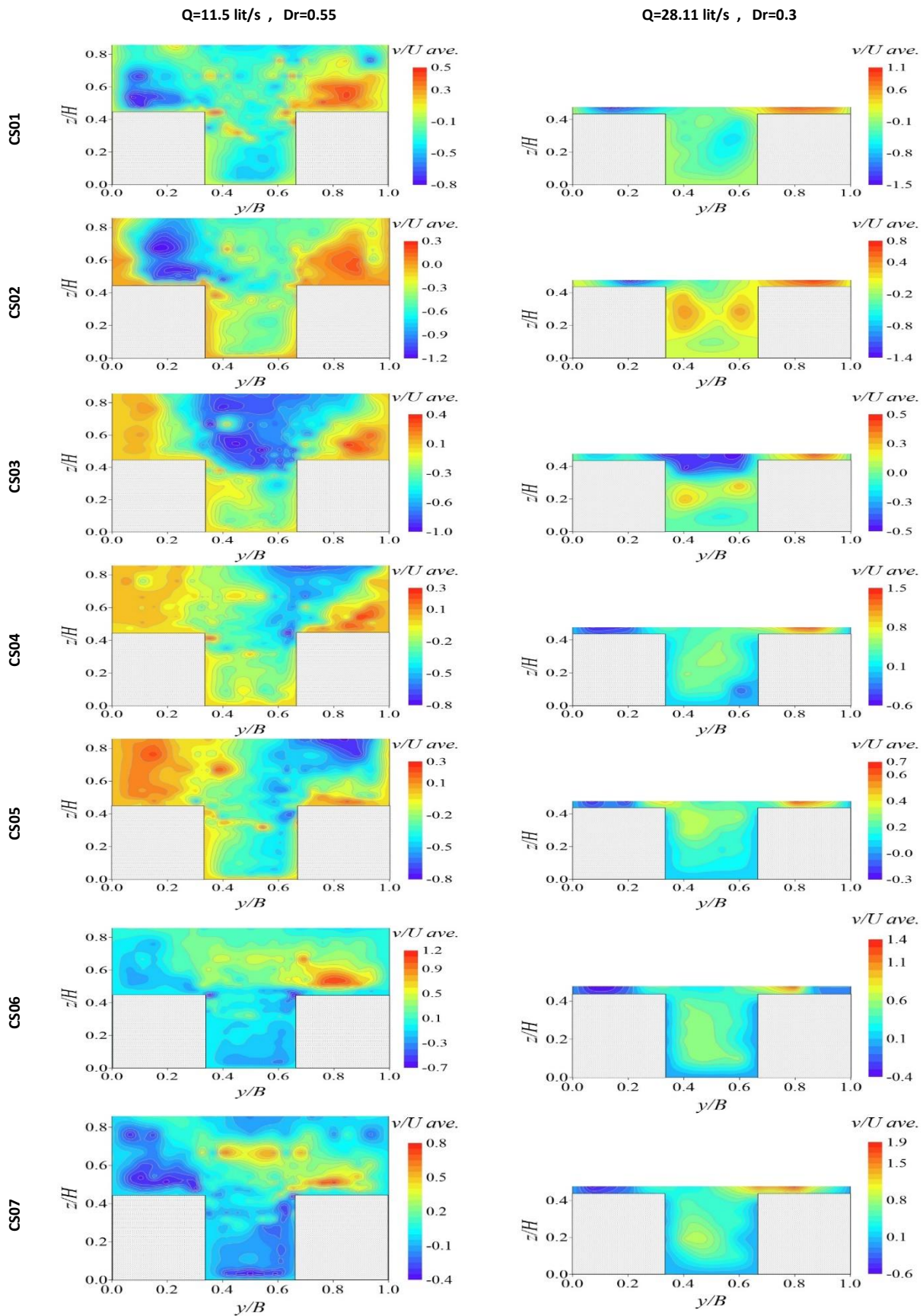
در شکل ۵ خطوط هم سرعت مؤلفه عرضی سرعت جریان برای دو عمق نسبی ۰/۳ و ۰/۵۵ در مقاطع مختلف آورده شده است. گرادیان‌های شدید مؤلفه عرضی جریان در آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها گویای وجود گرداب‌ها و جریان‌های ثانویه عرضی در این مناطق است. که این خود به دلیل هم‌راستایی دیواره سیلاب‌دشت‌ها در پیچانی بودن (نیروی گریزمرکز) و همچنین اثر متقابل با آبراهه اصلی در فصل مشترک این دو (گرادیان سرعت و انتقال مومنتم) می‌باشد. تغییرات مقطعی مؤلفه عرضی سرعت در برخی نواحی برای عمق نسبی ۰/۳ بسیار بیشتر از شرایط عمق نسبی ۰/۵۵ است. به نظر می‌رسد این تغییرات به دلیل افزایش اثر زبری بستر سیلاب‌دشت‌ها می‌باشد که سبب انحرافات شدیدتر جریان شده است. سرعت‌های عرضی مثبت و منفی به ترتیب در ساحل راست و چپ سیلاب‌دشت‌ها نشان از خروج جریان به صورت جوششی از محور مرکزی آبراهه اصلی می‌باشد که در اثر برخورد با پیشانی جریان طولی و بخصوص اثر نیروی گریزمرکز، به سمت دیواره داخلی و خارجی سیلاب‌دشت‌ها پخش شده است. با دقت در عمق نسبی ۰/۵۵ و مقاطع S4 و S5 مشاهده می‌شود که به دلیل خروج از قوس و کاهش اثر نیروی گریزمرکز، جریان‌های عرضی با شدت کمتری رخ داده است. در عمق نسبی ۰/۳ کاهش تأثیرگذاری نیروی گریزمرکز در مقطع S3 اتفاق افتاده است. که در ادامه بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت. خطوط تراز مؤلفه قائم سرعت جریان نیز برای دو عمق نسبی ۰/۳ و ۰/۵۵ در مقاطع مختلف، مطابق شکل ۶ آورده شده است. آنچه مشخص است اینکه؛ در دو عمق نسبی وجود جریان با سرعت‌های قائم منفی (جریان روبه پایین) و مثبت (جریان روبه بالا) در مقاطع اندازه‌گیری شده، به ترتیب نشان‌دهنده ورود جریان به درون آبراهه اصلی و خروج از آن می‌باشد. با کمی دقت در الگوی رفتاری جریان می‌توان دریافت که در همه مقاطع، جریان ورودی به آبراهه اصلی با سرعت‌های قائم منفی و روبه پایین از دو طرف مرز مشترک با سیلاب‌دشت‌ها شکل می‌گیرد و خروج جریان همان‌طور که پیش‌تر بیان شد با

شکل ۴ خطوط تراز مؤلفه طولی سرعت جریان برای دو عمق نسبی ۰/۳ و ۰/۵۵ را در مقاطع مختلف نشان می‌دهد. تغییرات نشان‌داده شده در مقادیر سرعت به‌ویژه کاهش و منفی شدن در محدوده مرز مشترک آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در هر دو عمق نسبی بیانگر انتقال جریان بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت و همچنین تغییر محسوس اندازه مومنتم در مرز مشترک آن‌ها می‌باشد (Shiono and Knight (1991). به‌ازای هر دو عمق نسبی مشاهده می‌شود که بیشینه سرعت انتقال جریان، از قوس داخلی S1 به سمت قوس داخلی S7 رخ داده است. به طور مثال؛ مشاهده می‌شود که تمرکز خطوط تراز سرعت‌های طولی بیشینه در مقطع S1 به سمت قوس داخلی (قوس محدب) ساحل سمت چپ هر مقطع است، این در حالی است که قوس داخلی در مقطع S7 به دلیل مورفولوژی پیچانی آبراهه، به ساحل راست انتقال یافته و متعاقباً بیشینه سرعت‌های طولی به سمت آن منحرف شده است. به نظر می‌رسد سرعت‌های بیشینه در عمق نسبی ۰/۳ از مقطع S2 وارد آبراهه اصلی شده و نشان از تمایل حرکتی بیشتر در آبراهه اصلی دارد، اما در عمق نسبی ۰/۵۵ از مقطع S2 و S3 به طور تدریجی وارد آبراهه اصلی شده و در بازه مقطعی S4 و S5 سریعاً خارج و به سمت قوس خارجی S7 جریان می‌یابد. همچنین از شکل ۴ می‌توان دریافت که الگوی رفتاری جریان در همه مقاطع در دو حالت عمق نسبی با هم متفاوت هستند. مقادیر عددی بیشینه سرعت در عمق نسبی ۰/۳ بزرگ‌تر از عمق نسبی ۰/۵۵ است که نشان از شدت بیشتر اثر متقابل جریان بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و نتیجتاً انحراف بیشتر جریان به سمت آبراهه اصلی دارد. به نظر می‌رسد عامل تعیین‌کننده انحرافات به وجود آمده در مسیریابی خط جریان^۱، وجود نیروی گریزمرکز در قوس‌های متوالی پیچان رود می‌باشد که در نهایت جریان‌های ثانویه درون آبراهه را تقویت می‌کند. به‌طوری که هسته تمرکز سرعت‌های ماکزیمم در همه مقاطع، به سمت قوس داخلی و با مقادیری به‌مراتب بیشتر مشاهده شده است.

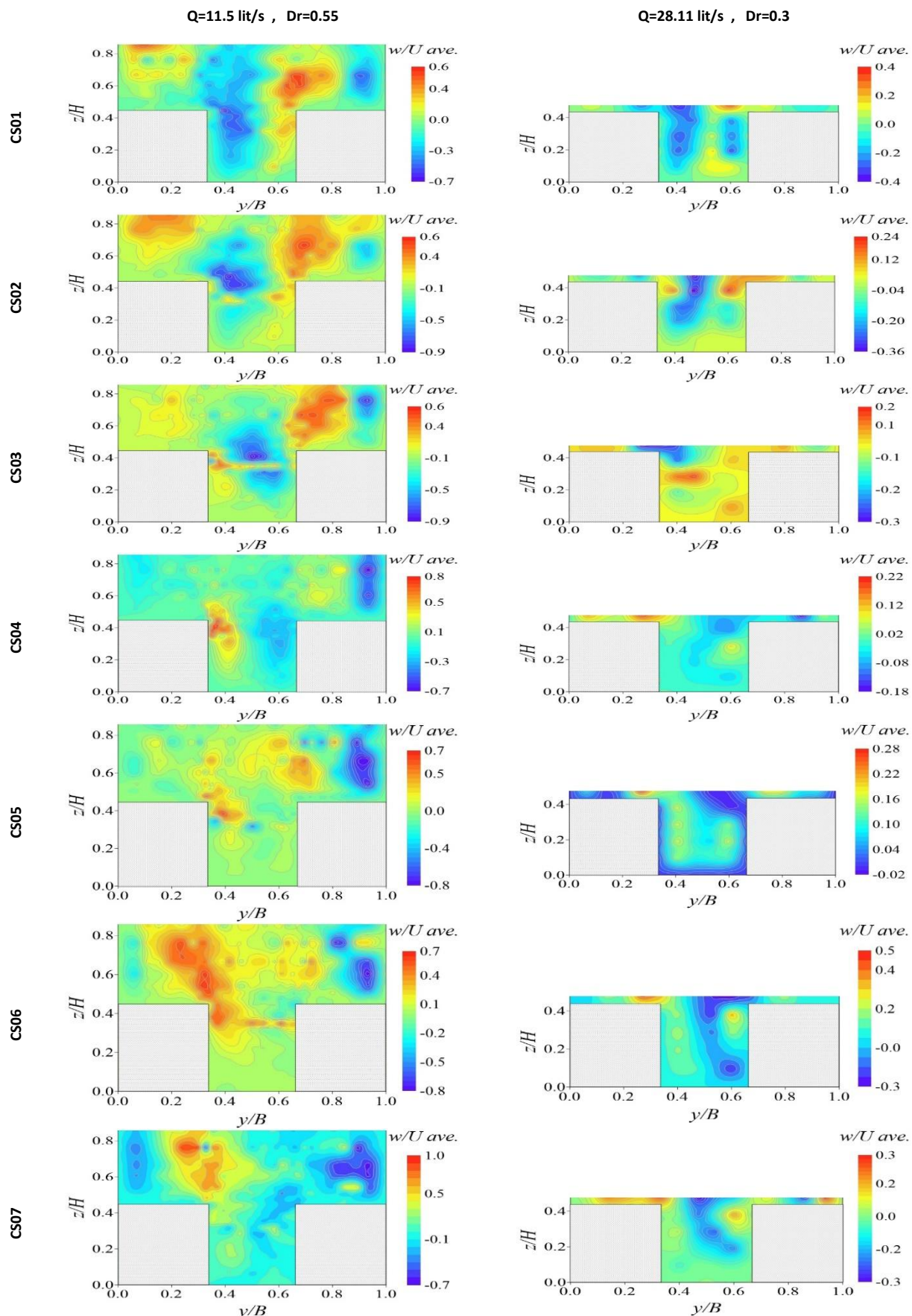
از روی الگوی حرکتی در پیشانی مؤلفه طولی سرعت جریان می‌توان محل بروز حداکثر فرسایش و مسیر انتقال رسوبات به پایین‌دست را تخمین زد. به نظر می‌رسد که در سیلاب‌های بزرگ‌تر قوس داخلی دیواره سیلاب‌دشت‌ها در معرض فرسایش و انتقال رسوب و همچنین ته‌نشینی در ساحل قوس خارجی پیچان روده (قوس مقعر) قرار خواهد گرفت. در سیلاب‌های کوچک‌تر نیز تمایل جریان بیشتر به تغییر مورفولوژی آبراهه اصلی است. تمرکز



شکل ۴- خطوط هم سرعت مؤلفه طولی سرعت $(U(\text{cm/s}))$ به‌ازای اعماق نسبی $(0/3)$ سمت راست و $(0/55)$ سمت چپ در مقاطع مختلف



شکل ۵- خطوط هم سرعت مؤلفه عرضی سرعت (V(cm/s)) به‌ازای اعماق نسبی (۳/ سمت راست و ۵۵/ سمت چپ) در مقاطع مختلف



شکل ۶- خطوط هم سرعت مؤلفه قائم سرعت (W(cm/s)) بازای اعماق نسبی (۳/ سمت راست و ۵۵/ سمت چپ) در مقاطع مختلف

ماریپیچی را در طول مسیر رودخانه ایجاد می‌کند (Zahiri 2018) در مقاطع S1 و S2 علاوه بر جریان‌های ریزشی از سیلاب-دشت‌ها، یک جریان چرخشی کوچک ساعت‌گرد در آبراهه اصلی ایجاد شده است. قابل توجه است که این جریان چرخشی ساعت‌گرد نقش مهمی در فرسایش دیواره خارجی آبراهه اصلی و انتقال بار بستر به دیواره داخلی بر عهده خواهد داشت. علاوه بر این، جریان‌های انتقالی کوچک نیز در کف آبراهه اصلی به سمت دیواره خارجی مشاهده می‌شود. همچنین در مرز مشترک آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها تغییر ناگهانی اندازه و جهت بردارهای جریان ثانویه کاملاً قابل رویت است.

ساختار جریان در قوس رودخانه‌ها همواره متأثر از تغییرات شدید عمق جریان، توزیع سرعت و تنش برشی مرزی در جهت عرض مقطع بوده که باعث ایجاد جریان‌های ثانویه و انتقال سرعت بیشینه به قوس داخلی رودخانه می‌شود. از این‌رو در تمامی مقاطع مشاهده می‌شود که جهت غالب حرکت بردارهای جریان ثانویه به سمت قوس داخلی دیواره سیلاب‌دشت آن مقطع رخ داده است.

در راستای مقایسه تغییرات سرعت متوسط در عرض آبراهه مرکب، با میانگین‌گیری از پروفیل‌های عمقی سرعت، شکل ۸ برای مقاطع مختلف در اعماق نسبی ۰/۳ و ۰/۵۵ ارائه شده است. در سری آزمایش‌های انجام شده به‌وضوح مشاهده می‌شود، نوسانات عرضی سرعت انتقال جریان در عمق نسبی کم‌تر، بیشتر بوده و با تلاطم سطحی چشمگیرتری نسبت به عمق نسبی بالاتر گزارش می‌شود. علاوه بر این؛ مقدار سرعت جریان به‌صورت افزایشی و کاهش‌ی در راستای عمق می‌باشد. که این خود می‌تواند به دلیل وجود پیچ‌وخم در مسیر جریان و همچنین، هم‌راستایی دیواره‌های سیلاب‌دشت با آبراهه اصلی پیچان باشد که با تشدید مقادیر مثبت و منفی سرعت و ایجاد گردابه‌های متنوع و جریان‌های ماریپیچی قوی‌تر، نشان از آشفتگی و سه‌بعدی بودن جریان در این نوع مقطع دارد.

نکته قابل توجه اینکه در بازه مرز مشترک بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، گرادیان سرعت بسیار زیاد و نامنظم است که به نظر می‌رسد به دلیل جریان‌های با مومنتم ضعیف می‌باشد که به‌واسطه گردابه‌های عمقی از لایه‌های پایین به لایه‌های بالای جریان منتقل می‌شوند. احتمالاً به علت مقاومت ایجاد شده در سرکوب این جریان روبه بالا توسط پیشانی جریان اصلی، گرادیان کاهشی شدیدی در مقادیر سرعت متوسط طولی جریان رخ داده است.

شایان‌ذکر است؛ هم‌راستایی دیواره‌های سیلاب‌دشت با

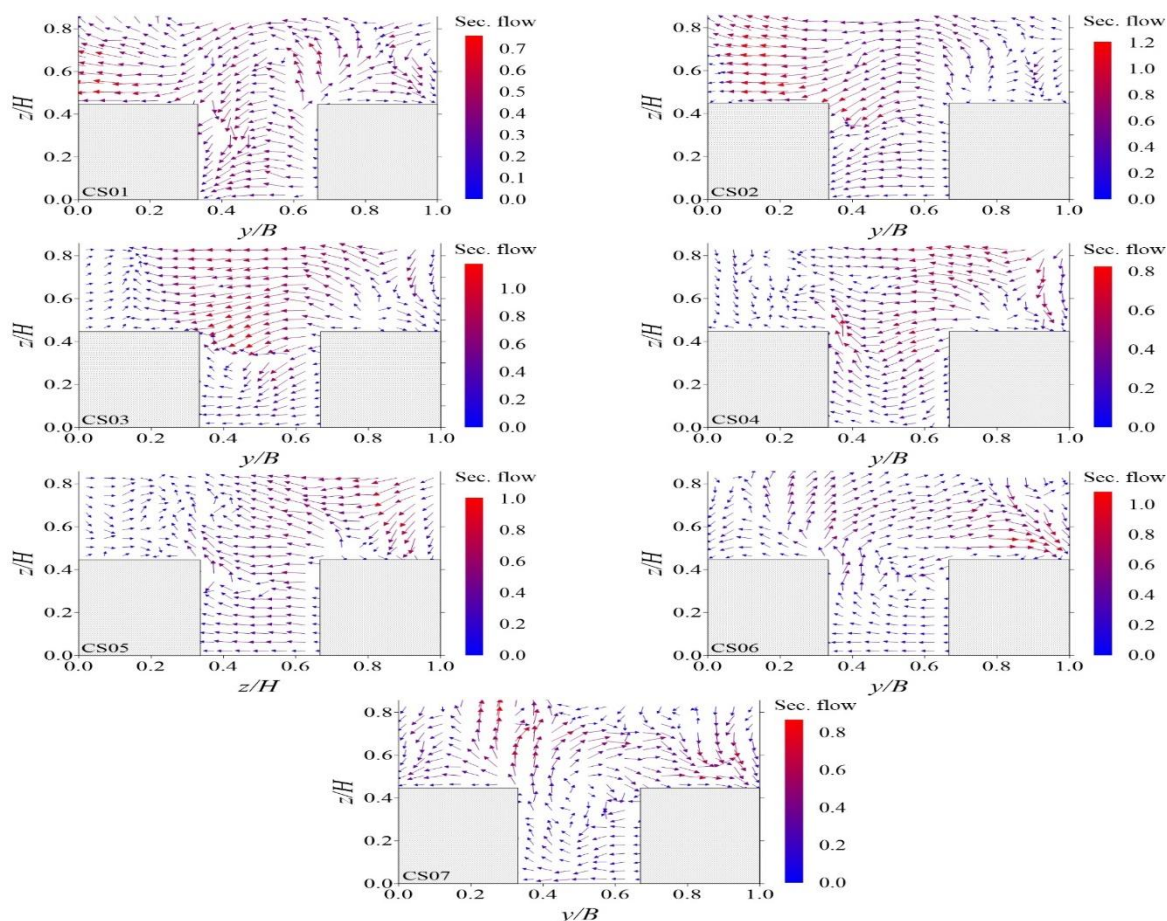
سرعت‌های قائم مثبت و روبه بالا از محور مرکزی آبراهه اصلی به‌صورت جوششی رخ می‌دهد و در سطح جریان به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در هر دو عمق نسبی تمایل جریان روبه‌بالا در آبراهه اصلی به سمت دیواره خارجی سیلاب‌دشت می‌باشد. در مقاطع S1 تا S3 برای عمق نسبی ۰/۵۵ هسته سرعت‌های قائم منفی بر الگوی جریان درون آبراهه اصلی غالب می‌باشد که نشان از ورود بیشتر جریان از سیلاب‌دشت‌ها به درون آبراهه اصلی دارد. اما از مقطع S5 تا S7 با تشکیل هسته سرعت‌های قائم مثبت مشخص است که جریان با الگوی ساختاری عکس مقاطع قبل، تمایل به خروج از آبراهه اصلی دارد. همچنین برای عمق نسبی ۰/۳ وجود علامت‌های منفی سرعت قائم و علامت سرعت‌های عرضی به سمت آبراهه اصلی، نسبت به عمق نسبی ۰/۵۵ می‌تواند تأکیدی بر وجود جریان با سرعت انتقال بیشتر در نواحی مرکزی آبراهه اصلی پیچان‌رود باشد. سرعت‌های صفر و حتی منفی در نزدیکی دیواره‌های قائم و کف آبراهه نیز نشان از کاهش سرعت به هنگام نزدیک شدن به جداره صلب و وجود جریان‌های چرخشی کوچک در این نواحی می‌باشد.

تأثیر جریان‌های ثانویه بر شدت آشفتگی جریان در مقاطع مرکب روباز به دلیل وجود پهنه‌های سیلابی بسیار حائز اهمیت است. از این‌رو؛ در شکل ۷ ساختار جریان گردابه‌ای و بردارهای جریان ثانویه برای نمونه در عمق نسبی ۰/۵۵ و مقاطع S1 تا S7 ارائه شده است.

علاوه بر جریان‌های چرخشی موجود در آبراهه اصلی، در نزدیکی دیواره سیلاب‌دشت‌ها نیز یک جریان ثانویه کوچک تشکیل می‌شود که با کاهش عمق آب روی دشت سیلابی، به‌مراتب مشهودتر است. از این‌رو قابل توضیح است که در قوس خارجی تمامی مقاطع اثر دیواره صلب سیلاب‌دشت بر الگوی جریان به‌صورت جریان چرخشی کوچک نمایان شده است. مطابق گزارش (Nezu and Rodi 1985) دلیل ایجاد این ساختار جریانی، اثر متقابل سطح آزاد جریان و دیواره کناری آبراهه است و اصطلاحاً "ناهمسانی آشفتگی" نامید می‌شود. از بردارهای جریان ثانویه در قوس‌های خارجی می‌توان دریافت که جریان از تراز نزدیک بستر به سمت دیواره سیلاب‌دشت حرکت کرده و پس از برخورد با آن و تشکیل گردابه‌های بزرگ و کشیده در تراز نزدیک سطح جریان، به سمت آبراهه اصلی برمی‌گردند. ظهیری در سال ۲۰۱۸ گزارش کرد که جریان چرخشی در عرض رودخانه، حاصل برآیند نیروهای گریزمرکز و گرادیان فشار هیدرواستاتیک می‌باشد و در ترکیب با جریان اصلی رودخانه، جریان حلزونی یا

مقاطع S3 تا S5 گویای تأثیرگذاری زیاد راستای دیواره‌های سیلاب‌دشت بر هیدرولیک جریان و فرسایش و ته‌نشست رسوب در مقاطع مرکب پیچان‌رود دارد؛ بنابراین می‌توان به این نواحی در سازوکار طراحی و اجرای سازه‌های آبی اهمیت بیشتری داد.

مسیر پیچانی آبراهه اصلی برخلاف حالت دیواره‌های مستقیم، سبب افزایش مقادیر سرعت جریان متوسط در ساحل داخلی سیلاب‌دشت نسبت به آبراهه اصلی شده است. همچنین، مناطقی با سرعت‌های منفی و صفر در ساحل سیلاب‌دشت سمت چپ



شکل ۷- بردارهای جریان ثانویه در عمق نسبی ۰/۵۵ برای مقاطع مختلف

سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت به آبراهه اصلی کاسته می‌شود. برای بررسی خطوط هم‌تراز مؤلفه‌های تنش رینولدز $(u'v')$ ، $(u'w')$ و $(v'w')$ به ترتیب در صفحات XY، XZ و YZ به‌ازای عمقی نسبی ۰/۵۵ و در هفت مقطع عرضی مختلف، شکل ۷ ارائه شده است. در این روابط، بطور مثال v' معرف نوسانات زمانی مؤلفه عرضی سرعت جریان است.

باتوجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که روند کلی تغییرات توزیع تنش رینولدز در تمامی پروفیل‌ها یکسان اتفاق افتاده است. علامت $u'v'$ با علامت شیب منحنی تغییرات سرعت جریان متوسط رابطه عکس دارد. به‌طوری که هر جا شیب منحنی تغییرات سرعت جریان مثبت است، مقدار $u'v'$ منفی است و بالعکس. در اینجا نشان داده شد که پروفیل‌های تنش رینولدز $u'w'$ در نزدیک بستر آبراهه اصلی، دارای مقادیر بیشینه و مثبت بوده و با فاصله گرفتن از بستر، با روندی کاهشی، به مقدار منفی

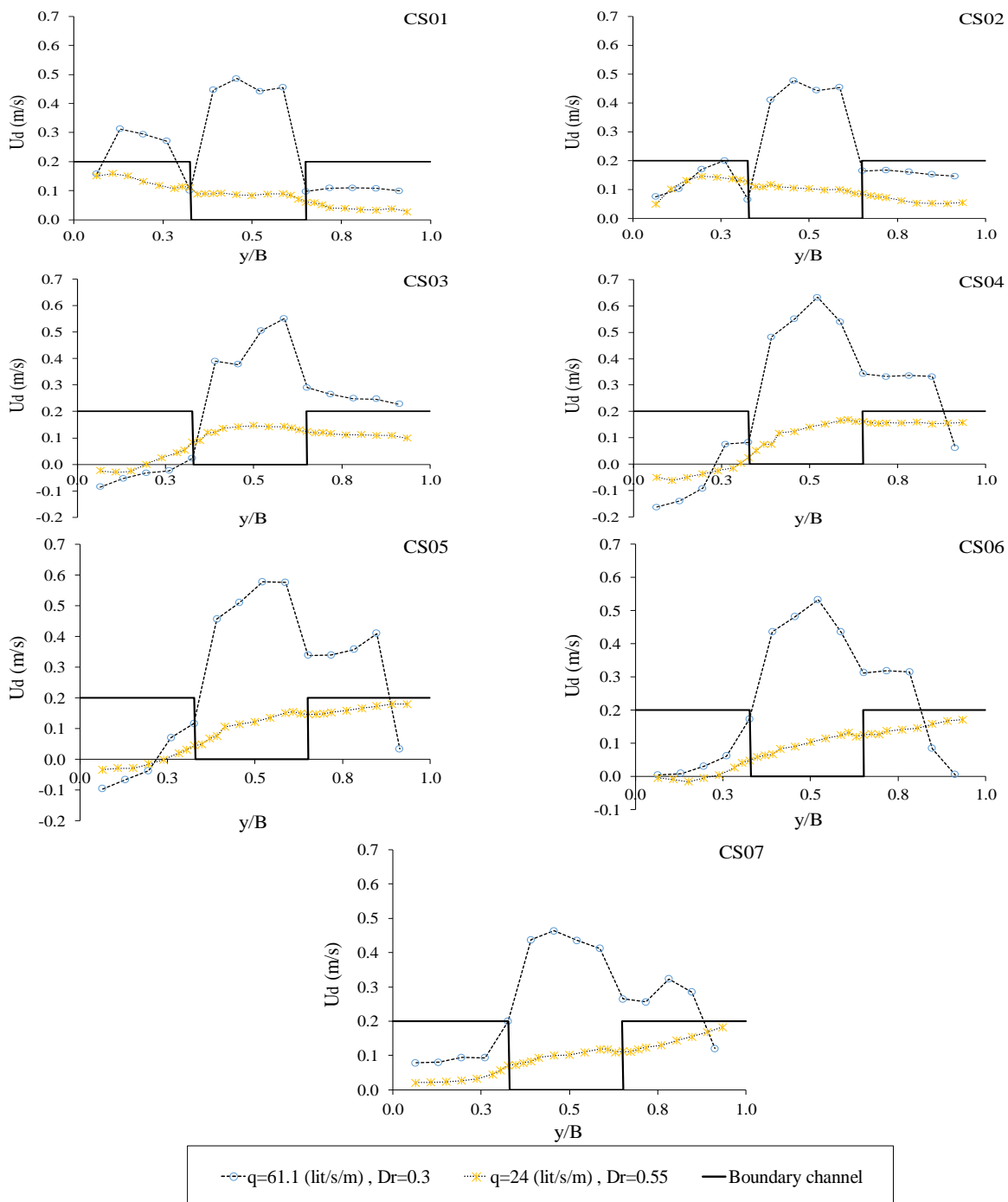
همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، نسبت سرعت متوسط در ساحل خارجی سیلاب‌دشت به سرعت متوسط کل مقطع، مشابه ساحل داخلی، تابع عمق نسبی جریان بوده و به ترتیب کمتر و بیشتر از یک است. به همین علت، جریان در سیلاب‌دشت خارجی بر خلاف سیلاب‌دشت داخلی اثر کاهنده بر سرعت جریان در آبراهه اصلی دارد. همچنین نسبت سرعت متوسط جریان در آبراهه اصلی به سرعت متوسط کل به‌ازای افزایش عمق نسبی تقریبی از ۰/۳ به ۰/۵۵ کاهش یافته است، به‌طوری که مقدار سرعت متوسط در آبراهه اصلی به سرعت متوسط کل مقطع نزدیک می‌گردد.

برای یک آبراهه مرکب ثابت، با افزایش عمق نسبی، بر مقدار نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت به آبراهه اصلی افزوده می‌گردد. همچنین در یک عمق نسبی ثابت، با هم-راستایی دیواره سیلاب‌دشت‌ها در آبراهه مرکب پیچان، از نسبت

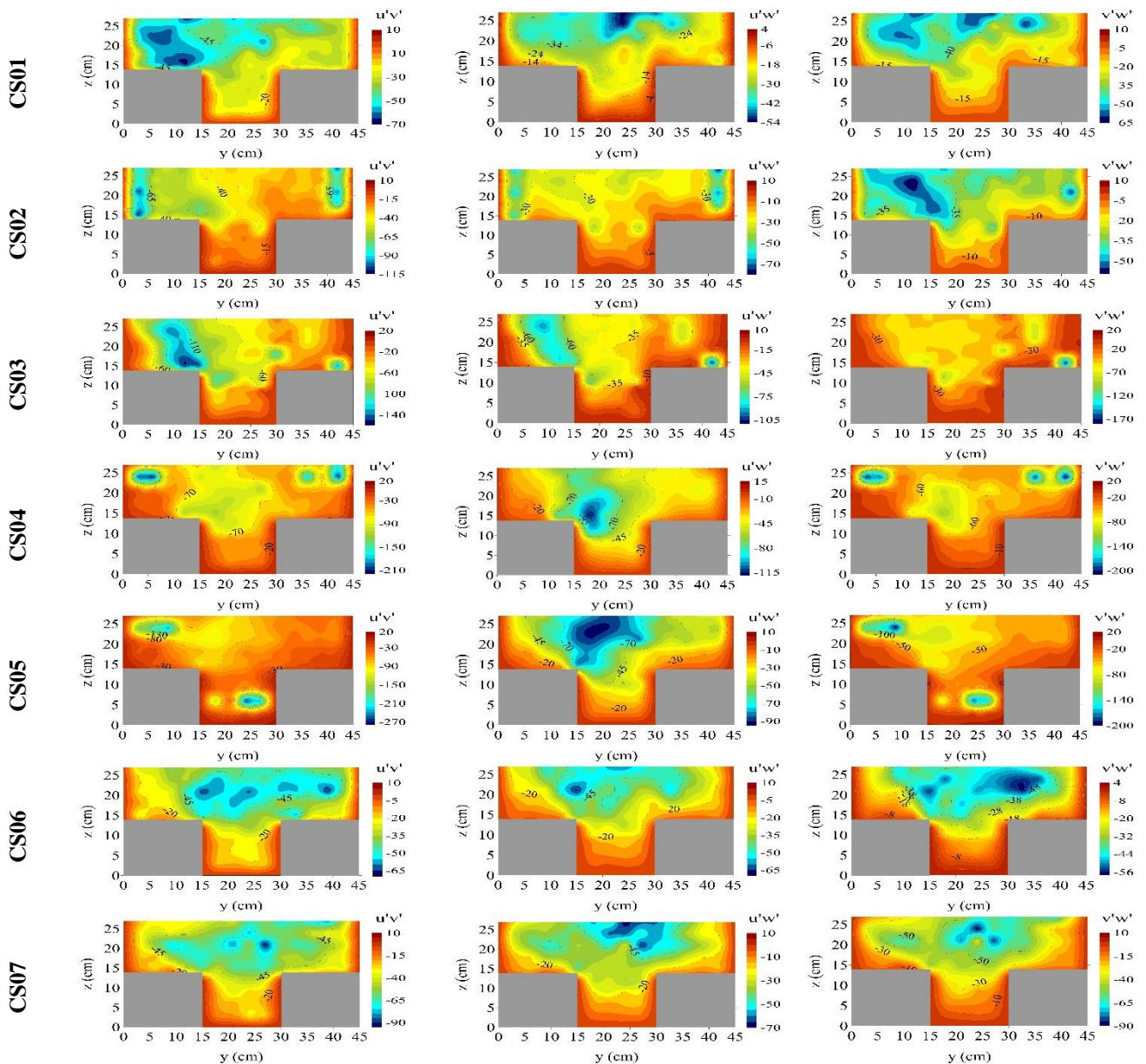
می‌نمایند، این در حالی است که تنش‌های مثبت وجود پدیده‌های حرکت پرتابی و جاروبی را بیان می‌کنند.

در نهایت با ارائه جدول ۲، شرایط آزمایش و نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر و دیگر محققان به طور خلاصه آورده شده است. آنچه به مشخص است، مرکب بودن مقطع آبراهه نقش بسزایی در افزایش قدرت جریان‌های چرخشی و آشفتگی‌های موجود ایفا می‌کند.

رسیده و کمینه خود را در نزدیکی سطح جریان نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد علت پیش‌آمد مقادیر منفی و کمینه تنش برشی رینولدز در نزدیکی سطح آب، برش بسیار کم در این منطقه و تأثیر سطح آزاد جریان باشد. همچنین در لبه دشت‌های سیلابی نیز مقدار این پارامتر موضعی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، نشان داده شد که مقدار حداکثری مؤلفه $\overline{v'w'}$ در مقطع S3 تا S5 اتفاق افتاده است. براساس مطالعات Bennett and Best (1995) مقادیر تنش‌های منفی تقابل جریان به سمت داخل و خارج را تعیین



شکل ۸- تغییرات سرعت متوسط در عرض آبراهه مرکب، با میانگین‌گیری از پروفیل‌های عمقی سرعت (U_d (cm/s)) به‌ازای اعماق نسبی ۰/۳ و ۰/۵۵ و در مقاطع مختلف



شکل ۹- خطوط هم تراز مؤلفه‌های تنش رینولدز $(u'v')$ ، $(u'w')$ و $(v'w')$ به‌ازای عمقی نسبی ۰/۵۵ و در مقاطع مختلف

جدول ۲- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با سایر محققین

محققان و سال	شرایط آزمایش	پارامترهای مورد بررسی	نتایج مطالعات
Ervin et al., (2000)	مدل‌سازی نرم‌افزاری شبه دوبعدی در رودخانه	تحلیل هیدرولیک جریان در رودخانه با مسیر مستقیم و پیچان	گرادیان مؤلفه‌های سرعت، با کاهش عمق نسبی از ۰/۵۵ به ۰/۳، افزایش می‌یابد که نشان از قدرت بیشتر گرداب‌ها و شدت آشفتگی بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت در عمق نسبی کمتر دارد. الگوی هم‌راستایی دیواره سیلاب‌دشت و کانال اصلی پیچان سبب انتقال بیشینه سرعت به سیلاب‌دشت داخلی و نمود اثر کاهنده سیلاب‌دشت خارجی بر سرعت جریان در آبراهه اصلی و تشدید جریان‌های ثانویه و چرخشی کل مقطع شده است.
Naghavi et al., (2020)	مدل‌سازی عددی کانال مرکب با نرم‌افزار Flow3D	بررسی هیدرودینامیک جریان برای هفت مقطع مختلف در نیم طول موج سینوس $(\lambda/2)$	اثر جریان‌های ثانویه در محل قوس رودخانه‌ها و مقاطع مرکب با مسیر پیچان‌رود حدود ۱۰ برابر مقدار مناظر آن در رودخانه‌های با مسیر مستقیم است. با افزایش عدد سینوسی کانال از ۱ به ۱/۶۴۱ سرعت و تنش برشی در نزدیکی بستر کاهش یافته است. همچنین، شدت و انرژی آشفتگی افزایش می‌یابد. به طوری که بیشینه مقادیر پارامترهای فوق‌الذکر در تمامی حالات سینوسیته کانال مرکب پیچان در قوس داخلی رخ می‌دهد.
Yan et al., (2020)	مدل‌سازی عددی قوس آبراهه با مقطع عرضی دوزنقه	بررسی تأثیر شیب عرضی مقطع بر الگوی رفتاری جریان با پنج مدل آشفتگی	در بین مدل‌های تلاطم مورد آزمایش، مدل $k-\epsilon$ قابل‌درک بهترین عملکرد را داشت. برای قوس آبراهه با شیب‌های مختلف مقطع عرضی، تعداد، موقعیت و قدرت هسته‌های جریان ثانویه با شیب دیواره کانال متفاوت است و تأثیر مناظر بر توزیع جریان و گرداب جریان دارد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر عمق نسبی جریان در سیلاب-دشت بر هیدرودینامیک جریان در آبراهه مرکب پیچانی که با دیواره سیلاب‌دشت هم‌راستای کانال اصلی است به صورت مدل-سازی فیزیکی در آزمایشگاه انجام گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصله به شرح ذیل است:

در آبراهه مرکب پیچانی وجود نیروی گریز از مرکز، تمرکز سرعت‌های بیشینه را به سمت دیواره‌های خارجی آبراهه اصلی متمایل می‌کند و با افزایش عمق آب تمرکز سرعت‌های بیشینه به دیواره داخلی سیلاب‌دشت‌ها منتقل می‌شوند. با بررسی سرعت‌های طولی شدت اندرکنش جریان بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت در عمق نسبی $0/3$ بیش از حالت $0/55$ می‌باشد. گرادیان‌های شدید مؤلفه عرضی سرعت جریان در آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها برای هر دو عمق نسبی گویای وجود گرداب‌ها و جریان‌های ثانویه ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد در این مناطق است که به دلیل هم‌راستایی در پیچانی بودن و همچنین اثر متقابل آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در فصل مشترک این دو می‌باشد. تغییرات مقطعی مؤلفه عرضی سرعت در برخی نواحی برای عمق نسبی $0/3$ بسیار بیشتر از شرایط عمق نسبی $0/55$ است.

نسبت سرعت متوسط در ساحل خارجی سیلاب‌دشت به سرعت متوسط کل مقطع، مشابه ساحل داخلی، تابع عمق نسبی جریان بوده و به ترتیب کمتر و بیشتر از یک است. به همین علت، جریان در سیلاب‌دشت خارجی بر خلاف سیلاب‌دشت

داخلی اثر کاهنده بر سرعت جریان در آبراهه اصلی دارد. همچنین نسبت سرعت متوسط جریان در آبراهه اصلی به سرعت متوسط کل به‌ازای افزایش عمق نسبی تقریبی از $0/3$ به $0/55$ کاهش یافته است، به طوری که مقدار سرعت متوسط در آبراهه اصلی به سرعت متوسط کل مقطع نزدیک می‌گردد.

در یک آبراهه مرکب، با افزایش عمق نسبی، نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت به آبراهه اصلی افزایش می‌یابد. همچنین در یک عمق نسبی ثابت، به دلیل هم‌راستایی دیواره سیلاب‌دشت و کانال اصلی در این نوع آبراهه، از نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت به آبراهه اصلی کاسته می‌شود.

روند کلی تغییرات توزیع تنش رینولدز در عمق نسبی یکسان اتفاق افتاده است. پروفیل‌های تنش رینولدز $\overline{u'w'}$ در نزدیک بستر آبراهه اصلی، دارای مقادیر بیشینه و مثبت بوده و با فاصله گرفتن از بستر، با روندی کاهشی، به مقدار منفی رسیده و کمینه خود را در نزدیکی سطح جریان نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد علت پیش‌آمد مقادیر منفی و کمینه تنش برشی رینولدز در نزدیکی سطح آب، کاهش آشفتگی در این منطقه و تأثیر سطح آزاد جریان باشد. همچنین در لبه دشت‌های سیلابی نیز مقدار این پارامتر موضعی افزایش می‌یابد.

سپاس‌گزاری

از کارکنان آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد که در انجام آزمایش‌های این تحقیق همکاری کرده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Al-Khatib, I. A., Abaza, Kh. A. and Fkhidah, I. A. (2014). Prediction of zonal and total discharges in smooth straight prismatic compound channels using regression modeling. *Flow Meas. Instrum.* 38, 40-48.
- Bennett, S. J. and J. L. Best. (1995). Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: Implication for sediment transport and bed form stability. *Sedimentology*, 42, 491-513.
- Da Silva, A. M. F. (1995). Turbulent flow in sine-generated meandering channels. Thesis (Ph.D.), Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston Canada.
- Da Silva, A.M.F. (2006). On why and how do rivers meander. *Journal of Hydraulic Research*, 44(5), 579-590.
- Dupuis, V., Proust, S., Berni, C. and Paquier, A. (2017). Mixing layer development in compound channel flows with submerged and emergent rigid vegetation over the floodplains. Experiments in *Fluids*, 58(4), 30.
- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R.H.J. (2000). Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126(9), 653-669.
- Hamidifar, H. and Omid, M.H. (2013). Floodplain vegetation contribution to velocity distribution in compound channels. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 3(6), 357-361.
- Hamidifar, H., Omid, M. H., & Keshavarzi, A. (2016). Kinetic energy and momentum correction coefficients in straight compound channels with vegetated floodplain. *Journal of hydrology*, 537, 10-17. *J. Fluid Mech.* 222, 617-646.
- Kang H. and Choi S. U. (2005). Reynolds stress modelling of rectangular open channel flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 51(11), 1319-1334.
- Liu, C., Wright, N., Liu, X. and Yang, K. (2014). An analytical model for lateral depth-averaged

- velocity distributions along a meander in curved compound channels, *Advances in Water Resources*, 74, 26-43.
- Mohanta, A. and Patra, K.C. (2019). MARS for Prediction of Shear Force and Discharge in Two-Stage Meandering Channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(8), 04019016.
- Mohanty, P.K. (2019). Flow and its distribution in wide meandering compound channels. *Journal of Hydrology*, 575, 115-130.
- Myers, W. (1978). Momentum transfer in a compound channel. *Journal of Hydraulic Research*. 16(2), 139-150.
- Naghavi, M., Mohammadi, M.A and Mahtabi, G. (2020). The intensity of turbulence and shear stress of the wall in the twisted composite channel due to the change of the bending coefficient. *Modeling in Engineering*, 18(60), 53-69. (In Farsi)
- Nezu I. and Rodi W. (1985). Experimental Study on Secondary Currents in Open- channel Flow. 21st IAHR Congress, Melbourne Australia. 115-119.
- Pan, Y., Li, Z., Yang, K. and Jia, D. (2019). Velocity distribution characteristics in meandering compound channels with one-sided vegetated floodplains. *Journal of Hydrology*. 578, 124068.
- Parsaie, A. (2016). Analyzing the distribution of momentum and energy coefficients in compound open channel. *Modeling Earth Sys. Environ*. 2, 1-5.
- Shahsavari, H., Khodashenas, S, R., Esmaili, K. (2020). Investigation of Relative Depth Effect on Flow Characteristics in Meandering Compound Channel. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 51(8), 2111-2124. (In Farsi)
- Sellin, H. J. (1964). A Laboratory Investigation into the Interaction between Flow in the Channel of a River and That of Floodplain. *La Houille Blanche*, 7, 793-801.
- Shiono, K. and Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel.
- Shiono, K., and Muto, Y. (1998). Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow. *Journal of fluid mechanics*, 376, 221-261.
- Shiono, K., Chan, T.L., Spooner, J., Rameshwaran, P. and Chandler, J.H., (2009). The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part I. *Journal of Hydraulic Research*, 47(1), 5-19.
- Tominaga, A., Nezu, L., Ezaki, K. and Nekagawa, H. (1989). Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*. 27(1), 149-173.
- Yan, X., Rennie, C. D., & Mohammadian, A. (2020). A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes. *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 1491-1510.
- Yang, K. J., Cao, S.Y. and Knight, D. W. (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains, *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(2), 148-159.
- Yonesi, H.A., Omid, M.H. and Ayyoubzadeh, S.A. (2013). The hydraulics of flow in non-prismatic compound channels. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 3(6), 342-356.
- Zahiri, A., & Najafzadeh, M. (2018). Optimized expressions to evaluate the flow discharge in main channels and floodplains using evolutionary computing and model classification. *International Journal of River Basin Management*, 16(1), 123-132.
- Zahiri, A., Abdolmajidi, H., Ghorbani Koohi Kheili, S. and Dehghani, A. (2012). Simulation of lateral velocity distribution in rivers using Finite Elements Method (Case study: Berentine hydrometric station in Minab River). *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(2), 63-80. (In Farsi)