

Investigation of Relative Depth Effect on Flow Characteristics in Meandering Compound Channel

HAMED SHAHSAVARI¹, SAEED REZA KHODASHENAS^{*1}, KAZEM ESMAILI¹

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
(Received: Apr. 6, 2020- Revised: May. 28, 2020- Accepted: May. 31, 2020)

ABSTRACT

One of the important aspects in describing river behavior is its curvature. The production of successive bends in natural rivers is an inevitable component of the process through which the river changes. Understanding the flow behavior in the interaction between the main channel and the floodplain, especially during floods, is necessary to protect soil and water structures. This study was conducted to better understand the hydrodynamics of the middle and turbulent flow in compound meandering channels. According to the natural conditions of most rivers, due to variation of discharge and depth ratios (flow depth in floodplain to flow depth in the main channel), in this study, a rectangular meander laboratory channel with a constant sinuosity 1.3 for different depth ratios of 0.35 and 0.55 was investigated. The results showed that the size of velocity components (u,v,w) at 0.35 relative depth was greater than 0.55, which indicating higher vortex strength and interaction intensity between the main channel and floodplain at lower relative depth. Also, by investigating the secondary flows, the existence of clockwise and counterclockwise rotational eddy currents in the main channel and floodplains and the location of these currents were determined.

Keywords: Curve Coefficient, Flood, Flow Pattern, Meander Waterway, Relative Depth.

بررسی اثر عمق نسبی بر مشخصات جریان در کانال مرکب پیچانرودی

حامد شهسواری^۱، سعیدرضا خداشناس^{۱*}، کاظم اسماعیلی^۱

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۱۱)

چکیده

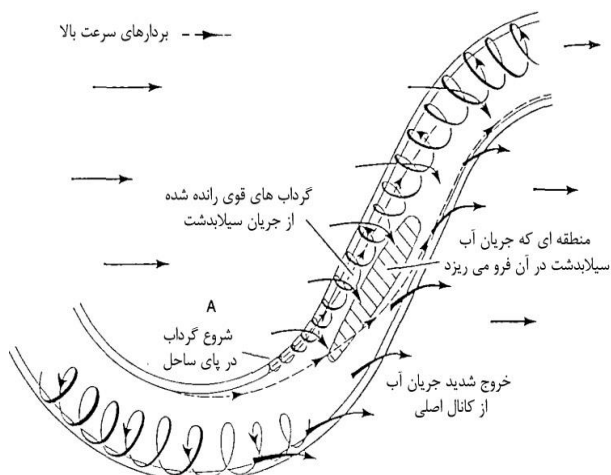
یکی از جنبه‌های مهم در توصیف رفتار رودخانه، مارپیچی بودن آن می‌باشد. تولید خم‌های متوالی در رودخانه‌های طبیعی یک مولفه اجتناب‌ناپذیر از فرایندی است که رودخانه طی آن دچار دگرگونی می‌شود. آگاهی از هیدرولیک جریان در اندرکنش کانال اصلی و سیلاب‌دشت به‌خصوص در زمان سیلاب برای حفاظت خاک بستر و نیز سازه‌ها و تاسیسات موجود لازم و ضروری است. این تحقیق، برای شناخت بهتر هیدرودینامیک جریان متوسط و آشفته در کانال‌های مرکب مارپیچ انجام شد. با توجه به شرایط طبیعی اکثر رودخانه‌ها، به‌دلیل متغیر بودن دبی و نسبت‌های عمقی متفاوت (عمق جریان در سیلاب‌دشت به عمق جریان در کانال اصلی)، در این پژوهش فلولم آزمایشگاهی مستطیلی پیچانرودی با سینوسیته ثابت ۱/۳ برای نسبت‌های عمقی متفاوت ۰/۳۵ و ۰/۵۵ بررسی شد. نتایج نشان داد که اندازه اجزاء مختلف سرعت در هر سه راستای مختصات در عمق نسبی ۰/۳۵ بیش‌تر از ۰/۵۵ است که نشان از قدرت بیشتر گرداب‌ها و شدت اندرکنش بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت در عمق نسبی کم‌تر را داشت. همچنین با بررسی جریان‌های ثانویه، وجود گرداب‌های چرخشی ساعتگرد و پادساعتگرد در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و موقعیت ایجاد این جریان‌ها تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: آبراهه مارپیچ، ضریب پیچانرود، عمق نسبی، الگوی جریان، سیلاب.

مقدمه

جریان‌های ثانویه می‌باشد. اما در کانال‌های پیچانرودی مرکب، علاوه بر نیروی گریز از مرکز، تنش برشی عرضی بین جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز مهم بوده و قدرت جریان ثانویه را تشدید می‌کند. این مکانیزم، افت انرژی را افزایش داده و دبی جریان را کاهش می‌دهد (Zahiri et al. 2013). شکل (۱) ساختار جریان را در یک کانال مارپیچ نشان می‌دهد.

حالت مارپیچی رودخانه‌ها همواره موضوعی مهم برای زمین‌شناسان و مهندسان آب و عمران بوده است. در جنبه کاربردی مسئله، اغلب برای یک مهندس آب لازم است که رفتار جریان را در طول انحناهای رودخانه و یا حتی داخل یک خم طراحی شده برای کانال‌های مصنوعی مطالعه نموده و در صورت لزوم عوارض نامطلوب آن را کنترل کند. از طرف دیگر رودخانه‌ها در هنگام سیلاب‌های شدید به شکل مقطع مرکب عمل می‌نمایند، به‌طوری که در هنگام سیل، آب از مقطع اصلی رودخانه لبریز شده و وارد سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. سیلاب‌دشت‌ها به واسطه نزدیکی به ساحل رودخانه و نیز داشتن عرض زیاد و خاک حاصل‌خیز همواره از جنبه‌های مختلف تفریحی، تجاری، کشاورزی و مسکونی مورد توجه بوده‌اند. بنابراین آگاهی از هیدرولیک جریان در سیلاب‌دشت‌ها برای تأمین حفاظت انسان‌ها و نیز سازه‌ها و تاسیسات موجود در آن‌ها لازم و ضروری است. مکانیزم اصلی جریان در پیچانرودها شامل جریان‌های ثانویه، انتقال سرعت بیشینه به قوس داخلی پیرامون راس منحنی و تبادل جریان بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی است. در کانال‌های پیچانرود ساده، نیروی گریز از مرکز، عامل اصلی ایجاد



گردش ثانویه ضعیف شونده در خم

شکل ۱- مکانیزم جریان در کانال‌های مرکب پیچانرودی (Sellin et al., 1993)

(1993)

مجاور آن بزرگتر از مقادیر خارج از قوس بود. Mohanty *et al.* (2012) با استفاده از یک کانال مرکب مارپیچ به بررسی مشخصات جریان با استفاده از دو مدل CCHE2D و CES پرداختند. آزمایش‌های عملی آن‌ها برای صحت‌سنجی نتایج در آزمایشگاه هیدرولیک نیت، روکیلا انجام گرفت. کانال مرکب این آزمایشات از یک کانال اصلی با مقطع دوزنقه‌ای به عرض ۰/۳۳ متر و عمق ۰/۶۵ متر با شیب جانبی ۱:۱، و سیلابدشت با حداکثر عرض ۳/۹۵ متر با طول کلی ۱۵ متر با بستر صاف تشکیل شده بود. در این آزمایشات با بررسی توزیع سرعت متوسط و توزیع تنش برشی به مقایسه نتایج دو مدل موجود و داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شد. نتایج نشان داد که مدل دو بعدی CCHE2D هم‌خوانی خوبی با نتایج عملی دارد در حالی که نتایج مدل CES به طور تقریبی مورد قبول می‌باشد. Liu *et al.* (2015) آزمایش‌های آزمایشگاهی خود را در یک کانال مرکب مارپیچ در مقیاس بزرگ انجام دادند. آن‌ها به بررسی الگوهای جریان در قسمت‌های مختلف متقاطع و فصل مشترک کانال اصلی و سیلابدشت انجام دادند. آن‌ها یک معادله در منحنی مختصات که حاصل از معادله حرکتی و معادله پیوستگی جریان است، به‌دست آوردند. در این معادله، اصطلاح تنش برشی به‌علت مشارکت ناچیز خود، به‌گونه‌ای که عبارات ساده شود، نادیده گرفته شد. همچنین از داده‌های تجربی محققان دیگر که در گذشته منتشر شده برای تأیید این مدل استفاده شد. مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر به پیش‌بینی دقیق دبی در کانال‌های مرکب با پیچ‌وخم است. Xiao *et al.* (2018) در تحقیق خود تحت عنوان ساختار جریان در کانال‌های مرکب دوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی متفاوت از کانال اصلی بیان کردند که این نوع شکل کانال اثر قابل توجهی بر ساختار جریان و مبادله حرکتی در منطقه اتصال کانال اصلی و سیلابدشت دارد. شیب‌های جانبی ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با استفاده از معادلات ناویر استوکس و مدل تنش رینولدز (RSM) شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که ۱- جریان‌های ثانویه به عنوان یک نتیجه از تغییرات ناهمسانگردی آشفتگی می‌باشند، که به‌واسطه تبادل مومنتم متنوع بین کانال اصلی و سیلابدشت می‌باشد. ۲- هنگامی که شیب جانبی کانال اصلی کاهش می‌یابد، شدت جریان ثانویه و تأثیر مستقیم آن بر سرعت جریان، تنش برشی بستر، تنش برشی رینولدز و شدت آشفتگی ضعیف‌تر می‌گردد. جدول (۱) شرایط آزمایش و نتایج به‌دست آمده در تحقیقات سایر محققین را به طور خلاصه نمایش می‌دهد.

تحقیقات و مطالعاتی در زمینه‌های میدان جریان در کانال‌های مرکب مارپیچ انجام شده است از جمله این تحقیقات می‌توان به Patra *et al.* 2004, Mohanty 2019, Liu *et al.* 2016, Shiono *et al.* 2008, Pan *et al.* 2019, Wormleaton *et al.* (2004)، اشاره کرد، که می‌توانند در برآورد اطلاعات مختلف هیدرولیکی، مفید واقع شوند. از این رو در ادامه برخی از مطالعات ساختار جریان در کانال‌های مرکب مستقیم و پیچانورد که تاکنون صورت گرفته، آورده شده است.

Shiono and Muto (1998) به بررسی مکانیزم جریان چرخشی در کانال مارپیچ مرکب پرداختند. آن‌ها دریافتند که علت اصلی به‌وجود آمدن جریان‌های چرخشی در کانال اصلی نیروی گریز از مرکز می‌باشد. علاوه بر این، تعامل بین جریان کانال اصلی و جریان سیلابدشت در منطقه متقاطع، نقش مهمی را در ایجاد جریان ثانویه تولید شده در بخش سیلابدشت‌ها دارد. Shiono *et al.* (2009) اثر زبری سیلابدشت روی جریان کانال اصلی و فرم‌های بستر در کانال مرکب مارپیچ را توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از تفاوت قابل توجه‌ای در ساختارها و شکل بستر داشت. زمانی که زبری سیلابدشت افزایش می‌یابد، جریان‌های ثانویه متعددی در طول کانال مارپیچ در عمق‌های عمیق‌تر آب اتفاق می‌افتد. این جریان‌های موجب به‌وجود آمدن موج‌هایی در شکل بستر در کانال مارپیچ می‌شود. مقایسه مقادیر سرعت در کانال اصلی و سیلابدشت در عمق یکسان، نشان داد که سرعت در موارد سیلابدشت زبر خیلی کندتر از حالت سیلابدشت صاف است که منجر به افزایش اثر متقابل بین جریان کانال اصلی و جریان آرام‌تر سیلابدشت می‌شود. این موضوع در منحنی‌های نرخ دبی تأثیرگذار است. همچنین بیان کردند که شکل بسترها با چرخش جریان‌های ثانویه در ارتباط نزدیکی هستند. Weiming and Zhiguo (2009) بیان کرد که مجموع این عوامل (مقاومت کلی جریان، کاهش تنش برشی بستر و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال بار بستر و افزایش تله‌اندازی و نشست رسوب) موجب تغییر شرایط هیدرولیکی رودخانه می‌شود که منجر به تغییر زیستگاه‌های آبی و مورفولوژی رودخانه می‌شود، لذا مدیریت زیست‌محیطی رودخانه‌ها نیازمند درک و پیش‌بینی این فرایندها می‌باشد. Prabir *et al.* (2012) ویژگی‌های جریان را در یک کانال مرکب مارپیچ با نسبت عرضی سیلابدشت به مقطع اصلی، با مقادیر مختلف عمق نسبی بررسی نمودند. نتایج نشان داد با افزایش عمق نسبی گرادیان سرعت اولیه در هر دو سمت قوس کاهش می‌یابد اما مقادیر سرعت در داخل قوس و سیلابدشت

جدول ۱- بررسی و مقایسه نتایج مطالعه‌های مختلف

محققان	شرایط آزمایش	پارامترهای مورد بررسی	نتایج مطالعات
Shiono and Muto (1998)	اعماق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ کانال پیچانرود با سه ضریب پیچانی ۱/۰۹، ۱/۳۷ و ۱/۵۷ با مقطع مستطیلی	بررسی مکانیزم جریان‌های چرخشی و تنش‌ها	تعامل بین جریان کانال اصلی و جریان سیلابدشت در منطقه متقاطع، نقش مهمی را در ایجاد جریان ثانویه تولید شده در بخش سیلابدشت-ها دارد. تنش‌های برشی موجود در منطقه متقاطع، در مقایسه با تنش‌های برشی بستر در اندازه‌های بزرگ‌ترند.
Shiono et al. (2009)	در کانال مرکب مارپیچ با ضریب پیچانی ۱/۳۸ با مقطع مستطیلی	مقایسات بین ساختار جریان و شکل بستر در شرایط متفاوت زبری سیلابدشت.	جریان‌ات ثانویه متعددی اتفاق می‌افتد زمانی که زبری سیلابدشت افزایش می‌یابد. مقایسه مقادیر سرعت در کانال اصلی و سیلابدشت در عمق یکسان، نشان داد که سرعت در موارد سیلابدشت زبر خیلی کندتر از حالت سیلابدشت صاف است. همچنین بیان کردند که شکل بسترها با چرخش جریان‌ات ثانویه در ارتباط نزدیکی هستند.
Liu et al. (2015)	کانال مرکب مارپیچ در مقیاس بزرگ	بررسی الگوهای جریان در قسمت‌های مختلف متقاطع و فصل مشترک کانال اصلی و سیلابدشت	آن‌ها یک معادله در منحنی مختصات که حاصل از معادله حرکتی و معادله پیوستگی جریان است، به دست آوردند. مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر به پیش‌بینی دقیق دبی در کانال‌های مرکب با پیچ و خم است.
Nikubakht et al. (2018)	عمق نسبی ۰/۳۵ در پیچانرود ملایم با مقطع مستطیلی در یک و دو ردیف پوشش گیاهی	تاثیر پوشش گیاهی بر توپوگرافی بستر	در پوشش گیاهی تغییرات عرضی بستر کمتر از حالت شاهد است. در حضور پوشش گیاهی موقیعت حداکثر عمق آبستنگی به سمت قوس خارجی تغییر یافته و پوشش باعث شده در برخی موارد عمق آبستنگی تا ۸۸ درصد کاهش یابد.

تحقیق حاضر در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی مجموعه آزمایشگاه‌های گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد و بر روی یک کانال آزمایشگاهی به طول ۸ متر و عرض و ارتفاع به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۵۰ متر انجام گرفت. جداره‌های کانال از جنس شیشه شفاف و در تمام آزمایشات شیب کانال ۰/۰۳ و ثابت انتخاب گردید. به منظور بررسی الگوی جریان در کانال با مقطع مرکب مارپیچ مدل آبراهه سیلابدشتی از جنس یونیلیت ساخته و در کانال نصب گردید. مقطع کانال اصلی مستطیل شکل در نظر گرفته شد. شکل (۲) کانال پیچانرود مورد بررسی در آزمایش را همراه با مشخصات آن نشان می‌دهد. اطلاعات مقطع مورد آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین مشخصات کانال مارپیچ با توجه به ابعاد اصلی کانال و پارامترهای مختلف همراه با محدودیت‌های موجود برای ساخت کانال مرکب مارپیچ، با استفاده از مطالعه‌ی Hagerman and Williams (2000) طراحی و ساخته شد که در تمام آزمایش‌ها کانال پیچانرود با ضریب پیچانی ثابت ۱/۳ (نسبت طول کانال مارپیچ به طول مستقیم بین دو قله) بود. بنابراین بعد از به دست آوردن پارامترها، الگوی کانال مارپیچ بر روی شاپلون طراحی شد و سپس با استفاده از الگوهای کشیده شده، آکاستیوها برش خورده و در کانال نصب گردیدند. در جدول (۳) مشخصات کانال پیچانرود آورده شده است. در نهایت شکل (۳) مقطع کانال پیچانرود و مقاطع مورد بررسی در آزمایش را نشان می‌دهد.

آنچه که از نتایج این محققان می‌توان دریافت آن است که مطالعه‌ی بیشتر هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب مارپیچ باعث درک هر چه بیشتر رفتار جریان در این نوع از کانال‌ها و ارائه راه کار جهت مقابله با خطرات ناشی از جریان سیلابی در این نوع از کانال‌ها می‌شود. در مطالعات انجام شده به بررسی الگوهای جریان، ظرفیت انتقال آب و ساختارهای آشفته پرداخته شده که نشان از اهمیت این موارد در شناخت هرچه بیشتر این پارامترها و ضرورت آن‌ها در کانال‌های مرکب را دارد. بنابراین تحقیق حاضر پیرامون شناخت بهتر و بیشتر ساختارهای جریان متوسط و آشفته در کانال‌های مرکب مارپیچ با استفاده از وسایل امروزی‌تری مانند سرعت‌سنج ADV می‌باشد. هدف دیگر این پژوهش با توجه به شرایط رودخانه طبیعی اکثر رودخانه‌ها، به دلیل متغیر بودن دبی و نسبت‌های عمقی متفاوت، انجام مطالعه‌ای در دو عمق-نسبی حساس ۰/۳۵ و ۰/۵۵ است تا میزان تغییرات به وجود آمده در این دو عمق نسبی در کانال‌های مارپیچ مرکب با سینوسیتهی ۱/۳ و بستر رسوبی یکنواخت ثابت مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین نوآوری این تحقیق، انجام آن در شرایط شکل کانال مارپیچ با طول موج واحد با بستر یکنواخت در دو عمق نسبی حساس ذکر شده است.

مواد و روش‌ها



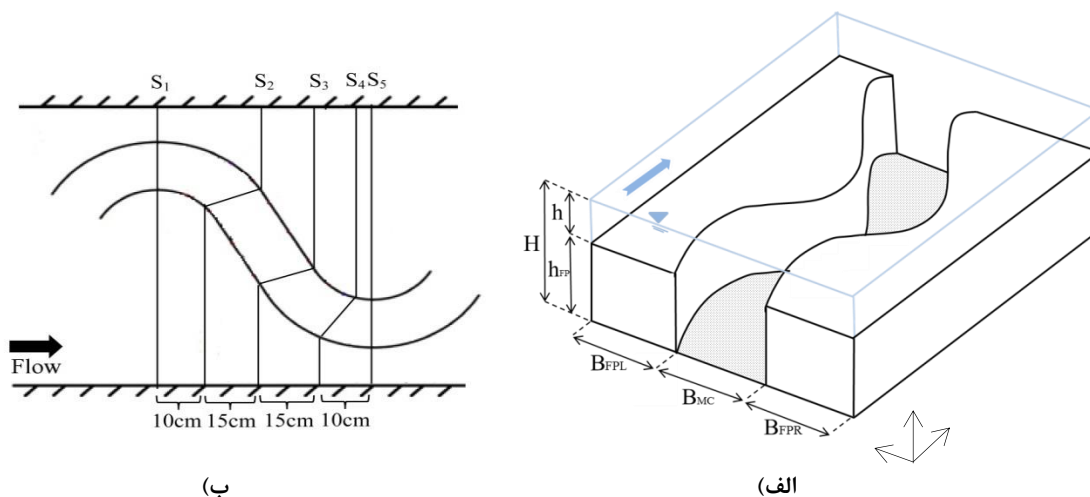
شکل ۲- کانال پیچانرود آماده شده برای انجام آزمایشها

جدول ۲- اطلاعات مقطع مورد بررسی

نام مقطع	تعداد سیلابدشتها	حداکثر عرض سیلابدشتها راست و چپ (m) (\$B_{fp}\$)	ارتفاع سیلابدشت سمت راست (m) (\$h_{Rfp}\$)	ارتفاع سیلابدشت سمت چپ (m) (\$h_{Lfp}\$)	عرض کانال اصلی (m) (\$B_{mc}\$)
شماره ۱	۲	۰/۴۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۰

جدول ۳- مشخصات کانال پیچانرود در کانال آزمایشگاهی

شکل مقطع	زاویه قوس \$\theta\$	طول موج پیچ (m) (\$L_w\$)	عرض پیچ و خم (m) (\$B_M\$)	طول مستقیم (m) (\$L_{co}\$)	زاویه مقطع	شعاع متوسط (m) (\$r_c\$)
مستطیلی	۱۲۰	۱/۳	۰/۳۸	۰/۲۶	مستقیم	۰/۲۱



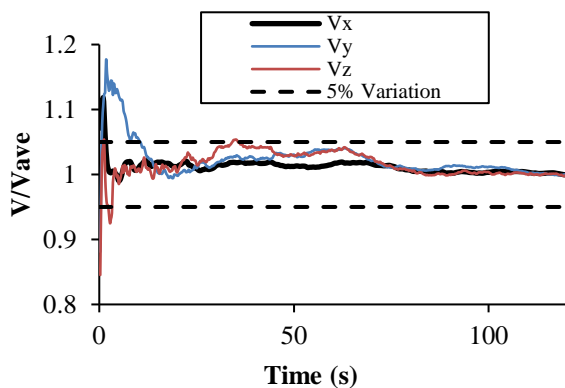
شکل ۳- شکل شماتیک از الف) مشخصات مقطع کانال پیچانرود ب) مقاطع مشخص شده برای برداشت داده توسط دستگاه ADV

آب با استفاده از عمق سنج سوزنی با دقت ± 0.1 میلی‌متر اندازه گیری شد. برای تنظیم تراز سطح آب و از بین بردن هرگونه موج در کانال برای هر آزمایش از یک دریچه نصب شده در پایین دست استفاده شد.

سیستم پمپاژ کانال یک جریان چرخشی را در مسیر کانال و مخزن آب ایجاد می‌نمود و دبی جریان در هر حالت با توجه به

بر طبق توصیه Tominaga *et al.* (1989) و به منظور عدم تأثیرگذاری شرایط مرزی بالادست و پایین دست بر خصوصیات جریان در محل اندازه‌گیری، می‌باید اندازه‌گیری خصوصیات جریان در محدوده $\frac{2}{3}L$ از ابتدای فلوم انجام گیرد (که L طول فلوم و برابر با ۸ متر مفید است). از این رو محل اندازه‌گیری داده‌ها در فاصله حدوداً ۵ متری از ابتدا کانال در نظر گرفته شد. عمق

است. بنابراین سرعت متوسط نقطه‌ای (u,v,w) از میانگین ۱۵۰۰ = ۲۵ × ۶۰ سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه محاسبه شد. به منظور رسم نمودارها، داده‌ها با استفاده از نرم افزار WinADV فیلتر شدند (Wahl, 2000). نحوه فیلتر کردن داده‌ها توسط نرم افزار به این صورت است که برای هر نقطه بین ۱۵۰۰ عدد داده‌های نامناسب با استفاده از فیلتر فازی حذف شده Goring and Nikora (2002) بهره گرفته شد. بر اساس سایر داده‌ها سرعت متوسط نقطه‌ای به دست آمد.



شکل ۴- تحلیل سری زمانی برای تعیین مدت زمان برداشت داده با دستگاه ADV

برای برداشت سرعت جریان، حداقل نه پروفیل سرعت در کانال اصلی و نوزده پروفیل در مجموع برای هر دو سیلابدشت راست و چپ برداشت شد. فاصله بین پروفیل‌ها در نقاط نزدیک به میانه کانال اصلی و سیلابدشت یک سانتی‌متر و در کانال اصلی سه سانتی‌متر و در سیلابدشت ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

تحلیل ابعادی

قبل از انجام آزمایش‌ها ابتدا به واسطه تحلیل ابعادی، پارامترهای مهم در پدیده الگو جریان در کانال مرکب مارپیچ بررسی شد. در این تحقیق روش Π باکینگهام برای تحلیل ابعادی بین متغیرهای موثر بصورت رابطه (۱) مورد استفاده قرار گرفت.

$$F = f(u, U_{avg}, \mu, \rho, g, s, L, B, h, H, y, \theta) \quad (1)$$

که در این رابطه u سرعت لحظه‌ای، U_{avg} سرعت متوسط جریان، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزوجت دینامیکی سیال، g شتاب ثقل، H عمق کلی جریان در کانال اصلی، h عمق جریان در سیلابدشت، y عمق جریان در کانال اصلی، s شیب کانال، L طول موج کانال پیچانی، B عرض کانال پیچانی، θ زاویه انحراف کانال اصلی است.

در رابطه (۲)، U_{avg} و H به عنوان متغیرهای اصلی یا تکرارشونده در نظر گرفته شدند. گروه‌های بدون بعد حاصل، به شرح زیر به دست آمدند:

عمق نسبی مورد نظر (صفر، ۰/۳۵ و ۰/۵۵) از طریق دبی سنج مغناطیسی که روی لوله ورودی جریان به کانال قرار داشت و سرریز مثلثی در خروجی جریان از کانال قرائت می‌گردید. به منظور از بین بردن تلاطم و امواج اضافی، از یک آرام کننده در ورودی جریان به کانال استفاده شد. در جدول (۴) شرایط انجام آزمایش‌ها درج شده است.

جدول ۴- شرایط جریان در عمق‌های نسبی مختلف در آزمایش‌ها

شماره آزمایش	عمق نسبی	عمق آب در کانال اصلی (mm)	عمق آب در سیلابدشت (mm)	دبی (Lit/s)
۱	صفر	۱۰۰	-	۷/۱
۲	۰/۳۵	۱۵۵	۵۵	۲۵/۸
۳	۰/۵۵	۲۲۰	۱۲۰	۳۴/۲

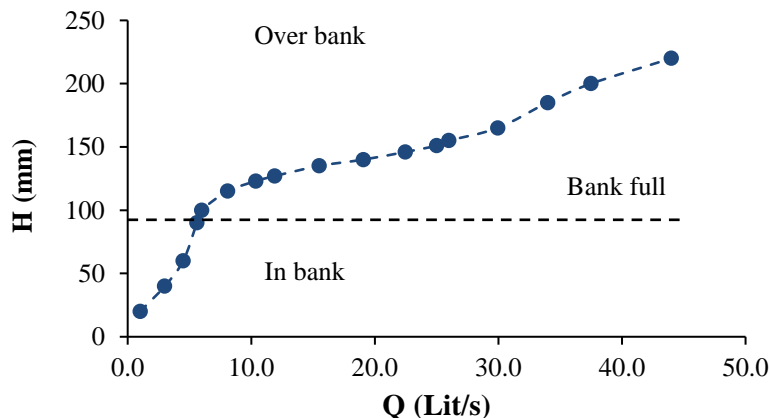
نوع پوشش و اندازه‌گیری سرعت

به منظور ایجاد بستر زبر از مصالح رودخانه‌ای و برای دانه‌بندی این مصالح از روش الک استاندارد امریکایی (ASTM) استفاده شد. پس از انجام عملیات دانه‌بندی، مقادیر مصالح مانده بر روی الک‌ها با متوسط قطر یک میلی‌متر ($D_{50} = 1 \text{ mm}$) به میزان کافی جمع‌آوری و به منظور ایجاد زبری مصنوعی بر روی بستر کانال چسبانده شد. لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌ها به منظور از بین بردن هرگونه خطا، حدوداً طول ۸ متر فلوم توسط مصالح زبر پوشش داده شد. از دستگاه ADV که امکان اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان در زوایای مختلف را برای کاربر فراهم می‌کند برای اندازه‌گیری سرعت و بررسی الگوی جریان استفاده گردید. دستگاه ADV مولفه‌های سرعت را در راستای گیرنده‌ها و یا در راستای محورهای x, y, z اندازه‌گیری می‌کند. معمولاً اندازه‌گیری‌ها در راستای محورها صورت می‌گیرد. برای این منظور هنگام قرارگیری دستگاه باید به محورهای مختصات توجه کرد. یکی از گیرنده‌های دستگاه، دارای علامت قرمز رنگی است که نشان‌دهنده‌ی محور x می‌باشد. در نتیجه میله عمودی دستگاه محور z را نشان می‌دهد. از آنجا که سرعت در جهت جریان حائز اهمیت است در این تحقیق سنسور با نشانه قرمز رنگ در جهت جریان قرار گرفت و لذا محور x در جهت جریان و به سمت پایین-دست جریان کلی کانال شیشه‌ای بود. در این تحقیق اندازه‌گیری‌ها با توجه به فرکانس ۲۵ هرتز و تحلیل سری زمانی (Stationary Analyze) در زمان ۱ دقیقه صورت گرفت؛ که در شکل (۴) روند این تحلیل نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) از زمان ۴۵ ثانیه به بعد روند تغییرات داده‌ها کم و یکسان شده

نتایج و بحث

دبی عبوری

سرعت جریان در اعماق نسبی ۰/۳۵ (جریان کم عمق تر) و ۰/۵۵ (جریان عمیق تر) اندازه گیری شد. در شکل (۵) میزان دبی عبوری و عمق جریان ترسیم شده است. مطابق شکل زمانی که عمق جریان به ۱۰۰ میلی متر می رسد (کانال اصلی پیچانرود در حالت پر) دبی برابر ۷/۱۰ لیتر بر ثانیه می باشد. در شرایطی که جریان روی سیلابدشت برقرار شود مشاهده می گردد که شیب منحنی دبی اشل در قسمت سیلابدشت به مراتب نسبت شیب منحنی در کانال اصلی کمتر است که نشان دهنده ی اثر افزایش محیط تر در کاهش تراز آب در شرایط افزایش دبی است.



شکل ۵- منحنی دبی جریان نسبت به عمق آب در کانال پیچانرود تحقیق حاضر

۰/۳۱ به ۰/۱۹ می رسد، دلیل این کاهش به نظر خروج آب از کانال پیچانرود اصلی با توجه به شکل پیچانرود و وجود پیچ و خم متوالی است. که به نظر تاثیر بیشتری نسبت به زبری سطح سیلابدشت داشته است. این کاهش مقدار ضریب مانینگ در تحقیق Sellin et al. (1993) نیز مشاهده می شود. در ادامه با افزایش عمق نسبی آب مقدار n افزایش می یابد تا به مقدار ۰/۲۷ رسیده که به نسبت ضریب مانینگ کانال اصلی مقادیر بالاتری دارد. این نشان می دهد مرزهای کانال اصلی و سیلابدشت، مقاومت جریان را در اعماق نسبی بالاتر افزایش داده است، که احتمالاً دلیل آن وجود جریانات ثانویه و کنشی است که در مرز دو کانال به وجود می آید. این روند در مطالعه Sellin et al. (1993) نیز باز نمایان است. دلیل اختلاف موجود با مطالعه مورد مقایسه شرایط آزمایشی هر کدام از تحقیقات و همچنین مطابق گفته Chow, (1959)، مقدار n بسیار متغیر است و به تعدادی از عوامل از قبیل زبری سطح، پوشش گیاهی، تراز کانال و بی نظمی کانال بستگی دارد.

$$F = f(R_e, F_r, D_r, \frac{u}{U_{avg}}, \frac{y}{H}, \frac{L}{B}, s, \theta) \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه (۲) R_e و F_r به ترتیب عدد رینولدز، عدد فرود و عمق نسبی جریان می باشند. با استفاده از مقادیر سرعت متوسط در هر مقطع عدد رینولدز جریان محاسبه و بیشتر از ۲۰۰۰۰ به دست آمد. در همین حال، اعداد فرود از ۰/۲۰ تا ۰/۳۵ متغیر بود. بنابراین جریان های استفاده شده از نوع جریان های زیر بحرانی آشفته می باشند. همچنین به دلیل ثابت بودن شکل پیچانرود و شیب کانال پارامترهای مربوط به این اجزاء قابل چشم پوشی هستند.

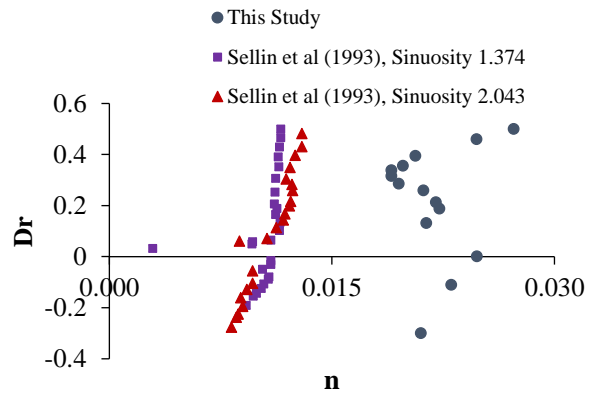
ضریب مانینگ (n)

ضریب مانینگ به طور معمول مقاومت جریان در کانال های روباز را نشان می دهد. محاسبه ضریب مانینگ برای کانال پیچانرود مرکب برای هر دبی از طریق معادله (۳) برای مقطع S_1 محاسبه شد. تغییرات این ضریب برای کانال در اعماق نسبی متفاوت و مقایسه آن با مطالعه ی Sellin et al. (1993) در شکل (۶) آورده شده است.

$$n = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{Q} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن R شعاع هیدرولیکی (m)، A سطح مقطع عبوری (m^2) ، S شیب کانال، Q دبی جریان (m^3/s) و n ضریب مانینگ می باشد. مطابق شکل (۶)، در کانال اصلی افزایش عمق جریان باعث افزایش ضریب زبری شده است. به طوری که در کانال اصلی ضریب مانینگ از ۰/۲۱ با افزایش عمق جریان به مقدار ۰/۲۵ می رسد. هنگامی که جریان در سیلابدشت جاری می شود ضریب n با یک روند کاهشی روبرو می شود که مقدار آن در عمق نسبی

دارای نوساناتی در راستای عمق جریان است. به خصوص زمانی که جریان در سیلابدشت وجود دارد، و مقدار سرعت جریان به صورت افزایشی و کاهشی در راستای عمق می‌باشد که نشان از سه‌بعدی بودن جریان را دارد و وجود گرداب‌ها کوچک و بزرگ احتمالاً در به وجود آمدن این تغییرات اثر داشته است. همچنین ملاحظه می‌شود که در تمامی مقاطع در عمق نسبی ۰/۳۵ نسبت به ۰/۵۵ سرعت‌ها با افزایش از کف مقادیر بیش‌تری دارند و تنها در نزدیکی فصل مشترک کانال اصلی و سیلابدشت سرعت در نسبت ۰/۳۵ برابر و حتی کمتر از ۰/۵۵ می‌باشد. این تغییرات به دلیل انتقال مومنتوم شدید بین کانال اصلی و سیلابدشت در این محدوده از عمق نسبی می‌باشد. همانطور که در آزمایش‌ها محسوس بود سرعت انتقال جریان در عمق نسبی کم‌تر، بیش‌تر و دارای تلاطم سطحی چشمگیرتری نسبت به عمق نسبی بالاتر را داشت. زمانی که جریان فقط در کانال اصلی برقرار بوده تغییرات سرعت در گستره بیش‌تری وجود دارد تا جایی که مقادیر منفی هم به خود گرفته است که به نظر به علت وجود جریان مارپیچی و نیرو گریز از مرکز و همچنین نبود جریان سیلابدشت می‌باشد. بیشتر بودن مقادیر u/U_{avg} در عمق نسبی صفر به دلیل سرعت متوسط کوچکتر در پرفیل برداشت شده در این عمق نسبی است.

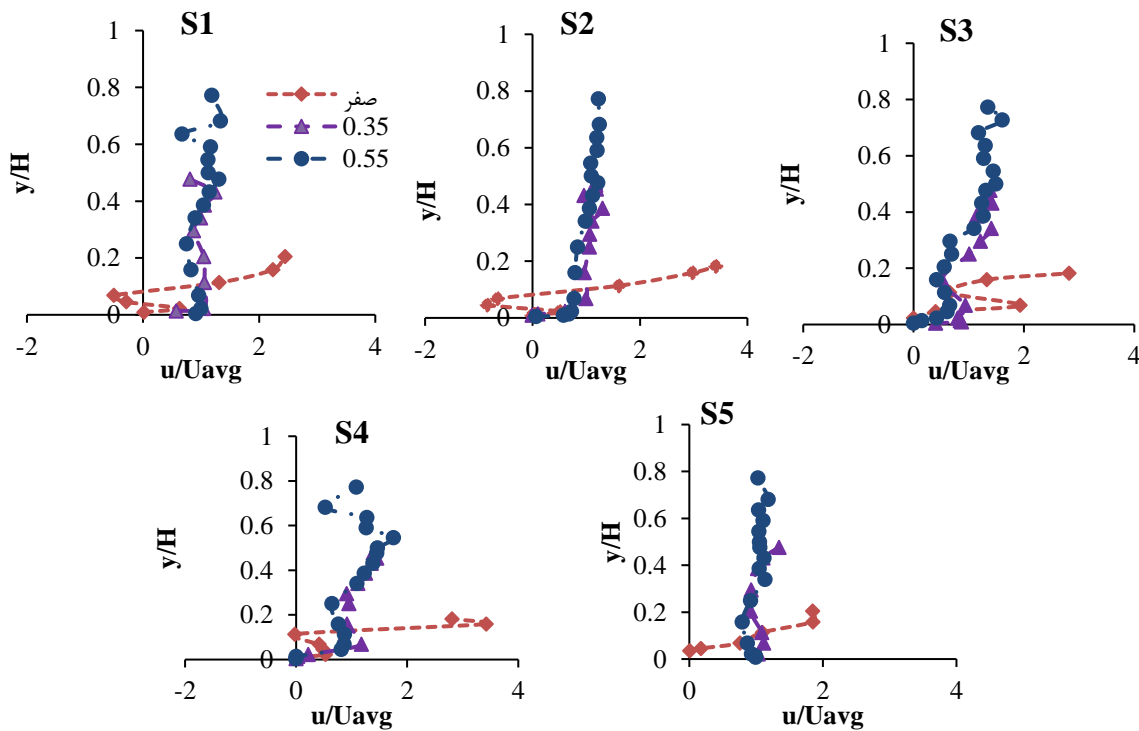


شکل ۶- مقایسه تغییرات ضریب مانینگ در مقابل نسبت‌های عمقی برای تحقیق حاضر و Sellin et al. (1993)

بررسی الگوی جریان

توزیع سرعت متوسط

در شکل (۷) پروفیل‌های سرعت جریان در جهت x در مرکز کانال اصلی (Main Channel) برای مقاطع مختلف در اعماق نسبی متفاوت آورده شده است. برای انجام مقایسه، محور قائم این اشکال نسبت عمق به عمق کلی جریان و محور افقی آن‌ها سرعت در هر نقطه به سرعت متوسط پروفیل می‌باشد. مطابق شکل (۷) پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف و برای اعماق نسبی متفاوت



شکل ۷- توزیع پروفیل‌های عمقی سرعت (u) در مرکز کانال اصلی در مقاطع مختلف

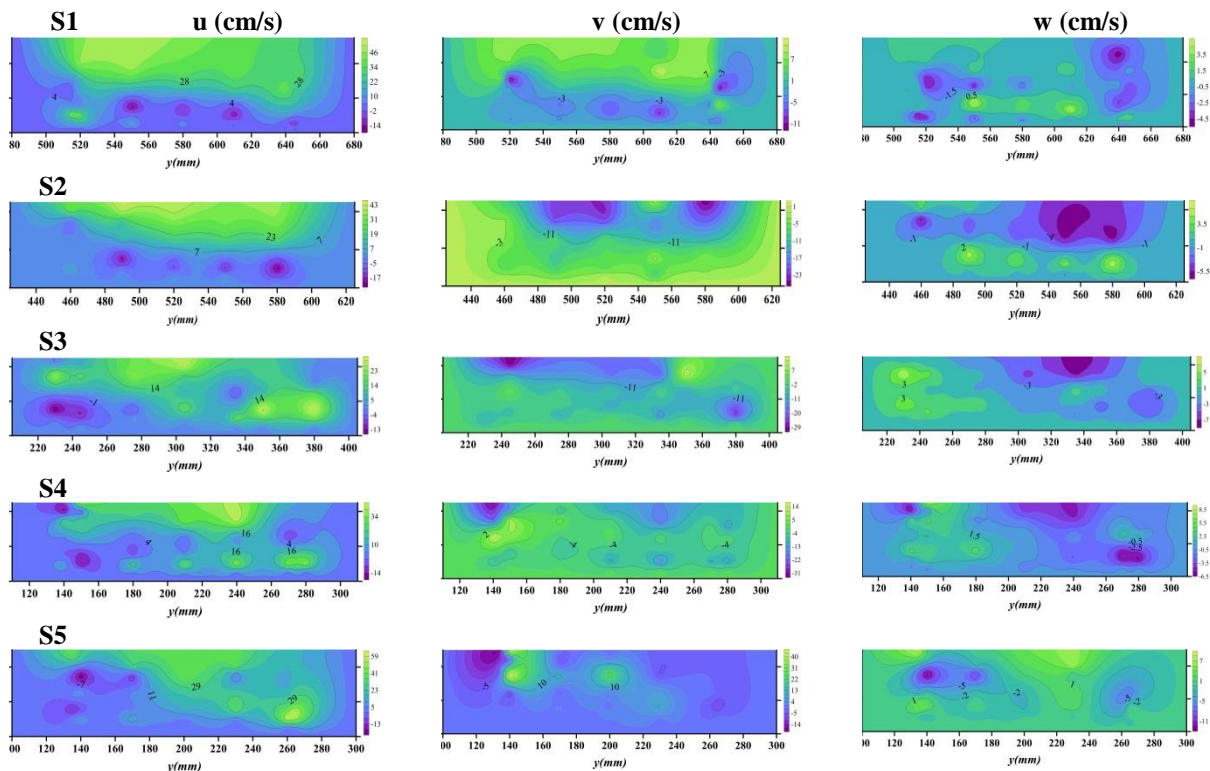
ذکر این نکته حائز اهمیت است که y فاصله از جدار شیشه‌ای کانال اصلی آزمایشگاه می‌باشد که از ساحل راست به سمت ساحل چپ افزایش می‌یابد. بنابراین بسته به موقعیت کانال اصلی مرکزی

کنتورهای سرعت

در شکل (۸) کنتورهای سرعت (u,v,w) زمانی که جریان فقط در کانال اصلی وجود دارد، برای مقاطع مختلف نشان داده شده است.

اصلی سرعت‌های ماکزیمم در جدار داخلی کانال است که در نهایت این نیرو موجب ایجاد جریان‌های ثانویه نیز می‌شود. در ادامه با توجه به قرار گرفتن نقاط حداکثر و حداقل مولفه‌های عرضی و قائم سرعت جریان با علامت‌های مخالف هم در کانال اصلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که در این مناطق جریان‌های ثانویه توسعه یافته‌اند. همچنین با توجه به علامت‌های منفی سرعت قائم در دیواره‌های داخلی که نشان از جریان رو به پایین است، و علامت سرعت‌های عرضی به سمت دیواره داخلی می‌توان تأکیدی بر وجود جریان با سرعت انتقال بیشتر در نواحی داخلی کانال باشد. نکته دیگر سرعت‌های نزدیک به صفر و حتی منفی در جداره و به خصوص کف کانال است که نشان از کاهش سرعت به هنگام نزدیک شدن به جداره و وجود جریان‌های گردابی کوچک در این نواحی می‌باشد. مقدار سرعت عرضی در بعضی از مقاطع دارای مقدار قابل توجهی می‌باشد که به علت قرارگیری شاخک‌های ADV به سمت پایین دست به صورت مستقیم است در صورتی که جریان به صورت پیچ و خم دار در حرکت می‌باشد که نشان از انتقال جریان در این بعد از مختصات می‌باشد.

کانال ۲۰ سانتی‌متری) این شماره عرضی تغییر می‌کند. همچنین در فایل ورودی به نرم‌افزار (Surfer) که برای رسم خطوط هم سرعت مورد استفاده قرار گرفت مختصات تعداد قابل توجهی نقطه روی دیواره‌های کانال وارد شد و سرعت متناظر با آن‌ها برابر صفر قرار داده شد. در این حالت نرم افزار درونیابی بهتری و مبتنی بر فیزیک مساله ارائه خواهد داد. مطابق شکل (۸) هسته ماکزیمم خطوط کنتور سرعت طولی در مقطع S1 به سمت دیواره چپ کانال اصلی متمایل است و دارای مقادیر سرعت طولی بیشتری نسبت به سمت راست کانال می‌باشد. این روند همچنین در مقطع S5 مشاهده می‌شود با این تفاوت که این بار هسته سرعت ماکزیمم به سمت دیواره راست کانال تمایل دارد. دلیل این انحرافات وجود نیروی گریز از مرکز در کانال اصلی پیچانورد می‌باشد. با این حال مقدار ماکزیمم سرعت طولی در دو مقطع S1 و S5 حدوداً به بیش از ۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه هم می‌رسد. همچنین با توجه به هسته سرعت ماکزیمم در سه مقطع (S2, S3 و S4) مشاهده می‌شود که جریان در سمت جدار داخلی دارای قدرت و سرعت بیشتر است. به علت وجود قوس‌ها متوالی در کانال‌های ماریچ به نظر می‌رسد نیروی گریز از مرکز، عامل



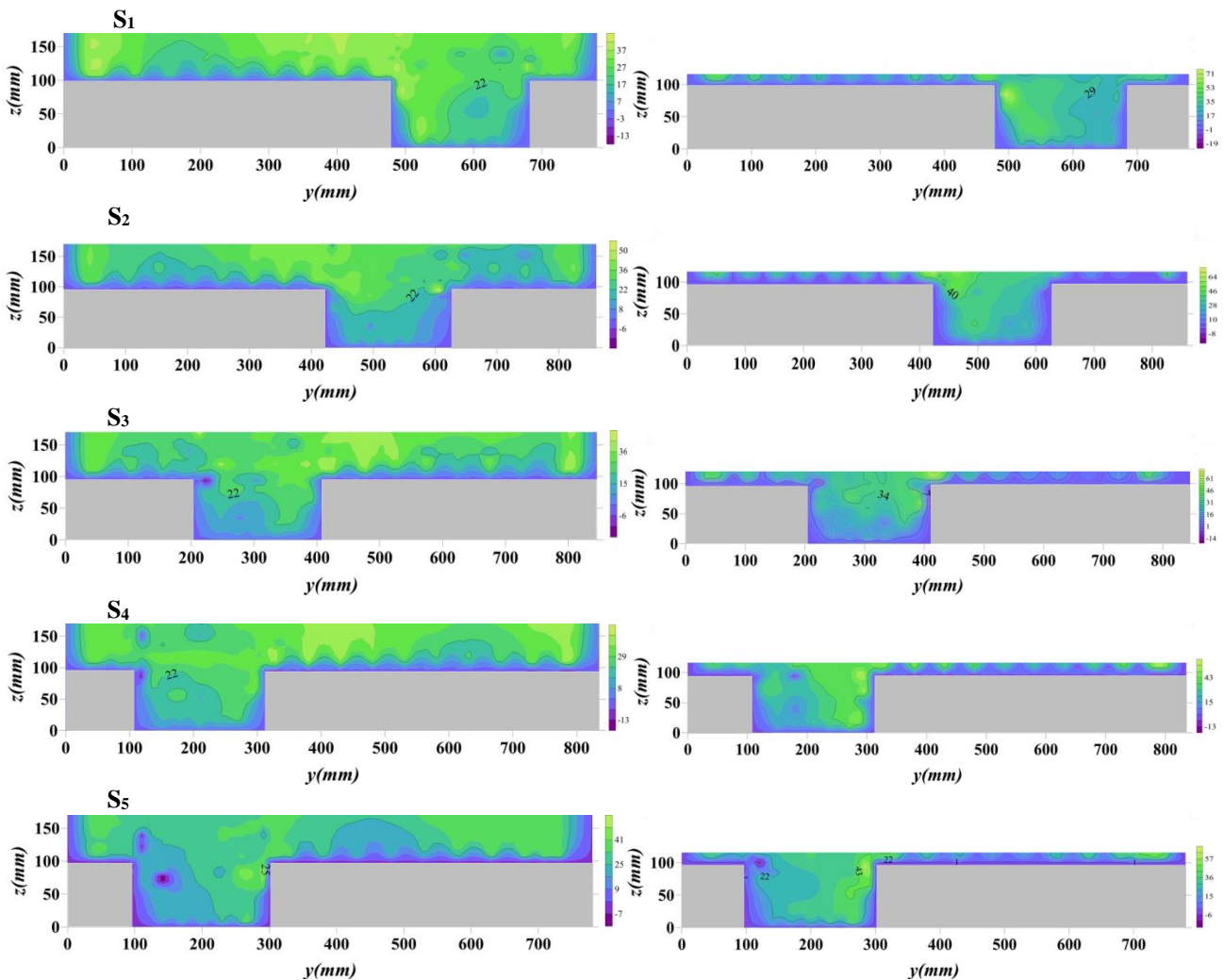
شکل ۸- کنتورهای سرعت (u,v,w (cm/s) در کانال اصلی برای مقاطع مختلف

جریان در مقاطع مختلف در دو حالت عمق نسبی با هم مشابه هستند. اما با توجه به مقادیر سرعت‌ها در دو عمق نسبی، شدت اندرکنش جریان در عمق نسبی ۰/۳۵ بین سیلابدشت و کانال اصلی بیشتر از حالت ۰/۵۵ می‌باشد. یادآور می‌شود که در

کنتورهای سرعت طولی u در اعماق نسبی ۰/۳۵ و ۰/۵۵ شکل (۹) کنتورهای سرعت طولی u در اعماق نسبی، ۰/۳۵ و ۰/۵۵ در مقاطع مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، الگوی

عدم وجود شکل پیچانرود در برابر مسیر جریان است. تغییرات سرعت به خصوص کاهش سرعت در نزدیکی مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت در هر دو عمق نسبی به طور مثال در مقطع S_5 کاملاً محسوس می‌باشد که به دلیل انتقال جریان با ممنوم کم که به وسیله جریان‌های ثانویه از لایه‌های پایینی می‌باشد که توسط Shiono and Knight (1991) نیز در کانال‌های مرکب بیان شده است. در عمق نسبی $0/55$ در بالای مقاطع اصلی هسته‌های افزایشی و کاهش‌ی سرعت طولی در مقاطع مختلف به‌ویژه در S_2 ، S_3 و S_4 نشان از برخورد و ورود جریان سیلابدشت بالادست به کانال اصلی می‌باشد و به‌علاوه خروج جریان از مقاطع اصلی و ورود به جریان سیلابدشت از طرف دیگر است.

آزمایش با عمق نسبی $0/35$ به دلیل ناتوانی دستگاه ADV در اندازه‌گیری سطح آب به میزان ۵ سانتی‌متر، اجزا سرعت در نزدیکی بستر قابل اندازه‌گیری بودند. بنابراین با توجه به شکل (۹) در نزدیکی بستر برای دو عمق نسبی تا حدودی جریان دو-بعدی مشاهده می‌گردد، در حالی که با افزایش عمق آب جریان در سیلابدشت و همچنین در کانال اصلی با توجه به قرارگیری خطوط هم‌سرعت حداکثری و حداقلی در کنار هم به صورت ۳- بعدی می‌باشد. هسته پرسرعت جریان در کانال پیچانرود به سمت دیواره‌های داخلی متمایل است و با افزایش عمق آب سرعت‌های حداکثری به سیلابدشت منتقل می‌شوند. نکته دیگر افزایش سرعت طولی بر روی سیلابدشت در دوطرف کانال و خارج از دامنه پیچانرودی است، که نشان از فرار جریان در این قسمت‌ها به علت



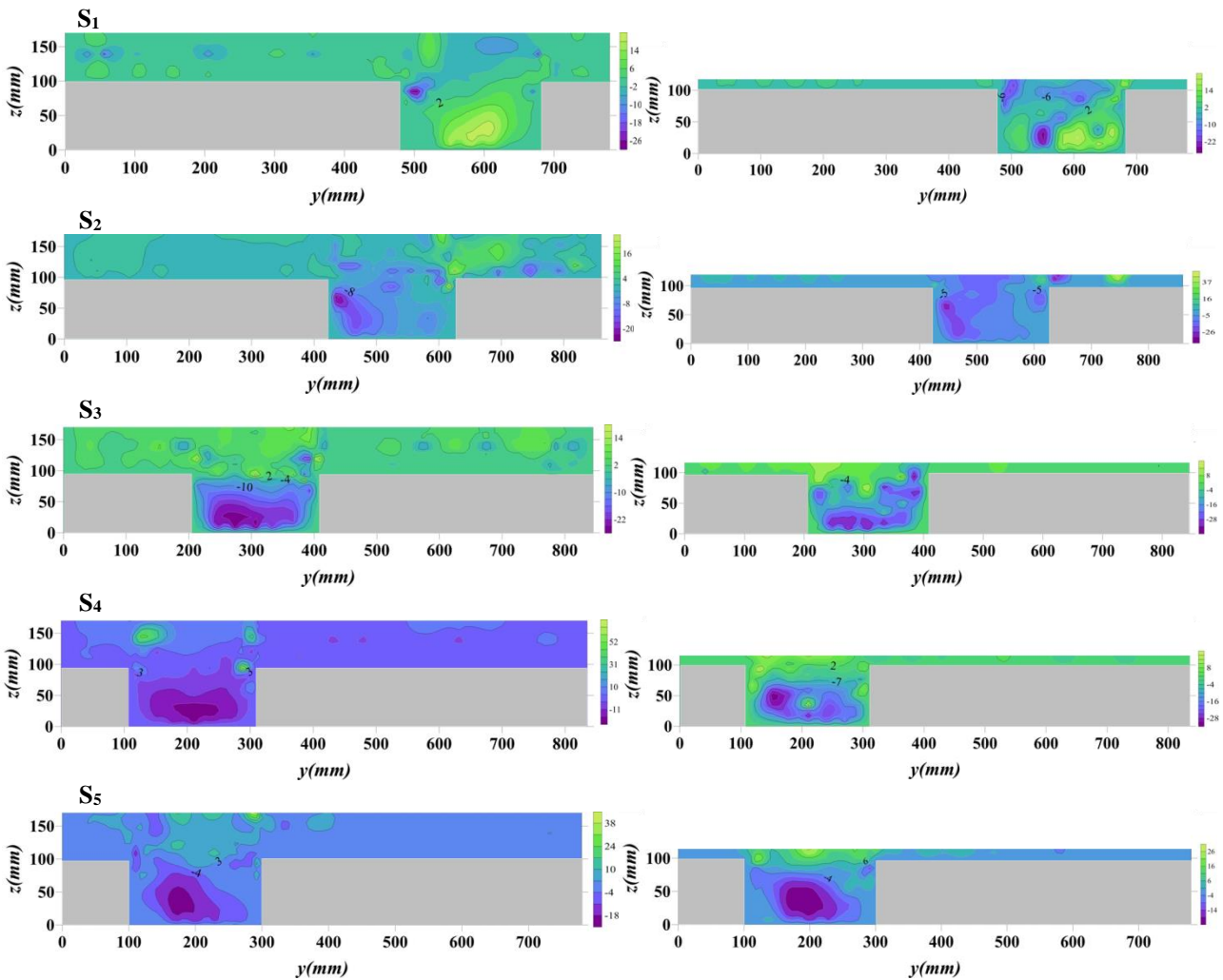
شکل ۹- کنتورهای سرعت طولی u (cm/s) در اعماق نسبی، راست $0/35$ و چپ $0/55$ در مقاطع مختلف

سرعت‌های مثبت نشان‌دهنده‌ی انتقال جریان به سمت دیواره مقرر کانال اصلی می‌باشد و همچنین نشان از گرداب‌های چرخشی در این منطقه از کانال (قسمت محدب) را دارد. در سایر

کنتورهای سرعت عرضی v در اعماق نسبی $0/35$ و $0/55$ شکل (۱۰) خطوط هم‌سرعت برای سرعت‌های عرضی را در مقاطع مختلف نشان می‌دهد. در مقطع S_1 و در کانال اصلی

در این مناطق می‌باشد. مطابق با تحقیقات قبلی با مقایسه الگوهای جریان به وجود آمده در دو عمق نسبی در این مطالعه مشخص می‌گردد اندازه سرعت‌های عرضی در حالت عمق ۰/۳۵ در برخی نواحی بیشتر از عمق نسبی ۰/۵۵ است که نشان از انحرافات شدیدتر جریان در این عمق نسبی جریان است.

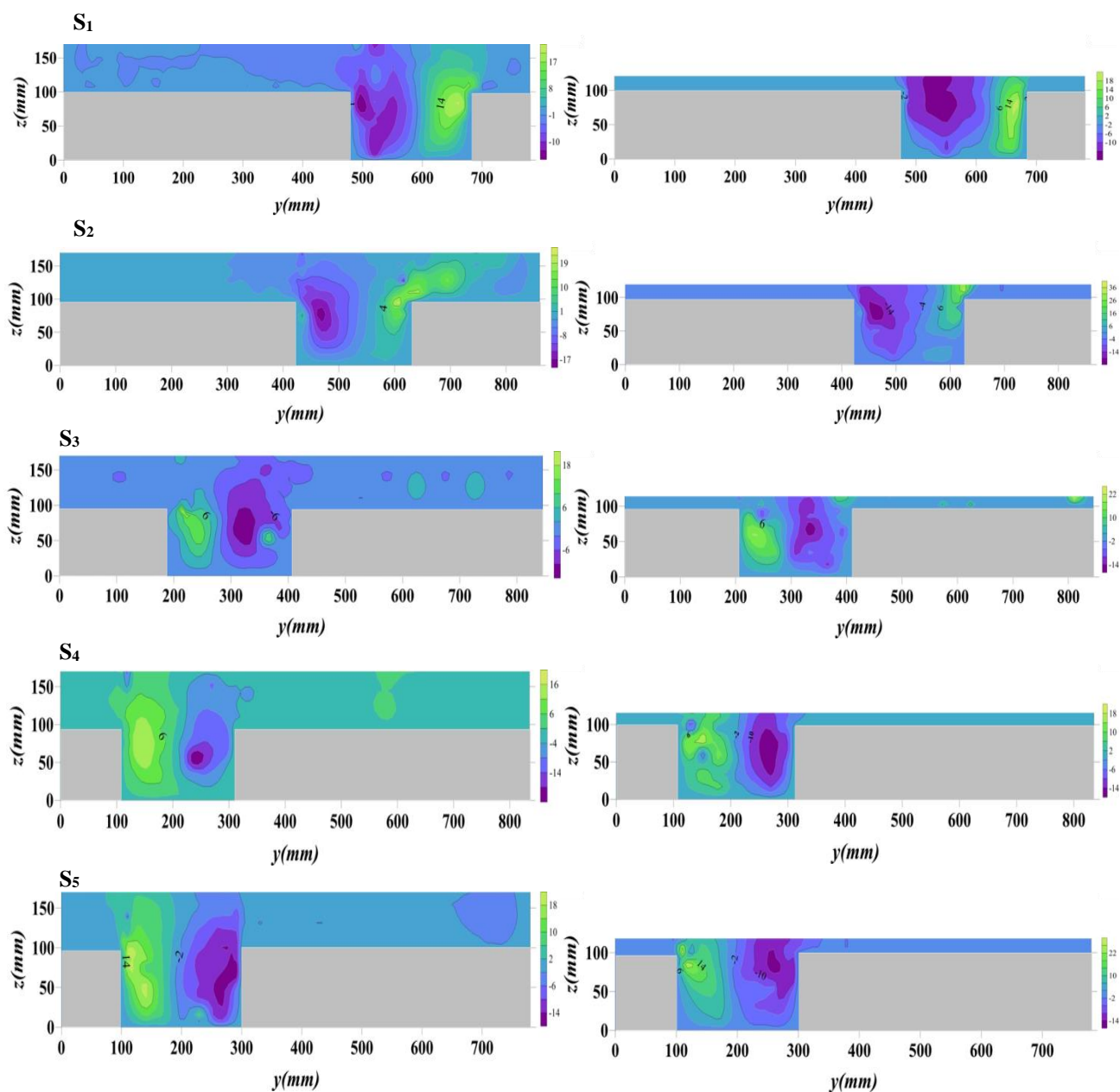
مقاطع، سرعت‌های عرضی منفی نشان از انحراف جریان به سمت دیواره داخلی کانال را دارد. در نزدیکی مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت گرادین‌های شدیدی از مولفه‌ی عرضی جریان مشاهده می‌شود که ناشی از جریان‌های ثانویه شدید در این نواحی است. همچنین تغییر علامت‌های موجود هم در کانال اصلی و هم در سیلابدشت حاکی بر وجود گرداب‌ها و جریانات ثانویه عرضی



شکل ۱۰- خطوط کنتور سرعت عرضی v (cm/s) در اعماق نسبی، راست ۰/۳۵ و چپ ۰/۵۵ در مقاطع مختلف

سرعت عمودی منفی جریان در مقاطع S_1 و S_2 از طرف سیلابدشت راست (سمت چپ شکل‌ها) نشان از ورود جریان به داخل کانال اصلی را دارد و سرعت‌های عمودی مثبت از طرف سیلابدشت چپ نشان از خروج جریان و حرکت روبه بالا جریان در آن سمت از کانال اصلی را دارد. اما در مقاطع S_3 ، S_4 و S_5 جریان ورودی و خروجی از سیلابدشت به کانال اصلی و برعکس جابجا شده و عکس اتفاق دو مقطع قبلی می‌شود.

کنتورهای سرعت قائم w در اعماق نسبی ۰/۳۵ و ۰/۵۵ کنتورهای سرعت قائم برای دو عمق نسبی ۰/۳۵ و ۰/۵۵ در شکل (۱۱) ارائه شده است. مطابق بحث‌هایی که در قسمت‌های قبل بیان شد، این بار هم روند خطوط کنتور قائم برای هر دو عمق نسبی مشابه ولی همراه با مقداری تفاوت در اندازه و شدت مقادیر این جزء از سرعت جریان می‌باشد. مطابق شکل (۱۱) قرارگیری نقاط حداکثر و حداقل مولفه‌ی قائم سرعت با علامت‌های مخالف یکدیگر در کانال اصلی و سیلابدشت بیان‌گر وجود جریان‌های ثانویه قوی در این منطقه است. آنچه که مشخص است وجود

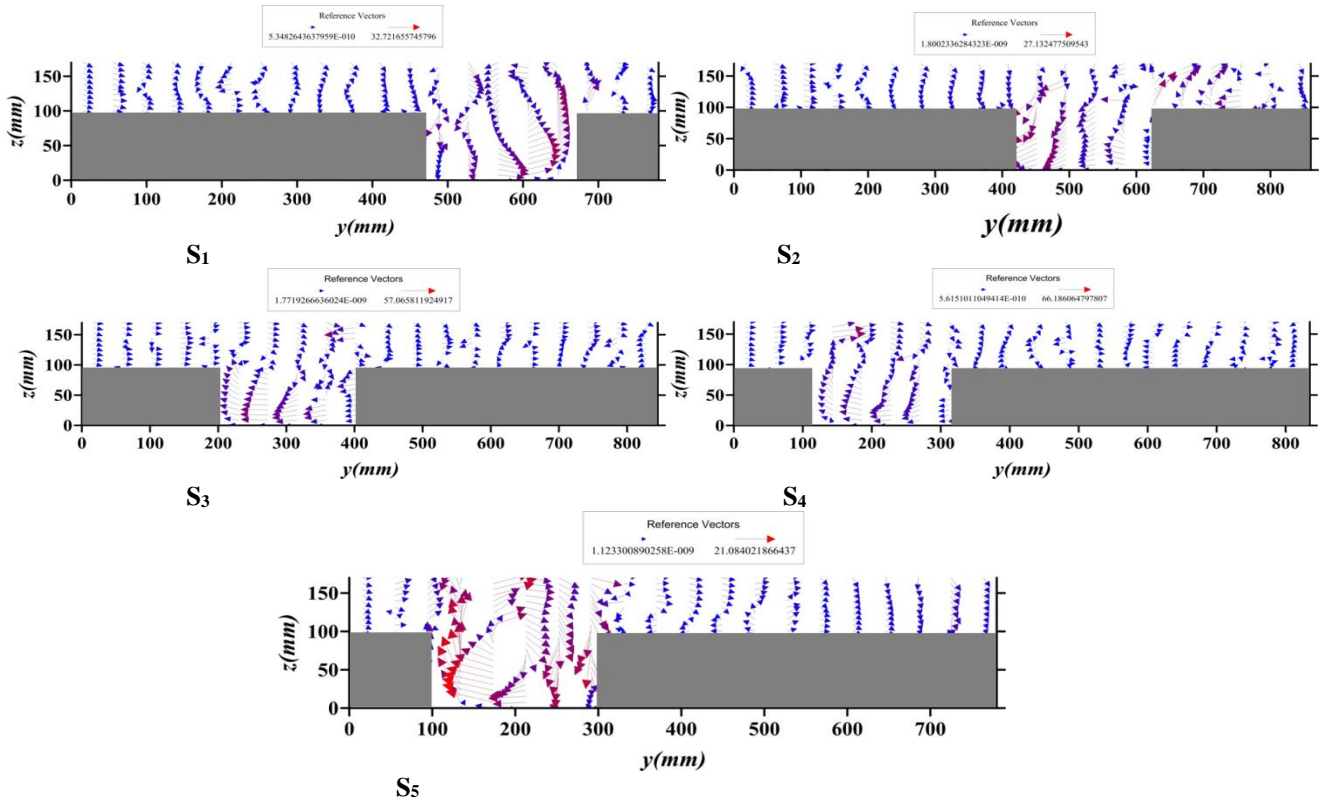


شکل ۱۱- خطوط کنتور سرعت قائم w (cm/s) در اعماق نسبی، راست ۰/۳۵ و چپ ۰/۵۵ در مقاطع مختلف

جریان‌های ثانویه

چپ (سیلابدشت سمت راست تصویر) یک گردابه ساعتگرد وجود دارد. به علاوه در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت تغییر در جهت و اندازه‌ی بردارهای جریان‌های ثانویه کاملاً قابل رویت است. این پدیده ناشی از ورود و خروج جریان از کانال اصلی به سیلابدشت (انتقال ممنوم) و عکسش می‌باشد. با توجه به شکل (۱۲) و مشاهدات آزمایشگاهی جریان در قسمت سیلابدشت بزرگ‌تر در تمامی مقاطع هر چه از کانال اصلی فاصله گرفته شود گرداب‌ها بزرگ‌تر و به عبارتی پخشیدگی در این نواحی از سیلابدشت بیش‌تر می‌شود.

شکل (۱۲) بردارهای جریان‌های ثانویه را در عمق نسبی ۰/۵۵ در مقاطع S_1 تا S_5 را نشان می‌دهد. در مقطع S_1 به‌عنوان مقطع اول، یک سلول چرخشی پادساعتگرد بزرگ در کانال اصلی سمت سیلابدشت چپ (سمت راست تصویر) وجود دارد. اما با توجه به سایر مقاطع سلول چرخشی غالب به صورت ساعتگرد در کانال اصلی در جریان است. همچنین از بردارهای جریانات ثانویه می‌توان دریافت که جریان در سیلابدشت‌ها نیز دارای گرداب‌های کوچک و بزرگ می‌باشد. به طور مثال در مقطع S_2 در سیلابدشت



شکل ۱۲- بردارهای جریانات ثانویه به ازای عمق نسبی ۰/۵۵ در مقاطع مختلف

می باشد.

- ۴ - در دو طرف و خارج از دامنه پیچانودی، سرعت جریان طولی افزایش می یابد که نشان از فرار جریان در این قسمت ها به علت عدم وجود شکل پیچانود در برابر مسیر جریان است.
- ۵ - روند خطوط کنتور سرعت عرضی و قائم برای هر دو عمق نسبی مشابه ولی در حالت عمق ۰/۳۵ در برخی نواحی اندازه این اجزاء سرعت بیشتر از عمق نسبی ۰/۵۵ است که نشان از انحرافات شدیدتر جریان در این عمق نسبی جریان است.
- ۶ - بردارهای جریانات ثانویه در عمق نسبی ۰/۵۵ نشان دادند که در تمامی مقاطع اصلی و در سیلابدشت ها جریان های ساعتگرد و پادساعتگرد وجود دارد. به طوری که در مقطع S₁ به عنوان مقطع اول جایی که کانال اصلی در راس قرار گرفته، یک سلول چرخشی پادساعتگرد بزرگ و در سایر مقاطع سلول چرخشی به صورت ساعتگرد در کانال اصلی در جریان است.

سپاس گذاری

از کارکنان آزمایشگاه هیدرولیک بخش مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد که در انجام آزمایش های این تحقیق همکاری کرده اند، صمیمانه قدردانی می شود.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی، ساختار جریان در یک کانال مرکب پیچانود بررسی شد. آزمایش های این تحقیق در سه حالت عمق نسبی صفر، ۰/۳۵ و ۰/۵۵ صورت گرفت. برای اندازه گیری نوسانات سرعت جریان لحظه ای از سرعت سنج صوتی داپلر استفاده گردید. به طور خلاصه می توان به نکات زیر از نتایج این مطالعه اشاره کرد:

- ۱ - در این تحقیق با استفاده از تحلیل سری زمانی (Stationary Analyze) حداقل زمان لازم برای اندازه گیری داده های سرعت جریان ۴۵ ثانیه به دست آمد و از این زمان به بعد روند تغییرات داده ها کم و یکسان شده است.
- ۲ - با افزایش عمق جریان در کانال اصلی ضریب زبری افزایش یافته و با ورود جریان به سیلابدشت ضریب زبری مانینگ با کاهش همراه است ولی در ادامه با افزایش عمق نسبی آب مقدار η افزایش می یابد که به نسبت ضریب مانینگ کانال اصلی مقادیر بالاتری را دارا می شود.
- ۳ - هسته پرسرعت جریان به علت وجود نیروی گریز از مرکز در کانال پیچانود به سمت دیواره های داخلی متمایل است و با افزایش عمق آب سرعت های حداکثری به سیلابدشت منتقل می شوند. با بررسی سرعت طولی شدت اندرکنش جریان در عمق نسبی ۰/۳۵ بین سیلابدشت و کانال اصلی بیش تر از حالت ۰/۵۵

REFERENCES

- Chow, V.T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Goring, D. G. and V. I. Nikora. (2002). Despiking acoustic doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1): 117-126.
- Hagerman, J. R., and Williams, J. D. (2000). Meander Shape and the Design of Stable Meanders. In *Proceedings American Water Resources Association, Specialty Conference, Anchorage, Alaska, April*
- Liu, C., Shan, Y., Liu, X., and Yang, K. (2015). Method for assessing discharge in meandering compound channels. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 169(1), 17-29.
- Liu, C., Shan, Y., Liu, X., Yang, K. and Liao, H. (2016). The effect of floodplain grass on the flow characteristics of meandering compound channels, *Journal of Hydrology*, 542, 1-17.
- Mohanty, P. K., Dash, S. S., and Khatua, K. K. (2012). Flow investigations in a wide meandering compound channel. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(6), 83-94.
- Mohanty, P.K., (2019). Flow and its distribution in wide meandering compound channels. *Journal of Hydrology*, 575, 115-130
- Nikubakht, E., Hamidifar, H., and Keshavarzi, A. (2018). Effect of Floodplain Non-submerged Vegetation on Bed Variation in Meandering Compound Rivers. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2), 461-470. (In Farsi).
- 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.
- Patra, K.C., Kar, S.K. and Bhattacharya, A.K., (2004). Flow and velocity distribution in meandering compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 398-411
- Prabir, K. M., Saine, S. D., and Khatua, K. K. (2012). Flow Investigations in a Wide Meandering Compound Channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1(6), 83-94
- Sellin, R. H. J., Ervine, D. A., and Willetts, B. B. (1993). Behaviour of meandering two-stage channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, 101(2), 99-111.
- Shiono, K. and Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of fluid mechanics*. 222, 617-646.
- 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
- Shiono, K., Spooner, J., Chan, T., Rameshwaran, P. and Chandler, J., (2008). Flow characteristics in meandering channels with non-mobile. *Journal of Hydraulic Research*, 46(1), 113-132
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K., and Nakagawa, H. (1989). Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *Journal of hydraulic research*, 27(1), 149-173.
- Wahl, T.L. (2000). Analyzing ADV data using WinADV, *ASCE Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, Minneapolis, Minnesota, USA, July 30-August 2.
- Wormleaton, P.R., Sellin, R.H.J., Bryant, T., Loveless, J.H., Hey, R.D. and Catmur, S.E., (2004). Flow structures in a two-stage channel with a mobile bed. *Journal of Hydraulic Research*. 42(2), 145-162
- Weiming, W. U., and Zhiguo, H. E. (2009). Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity. *International Journal of Sediment Research*. 24(3), 247-259.
- Xiao, Y., Wang, N., Liang, D., and Liu, J. (2018). Flow structures in trapezoidal compound channels with different side slopes of main channel. *International Journal of Civil Engineering*, 16(7), 823-835.
- Zahiri A, Amini R and Kordi H (2013). Numerical simulation of velocity lateral distribution in meandering compound channels. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(3), 201-218. (In Farsi).