

بررسی اثر شعاع انحنای کانال بر مشخصات هیدرولیکی جریان در سطوح شیب‌دار

چکیده

مسیرهای خم رودخانه از مناطق مهم در بررسی الگوی جریان به شمار می‌روند. جریان در خم‌های رودخانه تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار قرار دارد. با توجه به آنکه رودخانه‌ها دارای شیب‌های بستر مختلف بوده‌اند، بنابراین، مطالعه الگوی جریان سه‌بعدی در این گونه از مجاری اهمیت بالایی دارد. هدف این مقاله بررسی مؤلفه‌های سرعت سه‌بعدی جریان در خم‌های ملایم و تند ۹۰ درجه با بستری شیب‌دار بوده است. آزمایش‌ها در کانالی با نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض دو، چهار و شش انجام شده که اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از سرعت‌سنج Vectrino که از پیشرفته‌ترین انواع سرعت‌سنج‌هاست، صورت گرفته است. نتایج نشان داد که به دلیل وجود مؤلفه وزن سیال آب در راستای شیب بستر، حداکثر سرعت طولی جریان در بخش‌های ابتدایی خم برای خم‌های ملایم در نزدیکی دیواره خارجی رخ می‌دهد، درحالی‌که در بخش‌های انتهایی به نزدیکی میانه عرض کانال منتقل می‌شود. در همه اعداد فرود و در همه قوس‌ها نیم‌رخ عرضی سرعت به دولایه یکی نزدیک به دیواره خارجی قوس با میزان حداکثر سرعت و در لایه نزدیک به دیواره داخلی نیم‌رخ حداقل سرعت در فاصله ۲۵ درصدی عرض کانال قابل تفکیک می‌باشد همچنین مشاهده شد با افزایش دوبرابری عدد فرود از مقدار ۰/۰۵ به ۰/۱ موقعیت بیشینه تنش برشی از محدوده تا زاویه ۳۰ درجه، به محدوده تا زاویه ۵۰ درجه مقطع و در نزدیکی دیواره خارجی امتداد یافته است.

کلیدواژه‌ها

سرعت سه بعدی، الگوی جریان، سرعت‌سنج Vectrino، مطالعه آزمایشگاهی

Investigating the Effect of Channel Bend Radius on Flow Characteristics in Inclined Bed Channels

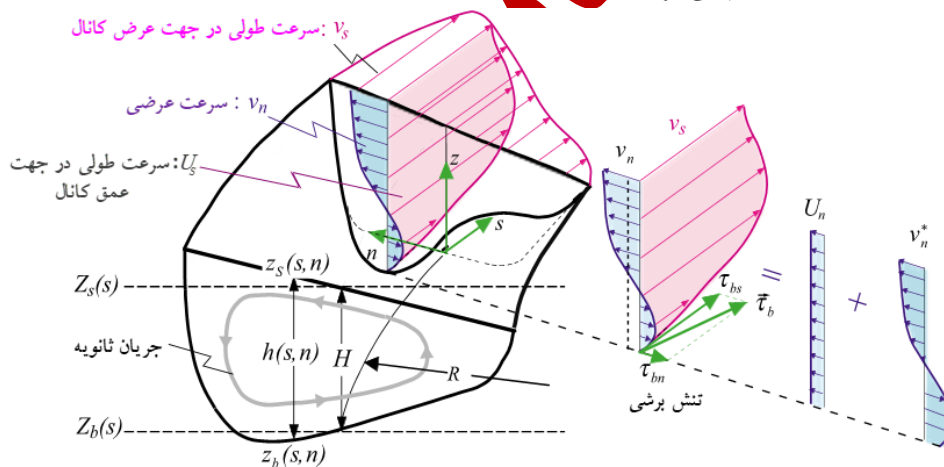
ABSTRACT

Meanders in rivers are critical areas for studying flow patterns. Flow within river bends is influenced by centrifugal forces and pressure gradients. Given that rivers exhibit various bed slopes, studying the three-dimensional flow pattern in such channels is of significant importance. The objective of this study was to investigate the three-dimensional velocity components of flow in gentle and sharp 90-degree bends with sloped beds. Experiments were conducted in a channel with central curvature radius-to-width ratios of two, four, and six. Velocity measurements were performed using the Vectrino velocity meter, one of the most advanced instruments for measuring flow velocity. The results indicated that due to the effect of the water's weight component along the bed slope, the maximum longitudinal flow velocity in the initial sections of the bend for gentle bends occurs near the outer wall. However, in the later sections, it shifts closer to the middle of the channel width. Across all Froude numbers and all bends, the transverse velocity profile could be divided into two layers: one near the outer wall of the bend with maximum velocity and another near the inner wall of the bend with minimum velocity, located at 25% of the channel width. It was also observed that by doubling the Froude number from 0.05 to 0.1, the location of maximum shear stress extended from the range of up to 30 degrees to the range of up to 50 degrees of the bend section, and was concentrated near the outer wall.

Keywords: Three-dimensional velocity, flow pattern, Vectrino velocity meter, experimental study

مقدمه

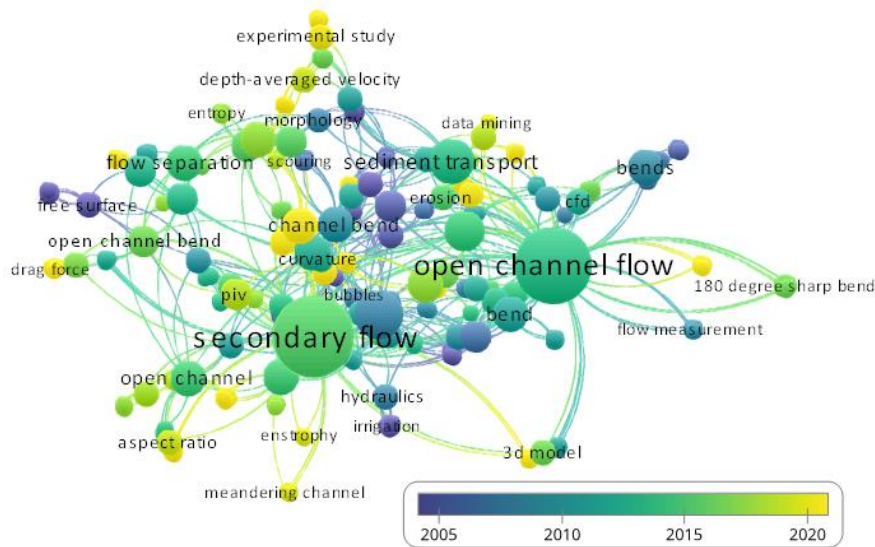
مسیرهای دارای قوس از جمله مقاطع کانال انتقال آب بوده که در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی اجتناب‌ناپذیر هستند. علاوه بر این، خم‌ها به‌صورت طبیعی در رودخانه‌ها وجود دارند و مکان مناسبی برای آبیاری در شبکه‌های آبیاری و زهکشی هستند. با توجه به وجود مشکل فرسایش و رسوبگذاری شدید در مسیرهای دارای قوس کانال‌های انتقال آب و خم رودخانه‌ها، از اینرو مطالعه هیدرولیکی جریان در محدوده این مسیرها کمک می‌کند تا الگوی جریان در قوس‌ها بادقت بیشتری طراحی و یا سازه‌های کنترل فرسایش اقتصادی طراحی گردد. در طبیعت از لحاظ هندسی، رودخانه دارای خطوط کناری مستقیم‌الخط به شکل بازه طولانی به‌ندرت یافت می‌شود (Gleason, 2015). ویژگی‌های جریان و توپوگرافی بستر در محل خم رودخانه‌ها به‌قدری پیچیده است که شناخت کامل آن تا به حال به‌طور کامل میسر نشده است (Safarzadeh & Salehi Neyshabouri, 2005). در شکل ۱ به‌صورت شماتیک الگوی جریان در محل خم‌ها نشان داده شده است. متغیرهای $R, H, Z_b, Z_s, U_s, v_n, v_s$ به ترتیب شعاع خم، عمق آب، تراز بستر، تراز سطح آب، سرعت طولی جریان در جهت عمق کانال، سرعت عرضی جریان، سرعت عرضی در جهت عرض کانال و برآیند تنش برشی در بستر می‌باشند. هنگام ورود جریان به انحای رودخانه و تأثیر نیروی گریز از مرکز، موجب می‌شود تا در هر مقطع عرضی سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار گیرد. اختلاف بار آبی باعث پیدایش جریان عرضی (v_n) می‌شود که با تداخل آن با نیروی گریز از مرکز و در نظر گرفتن تغییرات توزیع قائم سرعت جریان عرضی در لایه‌های بالائی آب نمی‌تواند با نیروی گریز از مرکز مقابله و این لایه‌ها از قوس داخلی به سمت قوس خارجی حرکت می‌کنند (Sharma et al., 2023). جهت حرکت در لایه‌های پایینی آب به دلیل کوچک بودن نیروی گریز از مرکز به سمت قوس داخلی است. در اثر اندرکنش بین جریان‌های ثانویه و عدم یکساختی بیمرخ سرعت غیریکساخت در عمق، الگوی جریانی به نام جریان حلزونی تشکیل می‌شود که وجود این جریان، باعث ایجاد آشفتگی شدید جریان می‌شود. در اثر این پدیده الگوی بیمرخ سرعت در جهت عرضی دچار تغییر زیادی نسبت به حالت مستقیم می‌شود (Lin et al., 2024).



شکل ۱. شماتیک الگوی جریان در مقطع یک خم (Lin et al., 2024)

جریان ثانویه، تأثیر زیادی بر ریخت‌شناسی خم‌های آب‌رفتی در رودخانه دارد؛ به‌طوری‌که سرعت بالای جریان در قوس بیرونی خم باعث حمله شدید به بستر رودخانه و کناره و در نتیجه تخریب آن می‌شود (Pradhan et al., 2024; You et al., 2023). برای بهبود درک بیشتر از جریان در خم‌های رودخانه، تا کنون تحقیقات فراوانی اعم از اندازه‌گیری‌های میدانی (Blanckaert, 2019; Akbari & Vaghefi, 2017; Wang et al., 2019; Liu et al., 2024; Deng et al., 2021; 2011; مطالعات آزمایشگاهی (Mehraein et al., 2014; Safaripour et al., 2024; Lazzarin & Viero, 2023; Li et al., 2023; Smirnov et al., 2020) مورد بررسی قرار گرفته شده است. جهت بررسی دقیق‌تر، در شکل ۲ واژگان کلیدی پرکاربرد توسط محققین پیشین در حوزه مطالعاتی جریان در مسیر خم‌ها در پایگاه استنادی اسکوپوس مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که مشاهده می‌شود

مطالعات پیرامون بررسی جریان ثانویه در کانال‌های رویاز با مسیرهای قوسی شکل، همواره مورد توجه محققین با استفاده از ابزارها و روش‌های آزمایشگاهی، عددی و محاسبات نرم بوده است.



شکل ۲. واژگان کلیدی در پیشینه پژوهش گزارش شده پیرامون الگوی جریان در قوس‌ها

Salajgheh et al (2005) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در یک خم ۹۰ درجه پرداختند. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیل شکل، با انحنای نسبی (R/B) برابر سه انجام شد، که R شعاع قوس و B عرض کانال می باشد. آنان به این نتیجه رسیدند که بیشترین تغییرات متوسط سرعت در راستای عمق جریان و حداکثر شیب عرضی سطح آب در زاویه ۱۸۰ درجه قوس و حداقل آن در زاویه ۳۰ و ۱۰۰ درجه قوس به وقوع می‌پیوندد. همچنین بررسی نهم‌رخ‌های متوسط سرعت در راستای عمق جریان در هر سه بعد نشان می‌دهد که حداکثر سرعت آب در عمق ۷/۷ سانتی‌متر از سمت و حداقل آن در عمق ۵/۷ سانتی‌متر از سطح آب است. Abad et al (2009) به مطالعه الگوی جریان متوسط و آشفته در کانال بیجانروی کیونوشیتا با بستر صلب پرداختند و مؤلفه‌هایی همچون تنش رینولدزی و انرژی جنبشی آشفتگی را در مقاطع عرضی این کانال محاسبه نمودند. در این مطالعه آزمایش‌ها نشان داد که با رسیدن به راس قوس، هسته سرعت بیشینه جریان به سمت دیواره داخلی کانال متغییر می‌شود. (Blanckaert (2010) & De Vriend به بررسی مشخصات جریان آشفته در یک کانال قوسی با زاویه مرکزی ۱۲۰ درجه پرداختند. آنها برای برداشت داده‌های سرعت جریان از سرعت‌سنج ADVP استفاده کردند و مؤلفه‌های انرژی جنبشی و تنش برشی را محاسبه نمودند.

در مطالعه‌ای بیان شد جریان ثانویه قوی در خم ۹۰ درجه با انحنای نسبی ($\frac{R}{B} = 3$) تشکیل می‌شود. داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که جریان ثانویه باعث انتقال تکانه جانبی به سمت دیواره خارجی می‌شود و توزیع سرعت لگاریتمی را در مؤلفه سرعت طولی تا حدی مختل می‌کند. همچنین محل حداکثر سرعت ورودی تا مقطع زاویه ۳۰ درجه نزدیک به دیواره داخلی کانال بوده و سپس در پایین دست آن این سرعت بیشینه به سمت دیواره خارجی کانال حرکت می‌کند (Abhari et al., 2010). (Blanckaert (2011) به معرفی جریان‌های ثانویه پرداخت و این جریان‌ها را به دو دسته کلی تقسیم بندی نمود. دسته اول جریان‌های ثانویه ناشی از فشار (جریان ثانویه نوع اول) که جریان‌های موجود در مسیرهای قوسی می‌باشد که سبب توزیع سرعت‌های متفاوت در مقاطع عرضی مختلف می‌شود. دسته دوم جریان‌های ثانویه ناشی از آشفتگی (جریان ثانویه نوع دوم) هستند که این نوع جریان‌ها به دلیل عدم تقارن تنش‌های برشی آشفتگی در مسیرهای مستقیم رخ می‌دهد (به عنوان مثال در مقاطع غیر دایروی). در

¹ Kinoshita meandering channel

² Reynolds stress

³ Kinetic energy of turbulence

⁴ Acoustic Doppler Velocity Profiler

رودخانه‌های با مسیر مستقیم، ذرات کوچک شناور در سطح آب تمایل دارند که به سمت قسمت مرکزی مقطع بروند که این پدیده دلیلی بر وجود جریان‌های عرضی می‌باشد.

Elyasi et al. (2014) به بررسی عددی اثر شعاع نسبی بر الگوی جریان، در قوس ۹۰ درجه با چهار نسبت شعاع به عرض دو تا پنج، با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که به سمت انتهای قوس، برای حالت نسبت شعاع به عرض برابر دو، سرعت بیشینه در مقطع همچنان در نواحی نزدیک دیواره داخلی اتفاق افتاده، اما برای سایر نسبت‌های شعاع به عرض محل وقوع سرعت بیشینه به نواحی نزدیک دیواره خارجی منتقل می‌شود. (Vaghefi et al. (2015) مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان و همچنین نحوه توزیع انرژی جنبشی و حاصل ضرب نوسانات سرعت در طول قوس ۱۸۰ درجه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که سرعت طولی جریان در نزدیکی سطح آب نسبت به نزدیکی بستر کانال ۶۰ درصد افزایش یافته است. این مطالعه نشان داد شدت جریان ثانویه در راس قوس یعنی مقاطع ۸۰ تا ۱۰۰ درجه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. (Chooiplou & Vaghefi (2019) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، تنش برشی بستر را با استفاده از روش عمق متوسط، در قوس ۱۸۰ درجه با انحنای نسبی $\frac{R}{B} = 2$ ، مورد بررسی قرار دادند. آنان برای اندازه‌گیری سرعت جریان، از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی ADV^۱ استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها، بیانگر افزایش تنش برشی بستر در ورودی قوس و در نزدیکی دیواره داخلی کانال تا مقطع عرضی ۴۰ درجه می‌باشد. همچنین نتایج آنان نشان می‌دهد در یک قوس با انحنای شدید، آشفتگی نقش مهمی در جریان ایفا می‌کند. (Shaheed et al. (2021) در مطالعه‌ای بیان کردند شرایط مرزی در مدل سازی عددی الگوی جریان در قوس‌ها نقش مهمی در توزیع سرعت در مقطع عرضی دارند. انتخاب شرایط مرزی صحیح و مناسب می‌تواند به شبیه‌سازی دقیق‌تر و نتایج بهتر منجر شود. بر اساس یافته‌های آنان، مشاهده می‌شود که اکثر مدل‌های آشفتگی نظیر RANS^۲ و LES^۳ در شبیه‌سازی جریان ثانویه در قوس‌ها با بعضی تفاوت‌ها در دقت، عملکرد خوبی داشته‌اند. همچنین توزیع سرعت به طور قابل توجهی تحت تأثیر شعاع انحنای قرار دارد. بیشینه سرعت در قوس‌های با انحنای شدید در ابتدای قوس نزدیک به ساحل داخلی رخ می‌دهد و سپس به تدریج به سمت ساحل خارجی حرکت می‌کند. حداکثر سرعت جریان‌های ثانویه در زیر سطح آزاد رخ می‌دهد. همچنین سرعت جریان‌های ثانویه با افزایش شعاع انحنای کاهش می‌یابد. (Hu & Yu (2023) با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه بعدی به بررسی توزیع تنش برشی بستر در یک کانال با قوس ۱۸۰ درجه پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که حداکثر تنش برشی بستر در ناحیه ساحل داخلی از مقاطع ۵۰ تا ۱۱۰ درجه ظاهر می‌شود. همچنین بیشترین سهم در تولید جریان گردابی توسط شیب عرضی سطح آب و در نتیجه افزایش گرادیان فشار ایفا می‌شود. (Farag Boghdady et al (2023) با بررسی و آزمایش‌های میدانی بر روی ۲۰ قوس اصلی در رودخانه نیل^۴ (شاخه دامیتا) با ارائه رابطه رگرسیونی با ضریب تعیین^۵ ($R^2=0.71$) دریافتند که عمق آبستگی در ساحل خارجی این قوس‌ها به مؤلفه‌های شعاع قوس، عرض رودخانه، عمق آب بالادست، سرعت طولی و عرضی جریان رودخانه بستگی دارد. You, Tao, et al., (2023) از تکنیک تصویربرداری ذرات، با وضوح زمانی و شبیه‌سازی‌های عددی، برای مطالعه ویژگی‌های جریان در کانال‌های U-شکل، با هندسه‌های مختلف در بخش خم استفاده نمودند. نتایج آنان نشان می‌دهد که هندسه خم به طور قابل توجهی بر ساختار میدان جریان تأثیر می‌گذارد؛ همچنین کانال‌های مربعی، گردابه‌های بزرگ‌تر و تنش برشی رینولدز بیشتری نسبت به کانال‌های دایره‌ای ایجاد می‌کنند. عدد چرخش نیز به دلیل نیروهای کوریولیس^۶ ناشی از انحراف حرکت ذرات سیال، هنگامی که در یک محور مختصات چرخش قرار دارد) بر اندازه ساختارهای گردابی و الگوهای جریان ثانویه تأثیر می‌گذارد.

¹ acoustic doppler velocimeter

² Reynolds averaged NavieStokes

³ large eddy simulation

⁴ Nile river

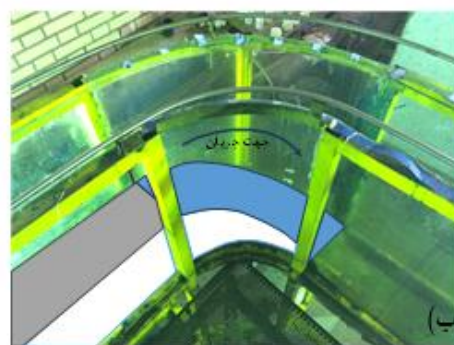
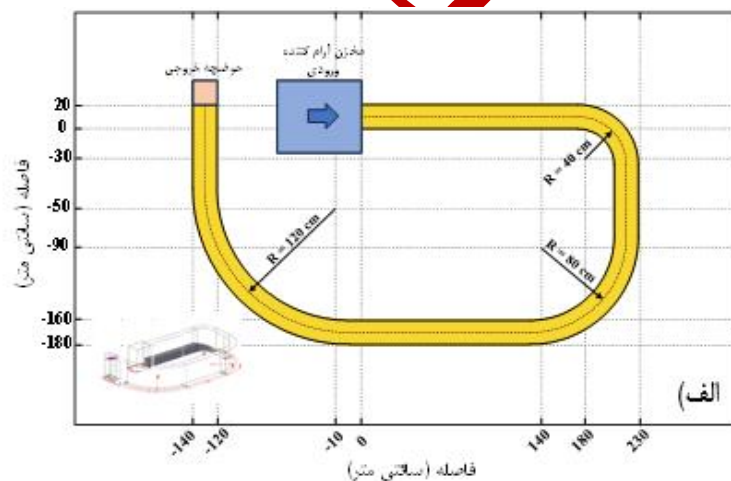
⁵ Coefficient of determination

⁶ Coriolis Forces

بر اساس اطلاعات به دست آمده، تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه در کانال‌های شیب‌دار انجام نشده است. بر اساس پیشنهاد‌های ارائه شده (Elyasi et al., 2014)، در صورتی که نسبت شعاع به عرض بیشتر از ۳ باشد، قوس ملایم و در حالتی که نسبت شعاع به عرض کمتر از ۳ باشد، قوس تند نامیده می‌شود. بنابراین در مطالعه آزمایشگاهی حاضر اثر سطح شیب‌دار بر الگوی جریان در قوس‌های تند تا ملایم مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال با مقطع مستطیلی شکل مطابق با شکل ۳، با عرض ۲۰ سانتی‌متر، ارتفاع کانال ۷۰ سانتی‌متر و طول ۸ متر، با سه خم با نسبت شعاع انحنای خط مرکزی به عرض کانال $(\frac{R}{B})$ ، به ترتیب برابر ۲، ۴ و ۶ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. شیب بستر کانال در مسیر خم برای هر سه قوس برابر $0.33/0$ در نظر گرفته شد. پس از اندازه‌گیری دبی ورودی به کانال توسط دبی‌سنج الکترومغناطیس^۱، از سه سری صفحه‌های مشبک جهت آرام نمودن جریان ورودی به کانال در مسیر مستقیم پیش از ابتدای قوس استفاده گردید. برای جلوگیری از ایجاد زبری در بستر، صفحه‌ای چوبی و صیقل داده شده بر روی آن قرار گرفت. پس از اتمام آزمایش‌ها بر روی یک قوس، مصالح بستر برداشته شده و بر روی قوس دیگر، مشابه همین عملیات، جهت شیب‌دار نمودن آن انجام شد. شکل ۳ ب و ج نمونه‌های از مسیر شیب‌دار بستر جریان در قوس با نسبت شعاع به عرض ۲ و ۴ را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در دو دبی ۱، $1/5$ لیتر بر ثانیه و با ثابت نگه داشتن تراز سطح آب بوسیله سرریز با عمق ۱۰ سانتی‌متر در بالادست در ابتدای ورودی به قوس، به ترتیب با اعداد فرود^۲ $0.05/0$ و $0.1/0$ و اعداد رینولدز، 13306 و 19960 انجام شد.



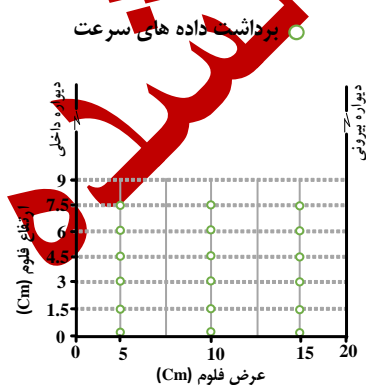
¹ Electromagnetic flowmeter

² froude number

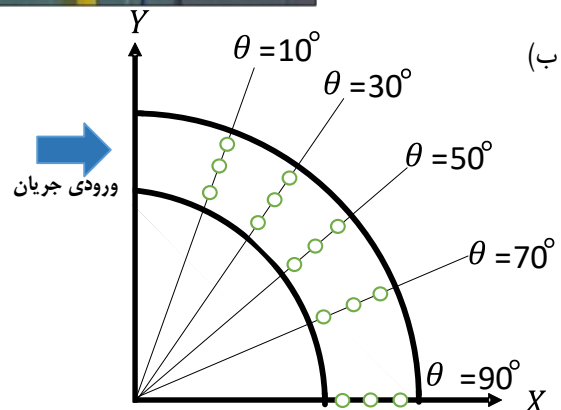
شکل ۳. الف) شماتیک ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی، ب) مسیر شیب‌دار جریان در قوس با نسبت شعاع به عرض $\frac{R}{B} = 2$ و ج) $\frac{R}{B} = 4$

به منظور اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت و تعیین الگوی سه بعدی جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی ADV مدل Vectrino+ مطابق شکل ۴ الف استفاده شده است. عملکرد دستگاه بر اساس ارسال یک موج صوتی با بسامد مشخص (s^{-1}) ۲۰۰ و دریافت بازتاب آن از جریان و تشخیص سرعت جریان از میزان تغییر در بسامد اولیه می‌باشد (Koch & Chanson, 2005). در واقع این سرعت‌سنج از یک قسمت ارسال صدا و از چهار دریافت‌کننده آن استفاده می‌کند. صدا از طریق قسمت مرکزی ردیاب فرستاده شده و توسط چهار شاخک (Beam) دریافت می‌شود (Salehi & Strom, 2011). با توجه به میزان تغییر در بسامد موج ارسالی، این دستگاه سرعت ذره سیال را محاسبه می‌کند. محدوده سرعت در این دستگاه از ± 0.1 تا ± 2 متر بر ثانیه توسط کاربر قابل تنظیم بوده و دقت آن $\pm 0.5\%$ درصد بوده است (Nortek, 2001).

در شکل ۴ ب نقاط برداشت داده‌های آزمایشگاهی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در یک شعاع نسبی در پلان عرضی کانال نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در ۵ مقطع بین زاویه ۱۰ تا ۹۰ درجه برای هر قوس با شعاع انحنای نسبی مختلف و همچنین در هر مقطع عرضی در ۱۸ نقطه مختلف داده‌برداری سرعت انجام شد. در شکل ۴ همچنین نمایی از شبکه‌بندی کانال برای تعیین موقعیت نقاط برداشت شده در طول قوس، عرض و عمق آن نشان داده شده است.



(ج)



شکل ۴. الف) دستگاه سرعت‌سنج ADV، نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت ب) در پلان و ج) مقطع عرضی

با توجه به اینکه مختصات نقاط و سرعت‌های برداشت شده در حین آزمایش‌ها، بر اساس سیستم مختصات قطبی بوده که به صورت مؤلفه‌های شعاعی، مماسی و قائم هستند، به منظور ترسیم داده‌ها در نرم‌افزار متلب¹ نیاز است که مؤلفه‌های موقعیت و سرعت داده‌های مذکور از مختصات قطبی به مختصات کارتزین تبدیل شوند. با استفاده از روابط زیر می‌توان این تبدیل مختصات را انجام داد. با استفاده از روابط ۱ تا ۳ مؤلفه‌های سرعت جریان و مختصات نقاط تبدیل می‌شوند (Sozpor et al., 2015):

$$u = u_{\theta} \cos \theta + u_r \sin \theta \quad \text{رابطه ۱}$$

$$v = u_{\theta} \sin \theta - u_r \cos \theta \quad \text{رابطه ۲}$$

$$r = r' + \Delta r, \quad x = r \sin \theta, \quad y = r \cos \theta \quad \text{رابطه ۳}$$

در روابط ۱ تا ۳، Δr ، فاصله نقطه اندازه‌گیری از دیواره داخلی (سانتی‌متر)، u_r و u_{θ} سرعت‌های دوبعدی در مختصات قطبی (سانتی‌متر بر ثانیه)، u و v ، سرعت‌های دوبعدی در مختصات دکارتی (سانتی‌متر بر ثانیه)، θ ، زاویه هر نقطه برداشت شده نسبت به محور افقی و r شعاع قوس داخلی (سانتی‌متر) است.

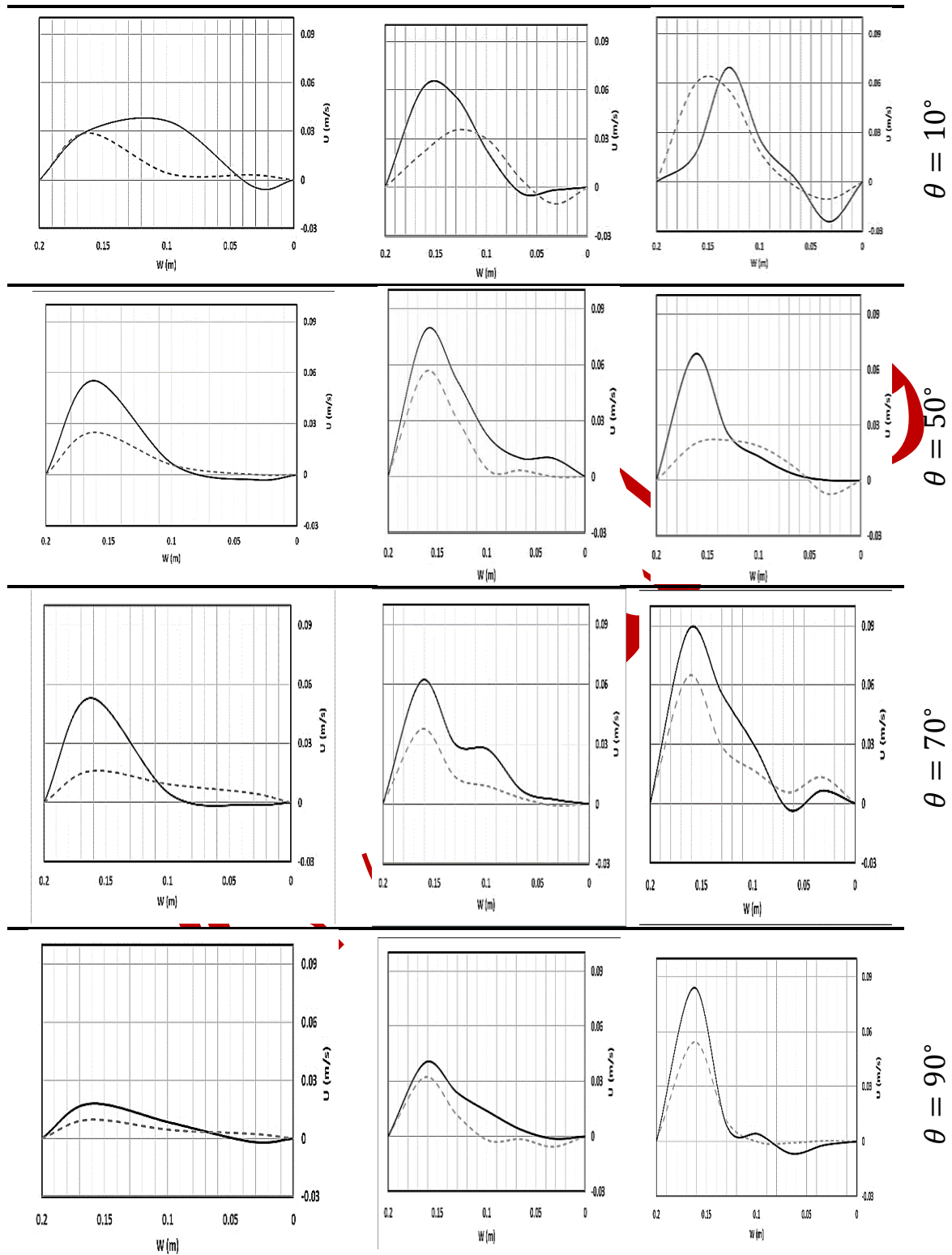
نتایج و بحث

بررسی الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس

همان‌گونه که اشاره شد بردار سرعت طولی (بردارهای عمود بر مقطع جریان در هر موقعیت قوس) با استفاده از سرعت‌سنج در یک امتداد شعاعی و در زوایای ۱۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه اندازه‌گیری شد. در مطالعه‌های سایر محققین که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، بر روی الگوی توزیع سرعت در مسیر قوس در بستر افقی مشاهده می‌شود که با ورود جریان به داخل قوس تا زاویه ۳۰ درجه، به دلیل گرادیان طولی فشار ناشی از نیروی جانب مرکز در بازه‌ی کوتاهی از ورودی قوس، به خاطر تغییر ناگهانی انحنا، در امتداد دیواره داخلی کاهش فشار و در امتداد دیواره خارجی افزایش فشار اتفاق می‌افتد که منجر می‌شود حداکثر سرعت به طرف دیواره داخلی منتقل می‌شود (Shaker & Kashfipour, 2015). بعد از این مقطع حداکثر سرعت به نزدیکی دیواره خارجی منتقل می‌شود. علت این پدیده، تولید جریان‌های ثانویه در داخل مقاطع عرضی است؛ به طوری که، این جریان‌ها که در نزدیک سطح آب به طرف دیواره خارجی و در نزدیکی بستر به طرف دیواره داخلی برقرار هستند، بر گرادیان طولی فشار غالب شده و باعث انتقال عرضی مومنت طولی جریان می‌شوند.

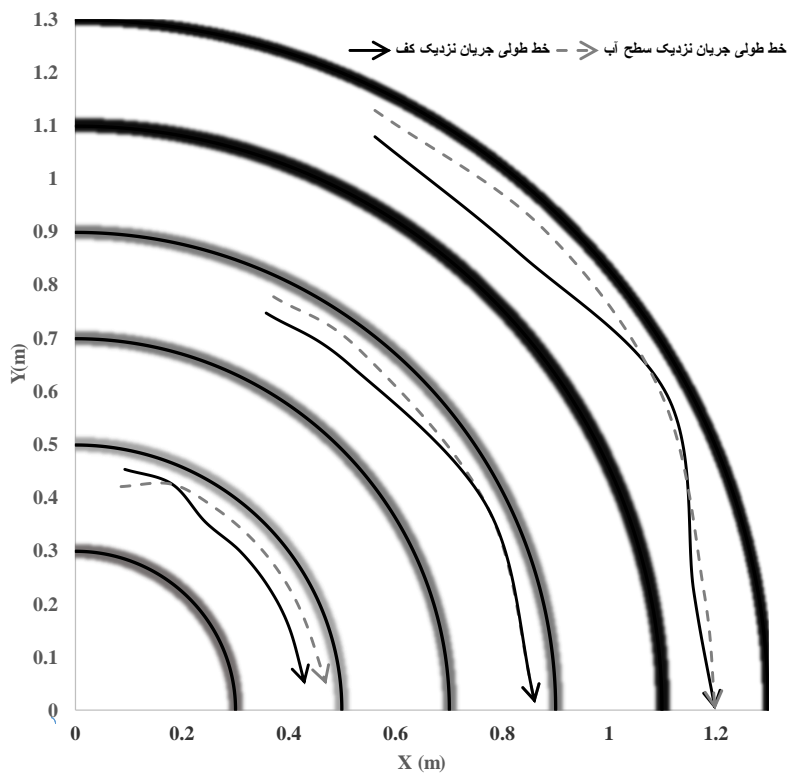
اما در بستر شیب‌دار با ورود جریان به مسیر قوس، سرعت طولی حداکثر در همه نسبت‌های شعاع به عرض به سمت دیواره خارجی انتقال پیدا می‌کند. علت این پدیده اضافه شدن نیروی وزن سیال در راستای شیب جریان و افزایش سرعت جریان بوده که تولید جریان ثانویه را تشدید می‌نماید (Keevil et al., 2007).

¹ Matlab



بررسی بیشینه سرعت طولی جریان

با توجه به اینکه خطوط جریان در سیال در هر نقطه مماس بر بردار سرعت در آن نقطه است بنابراین خطوط جریان با استفاده از بردارهای سرعت در محدوده قوس قابل ترسیم است. شکل ۶ خطوط جریان طولی نزدیک سطح آب و نزدیک بستر را برای عدد فرود ۰/۱ در تمامی قوس‌ها نشان می‌دهد.

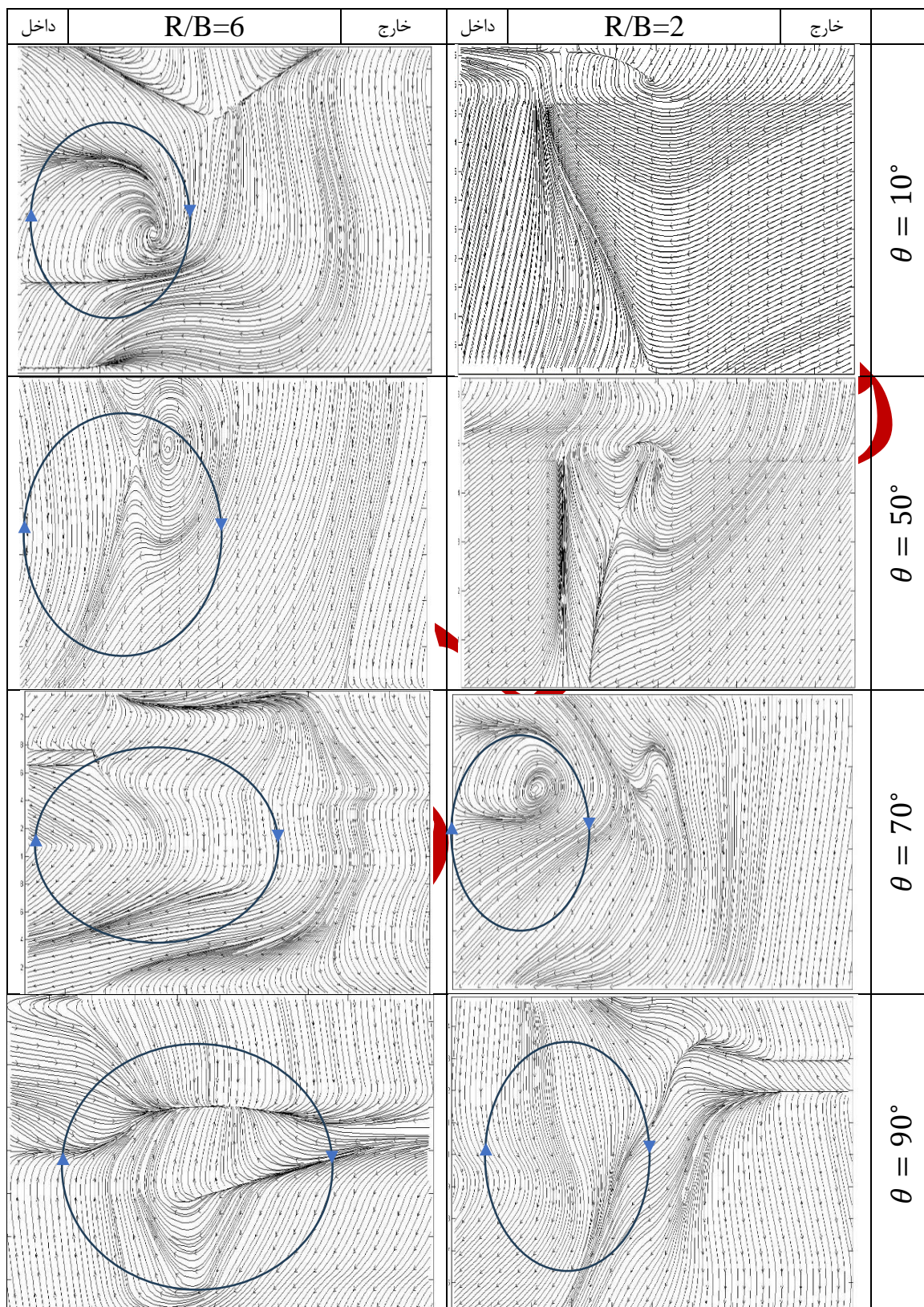


شکل ۶. خطوط طولی بیشینه سرعت جریان در نزدیکی بستر و سطح آب در تمامی قوس‌ها

با توجه به شکل ۶ برای نسبت شعاع به عرض ۲ می‌توان گفت در عمق ۵ سانتی‌متر از بستر و همچنین عمق ۵ سانتی‌متر از سطح آب سرعت‌های بیشینه در نزدیکی دیواره خارجی بوده و تا انتهای قوس روند خود را حفظ می‌نمایند. به علت افزایش نیروی گریز از مرکز انحنا خطوط جریان در این قوس تند نیز بیشتر می‌گردد. این روند برای نسبت شعاع به عرض ۴ هم صادق بوده با این تفاوت که به دلیل افزایش عمق آب در یک سوم انتهای قوس موقعیت حداکثر سرعت در نزدیکی بستر و سطح آب در یک راستا قرار می‌گیرند. با کاهش نسبت نیروی گریز از مرکز و همچنین افزایش عمق آب در پایین دست هم در نسبت شعاع به عرض ۶ سبب می‌شود موقعیت بیشینه سرعت طولی جریان به میانه کانال منتقل گردد.

بررسی جریان ثانویه

در این بخش اثر نسبت‌های مختلف شعاع به عرض قوس، بر الگوی جریان ثانویه در مقاطع مختلف عرضی بررسی می‌شود. در شکل ۷ الگوی جریان ثانویه با استفاده از خطوط جریان در زاویه‌های ۷۰، ۵۰، ۱۰ و ۹۰ درجه و برای نسبت‌های شعاع به عرض قوس ۲ و ۶ نشان داده شده‌اند. مطابق این شکل در مقطع ورودی قوس در زاویه ۱۰ درجه، با افزایش سطح آب در جهت طولی در نزدیکی قوس خارجی، روند مثبت شدن گرادیان فشار طولی و با کاهش سطح آب در جهت طولی در نزدیکی قوس داخلی، روند منفی شدن گرادیان فشار طولی اتفاق می‌افتد که با توجه به وقوع این فرایند و همچنین به منظور حفظ پیوستگی، این جریان یک سوپه در راستای عرضی از دیواره خارجی به سمت دیواره داخلی قوس شکل می‌گیرد؛ ولی، همان‌گونه که پیش از این ذکر گردید جریان چرخشی دیگری با جهت چرخش موافق جریان ثانویه اصلی و با ابعاد کوچک‌تر در نزدیکی دیواره داخلی تشکیل می‌گردد. با پیشروی طولی جریان در مسیر خم الگوی خطوط جریان در شکل ۷ تشکیل جریان ثانویه در زاویه ۵۰ درجه از قوس را برای نسبت شعاع به عرض ۶ به دلیل طی کردن مسیر طولی بیشتر در دیواره داخلی به‌خوبی نمایش می‌دهد ولی در این مقطع در قوس تندتر (نسبت شعاع به عرض ۲) این جریان هنوز تشکیل نشده است.



شکل ۷. نمایش الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه با نسبت شعاع به عرض ۲ و ۶

در زاویه ۷۰ درجه برای نسبت شعاع به عرض دو وضعیت چرخش نسبتاً مشابه زاویه ۵۰ درجه در قوس ملایم می‌باشد و جریان ثانویه در نزدیکی دیواره داخلی شکل گرفته است. در این موقعیت در قوس ملایم جریان چرخشی در دیواره داخلی از بین رفته و یک جریان ثانویه غیرمتقارن در تمام مقطع که در نزدیکی بستر به سمت دیواره داخلی است در حال شکل‌گیری می‌باشد. بر اساس شکل ۷ در انتهای قوس (زاویه ۹۰ درجه) جریان‌های ثانویه در قوس ملایم‌تر به صورت متقارن و کامل مشاهده می‌شود به نحوی که در سطح به دلیل غلبه نیروی گریز از مرکز بر گرادیان فشاری به سمت دیواره خارجی در حال چرخش می‌باشد. در قوس تند در این موقعیت روند جدایش جریان در دیواره داخلی از بین نرفته و یک جریان غیرمتقارن را شاهد هستیم.

بررسی توزیع تنش برشی

تغییرات تنش برشی در قوس نسبت به مسیر مستقیم، عامل اصلی فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها می‌باشد. برای به دست آوردن تنش برشی در قوس از رابطه کوپر^۱ به صورت زیر استفاده شده است (Kassem & Chaudhry, 2002; Knight et al., 2007):

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

برای محاسبه تنش برشی کل بستر از رابطه ۶ استفاده می‌شود (Sozopor et al., 2015):

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که به ترتیب تنش برشی در جهت طولی (رابطه ۴) و عرضی (رابطه ۵) می‌باشند، در روابط بالا ρ جرم مخصوص سیال و g شتاب ثقل می‌باشد. در معادلات بالا \bar{u} و \bar{v} به ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهت طولی و عرضی و C ضریب شزی^۲ بوده که از رابطه ۷ قابل محاسبه است:

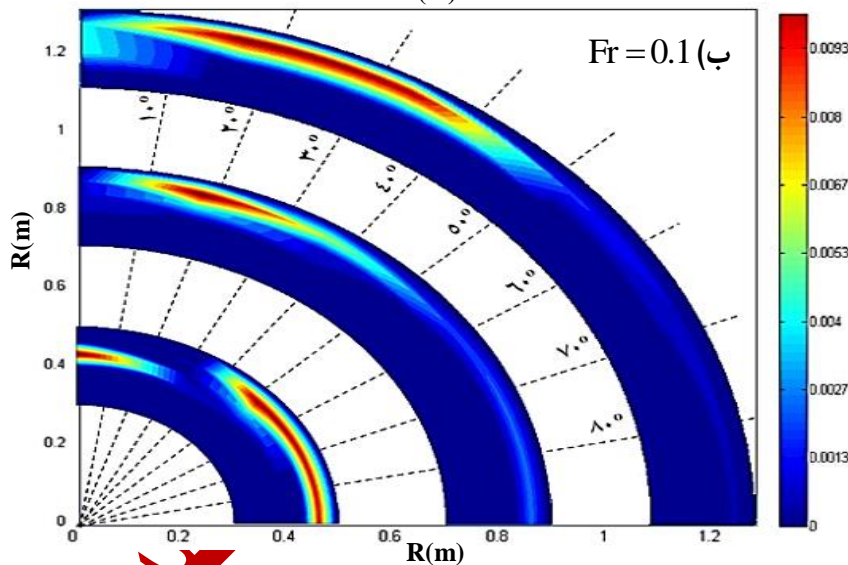
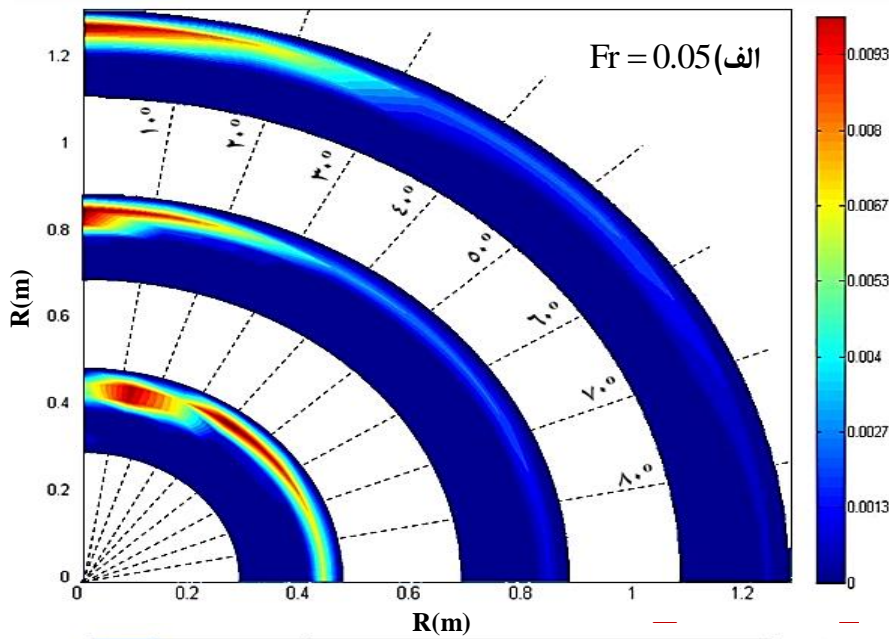
$$c = \frac{R^{1/6}}{n} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن R شعاع هیدرولیکی و n ضریب زبری معادل می‌باشد.

شکل ۸ الف و ب توزیع تنش برشی بستر در دو عدد فرود ۰/۰۵ و ۰/۱ در طول قوس با نسبت‌های شعاع به عرض مختلف نمایش می‌دهد، طیف قرمز رنگ ناحیه پر تنش در قوس را نشان می‌دهد.

¹ Coper

² Chézy Coefficient



شکل ۸. توزیع تنش برشی بستر در تمامی نسبت‌های شعاع به عرض در دو عدد فرود الف) ۰.۰۵ و ب) ۰.۱

همان‌گونه که مشاهده می‌شود ناحیه پر تنش برای تمامی قوس‌ها و در هر دو عدد فرود در نزدیکی دیواره خارجی شکل گرفته است. این ناحیه پر تنش در عدد فرود ۰/۰۵ در نسبت شعاع به عرض ۴ و ۶ تا زاویه ۳۰ درجه از مقطع ورودی و در عدد فرود ۰/۱ تا زاویه ۵۰ درجه ادامه داشته و بعد از این زاویه با افزایش عمق و کاهش سرعت کاهش یافته است. همچنین برای قوس تند (نسبت شعاع به عرض ۲) ناحیه پر تنش در تمامی مسیر برای هر دو عدد فرود ادامه یافته است.

نتیجه‌گیری

جریان ثانویه یکی از ویژگی‌های برجسته کانال‌های داری خم می‌باشد که می‌تواند سرعت جریان و توزیع تنش برشی بستر را تغییر دهد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر شعاع انحنا بر الگوی جریان در خم رودخانه‌های با بستر شیب‌دار بوده است. برای این منظور، داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سه‌بعدی سرعت جریان تحلیل و ارزیابی شده است. نتایج کلی

این تحقیق آزمایشگاهی نشان می‌دهد که الگوی توزیع سرعت در قوس به‌گونه‌ای است که به دلیل وجود شیب بر خلاف بستر افقی، نواحی با حداکثر سرعت در بخش پایین دست قوس و نزدیک به دیواره خارجی متمرکز شده‌اند. نتایج این تحقیق با سایر نتایج انحناهای نسبی قوس‌ها به دلیل تأثیر شیب متفاوت می‌باشد. Qudsian et al. (2008) بر روی قوس با انحناهای نسبی ۳ به این نتیجه رسیدند که تنش برشی حداکثر از مقطع ۴۰ تا موقعیت ۵۰ درجه نزدیک دیوار داخلی رخ می‌دهد ولی در تحقیق حاضر، موقعیت تنش برشی حداکثر از مقطع ۱۰ تا ۷۰ درجه نزدیک دیوار خارجی برقرار می‌باشد. Anwar (1986) به این نتیجه رسید که الگوی سرعت در ورودی به شعاع قوس بستگی ندارد ولی در خروجی اثرات الگوی جریان مربوط به قوس باقی می‌ماند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات Elyasi et al. (2014) پیرامون سرعت طولی جریان، در ابتدای قوس و برای همه نسبت‌های شعاع به عرض ۲ تا ۵، بیشینه سرعت در نزدیکی دیواره داخلی رخ می‌دهد. با نزدیک شدن به انتهای قوس، برای نسبت شعاع به عرض برابر با ۲ (تندترین قوس)، بیشینه سرعت همچنان در نزدیکی دیواره داخلی مشاهده می‌شود؛ اما برای سایر نسبت‌های شعاع به عرض، محل بیشینه سرعت به نواحی نزدیک به دیواره خارجی انتقال می‌یابد. در صورتی که در مطالعه حاضر برای قوس‌های ملایم، در نزدیکی دیواره خارجی بیشینه سرعت رخ داده است و در بخش‌های انتهایی به نزدیکی میانه عرض کانال منتقل می‌شود. همچنین در مقطع ورودی قوس (زاویه صفدرجه)، برای تمامی نسبت‌های شعاع ۲ تا ۵، از مطالعات (2014) Elyasi et al. در بستر افقی (بدون شیب) یک جریان عرضی به سمت دیواره خارجی قوس شکل می‌گیرد. در طول قوس، جریان‌های ثانویه به طور کامل تشکیل می‌شوند. در ملایم‌ترین قوس (با نسبت شعاع به عرض برابر با ۵)، یک جریان چرخشی دیگر نیز با جهت چرخش مخالف جریان اصلی و ثانویه ایجاد می‌شود. در حالی که نتایج آزمایشگاهی اخیر نشان می‌دهد در قوس ملایم صرفاً یک جریان ثانویه نزدیکی دیواره قوس داخلی رخ داده که با طی مسیر کانال توسعه یافته است.

تشکر و قدردانی

در پایان، از حمایت‌های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1403.43525).

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

References

- Abad, J. D., & Garcia, M. H. (2009). Experiments in a high-amplitude Kinoshita meandering channel: 2. Implications of bend orientation on bed morphodynamics. *Water Resources Research*, 45(2), 2008WR007017. <https://doi.org/10.1029/2008WR007017>
- Abhari, M. N., Ghodsian, M., Vaghefi, M., & Panahpur, N. (2010). Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3), 292–298. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598610000336>
- Akbari, M., & Vaghefi, M. (2017). Experimental investigation on streamlines in a 180° sharp bend. *Acta Scientiarum - Technology*, 39(4), 425–432. Scopus. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.29032>
- Anwar, H. O. (1986). Turbulent structure in a river bend. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(8), 657–669. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:8\(657\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:8(657))
- Blanckaert, K. (2011). Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications: PROCESSES IN SHARP MEANDER BENDS. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F1), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010JF001806>
- Blanckaert, K., & De Vriend, H. J. (2010). Meander dynamics: A nonlinear model without curvature restrictions for flow in open-channel bends. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4), 2009JF001301. <https://doi.org/10.1029/2009JF001301>
- Chooplou, A., & Vaghefi, M. (2019). Experimental study of the effect of displacement of vanes submerged at channel width on distribution of velocity and shear stress in a 180 degree bend. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(5), 1417–1428. https://www.jafmonline.net/article_847.html
- Deng, S., Xia, J., Zhou, M., Li, Z., Duan, G., Shen, J., & Blanckaert, K. (2021). Secondary Flow and Flow Redistribution in Two Sharp Bends on the Middle Yangtze River. *Water Resources Research*, 57(10). Scopus. <https://doi.org/10.1029/2020WR028534>

- Elyasi, S., Eghbalzadeh, A., Vaghefi, M., & Javan, M. (2014).» Research Note «Numerical Study of the Effect of Ratio of Radius to Width on Flow Pattern in a 90 Degree Bend. *Journal of Hydraulics*, 9(1), 59–68. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2014.7915>
- Farag Boghdady, A., Tawfik Ahmed, M., El Sersawy, H., & Ghanem, A. (2023). Assessment of flow patterns and morphological changes in Nile river bends (Damietta branch). *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(1), 89–99. <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1985640>
- Gleason, C. J. (2015). Hydraulic geometry of natural rivers: A review and future directions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 39(3), 337–360. <https://doi.org/10.1177/0309133314567584>
- Hu, P., & Yu, M. (2023). Numerical Investigation of Bed Shear Stress and Roughness Coefficient Distribution in a Sharp Open Channel Bend. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(8), 1560–1573. https://www.jafmonline.net/article_2243.html
- Kassem, A. A., & Chaudhry, M. H. (2002). Numerical Modeling of Bed Evolution in Channel Bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 507–514. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:5\(507\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(507))
- Keevil, G. M., Peakall, J., & Best, J. L. (2007). The influence of scale, slope and channel geometry on the flow dynamics of submarine channels. *Marine and Petroleum Geology*, 24(6–9), 487–503. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.01.009>
- Knight, D. W., Omran, M., & Tang, X. (2007). Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary Shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 39–47. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(39))
- Koch, C., & Chanson, H. (2005). *An experimental study of tidal bores and positive surges. Hydrodynamics and turbulence of the bore front.* <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=29565abd73470b0a87b21399ced621cac863873f>
- Lazzarin, T., & Viero, D. P. (2023). Curvature-induced secondary flow in 2D depth-averaged hydro-morphodynamic models: An assessment of different approaches and key factors. *Advances in Water Resources*, 171. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104355>
- Li, Q., Ma, L., Yu, M., Wu, D., & Gong, L. (2023). Numerical simulation of effect of outer bank slope types on the hydraulic characteristics in sharp bends. *Shuikexue Jinzhan/Advances in Water Science*, 34(4), 599–609. Scopus. <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2023.04.012>
- Lin, J. T.-Y., Lacunza, E., Fernández, R., García, M. H., Rhoads, B. L., Best, J. L., LeRoy, J. Z., & Parker, G. (2024). Hydrodynamic processes of incipient meander chute cutoffs-implications for morphodynamics and depth-averaged modeling. *Authorea Preprints.* <https://essopenarchive.org/doi/full/10.22541/essoar.172286675.52992591>
- Liu, X., Xia, J., Deng, S., Zhou, M., Mao, B., & Blanckaert, K. (2024). Hydrodynamic and Morphological Adaptation of Two Consecutive Sharp Bends of the Middle Yangtze River to Upstream Damming. *Water Resources Research*, 60(1). Scopus. <https://doi.org/10.1029/2023WR034990>
- Mehraein, M., Ghodsian, M., & Najibi, S. A. (2014). Experimental investigation on the flow field around a spur dike in a 90° sharp bend. *Proc. Int. Conf. Fluv. Hydraul., RIVER FLOW*, 743–749. Scopus. <https://doi.org/10.1201/b17133-101>
- Nortek, A. (2001). Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. *Nortek Technical Note*, 3, 1–5. <https://www.nortekgroup.com/assets/documents/Monitoring-sediment-concentration-with-acoustic-backscattering-instruments.pdf>
- 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. *Ocean Engineering*, 302, 117557. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824008941>
- Qudsian, Massoud., Waghefi, Mohammad., & Panahpour, Nima. (2008). Laboratory investigation of flow pattern in 90 degree arc. Fourth National Congress of Civil Engineering. <https://en.ivilica.com/doc/37656/>
- Safaripour, N., Vaghefi, M., & Mahmoudi, A. (2024). An experimental comparison of 3D velocity components around single and twin piers installed in a sharp bend under the influence of upstream implemented vanes. *Applied Water Science*, 14(5). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02177-4>
- Safarzadeh, A., & Salehi Neyshabouri, S. a. A. (2005). Hydrodynamic Study of Turbulent Flow Pattern in River Bend Using 3D Numerical Model. *Iran-Water Resources Research*, 1(3), 65–77. https://www.iwrr.ir/article_15169_en.html
- Salajgheh, A., Salehi Neishabouri, A., Ahmadi, H., Mahdavi, M., & Qudsian, M. (2005). An Experimental Investigation of Three Dimentional Flow Pattern In River Bend. *Iranian Journal of Natural Resources*, 58(2). https://ijnr.ut.ac.ir/article_25490_en.html
- Salehi, M., & Strom, K. (2011). Using velocimeter signal to noise ratio as a surrogate measure of suspended mud concentration. *Continental Shelf Research*, 31(9), 1020–1032. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.03.008>

- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Yan, X. (2021). A review of numerical simulations of secondary flows in river bends. *Water*, 13(7), 884. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/7/884>
- Shaker, E., & Kashefipour, M. (2015). Experimental Investigation on the Effect of Length and Angle of Groynes on Velocity and Shear Stress Distribution in a 90 Degree Bend. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(3), 1–12. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11470>
- Sharma, A., Lakkaraju, R., & Atta, A. (2023). Influence of channel bend angle on the turbulent statistics in sharply bent channel flows. *Physics of Fluids*, 35(5). <https://pubs.aip.org/aip/pof/article/35/5/055102/2887665>
- Smirnov, E., Panov, D., Ris, V., & Goryachev, V. (2020). Towards DES in CFD-based optimization: The case of a sharp U-bend with/without rotation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(4), 1557–1566. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0318-x>
- Sozopor, A., Shafai, M., & Sheikh Rezazadeh Nikou, N. (2015). Experimental Investigation of the Effects of Height of Bed Roughness on Shear stress and the Strength of Vortex in a 90 Degree Sharp Rectangular Bend. *Iranian Water Researches Journal*, 9(1), 81–88. https://iwj.sku.ac.ir/article_11035_en.html
- You, R., Liu, Z., Li, H., Tao, Z., & Shi, J. (2023). Experimental and numerical study of flow field structure in U-shaped channels with different bend sections. *Physics of Fluids*, 35(4). <https://pubs.aip.org/aip/pof/article/35/4/045115/2883390>
- You, R., Tao, Z., Liu, Z., Shi, J., & Li, H. (2023). Experimental and numerical study of flow field structure in U-shaped channels with different bend sections. *Physics of Fluids*, 35. <https://doi.org/10.1063/5.0142486>
- Wang, J., Chen, L., Zhang, W., & Chen, F. (2019). Experimental study of point bar erosion on a sand-bed sharp bend under sediment deficit conditions. *Sedimentary Geology*, 385, 15–25. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.03.008>

موسسه آریستو

Investigating the Effect of Channel Bend Radius on Flow Characteristics in Inclined Bed Channels

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the design of irrigation and drainage networks, it is essential to have a comprehensive understanding of the hydraulic behavior of flow in curved paths. These curved paths, often found in natural rivers and man-made structures, can lead to issues such as erosion and sediment deposition if not carefully considered. To mitigate these issues, a thorough understanding of flow patterns in bends is crucial for effective and economical design. However, the complex interplay of flow and bed topography in bends makes it challenging to achieve a complete understanding of these patterns. Numerous studies have investigated the impact of bend curvature on flow patterns in open channels (Elyasi et al., 2014; Liu et al., 2024; Pradhan et al., 2024; Shaheed et al., 2021). These studies, employing experimental, numerical, and Soft Computing methods, have explored various aspects of flow behavior in bends. Despite extensive research on flow patterns in bends, no studies have specifically investigated the effect of channel bend radius on flow characteristics in sloped surfaces. Therefore, this study aims to experimentally examine the influence of bend radius, ranging from sharp to mild, on flow patterns in sloped channels.

Materials and Methods

The study was conducted in a rectangular laboratory flume with a width of 20 cm. The flume was designed to create bends with varying centerline radius to width ratios (R/B), specifically 2, 4, and 6, representing sharp, moderate, and mild bends respectively. To ensure controlled flow conditions, the inlet flow rate was regulated using an electromagnetic flow meter, and mesh screens were employed to smooth the incoming flow. The channel bed was covered with a wooden sheet, and a similar sheet was placed over the curved section after each experiment to maintain consistency. Two Froude numbers (Fr), 0.05 and 0.1, were used to represent different flow regimes. The water surface elevation was kept constant at the entrance of the bend.

A 3D Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), specifically the Vectrino+, was utilized to measure the three-dimensional velocity components of the flow. The measurement points were distributed along the channel length, width, and depth to capture a comprehensive representation of the flow field. The collected data, initially in polar coordinates, was converted to Cartesian coordinates using mathematical relationships to facilitate visualization and analysis of the velocity components.

Results and discussion

The longitudinal velocity distribution in the bend exhibited distinct patterns. As the flow entered the bend, the maximum velocity shifted from the center towards the inner wall due to the sudden change in curvature and the resulting pressure gradient. This shift was consistent with previous studies on horizontal beds. However, in the sloped bed, the maximum velocity shifted towards the outer wall due to the influence of gravity and the added force of the fluid weight in the direction of the slope. This observation suggests that the slope significantly alters the velocity distribution compared to horizontal beds. Secondary flows, characterized by transverse velocity components, play a crucial role in flow patterns within bends. The study revealed that the development and structure of secondary flows are influenced by the curvature ratio of the bend. In milder bends (higher R/B ratios), a single rotational flow formed near the inner wall, gradually expanding to encompass the entire cross-section as the flow progressed along the bend. However, in sharper bends (lower R/B ratios), an additional, smaller rotational flow formed near the inner wall, opposite to the direction of the main secondary flow. Bed shear stress is a critical factor in erosion and sediment transport processes within river bends. These findings suggest that the location and extent of the high shear stress zone are influenced by both the bend sharpness and the flow regime.

Conclusion

The study highlights the significant impact of channel bend radius on flow characteristics in sloped surfaces. The interaction of the slope and the centrifugal force results in a unique velocity distribution that differs from that observed in horizontal beds. The development and structure of secondary flows are also influenced by the bend sharpness, with sharper bends exhibiting more complex flow patterns. The distribution of bed shear stress is crucial for understanding erosion and sediment transport processes. The study identified the location and extent of the high shear stress zone and its dependence on both bend sharpness and flow regime. The findings of this study provide valuable insights for the design of irrigation and drainage networks, as well as for understanding and managing river morphology in natural settings.

Author Contributions

For this research article, the individual contributions are as follows: Conceptualization, [Author A] and [Author

B]; methodology, [Author B]; software, [Author A]; validation, [Author A], [Author B], and [Author B]; formal analysis, [Author B]; investigation, [Author A]; resources, [Author A]; data curation, [Author B]; writing—original draft preparation, [Author B]; writing—review and editing, [Author B]; visualization, [Author B]; supervision, [Author B]; project administration, [Author B]; funding acquisition, [Author A]. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available. For further inquiries regarding the data, please contact author's email.

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support of the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz (GN: SCU.WH1403.43525).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

فیلد استنادی
فیلد استنادی