

بررسی آزمایشگاهی اثر زبری جداره‌ی نهر مستطیلی بر فراسنج‌های هیدرولیکی جریان در قوس ۹۰ درجه با نسبت شعاع به عرض ۲

یوسف قدو^۱، محمود شفاعی بجمستان^۲، عزیز سوزه پور^{۳*}

تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۴ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۲۳

چکیده

مطالعه‌ی حاضر به منظور بررسی اثر زبری جداره‌ی نهر مستطیلی بر فراسنج‌های هیدرولیکی جریان در قوس ۹۰ درجه تند با نسبت شعاع انحنای خط مرکزی به عرض ۲ انجام شد. آزمایشها به ازای سه زبری جداره‌ی ۰/۵، ۲ و ۵ میلی متر در عدد فرود ثابت ۰/۱۷ انجام گرفت. در هر آزمایش، و در طول قوس، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان با استفاده از سرعت‌سنج JFE ALEC در ۴۸۰ نقطه اندازه‌گیری شد. ترسیم بردارهای سرعت و الگوی جریان با استفاده از نرم‌افزارهای Surfer و Tteplot انجام گرفت. نتایج نشان دادند که در لایه‌ی نزدیک سطح آب، خطوط جریان به سمت جداره‌ی بیرونی، و در لایه‌ی نزدیک کف، خطوط جریان به سوی جداره‌ی داخلی کشیده شده‌اند، که با افزایش زبری جداره، انحراف خطوط جریان افزایش یافته است. ناحیه‌ی پر سرعت در محدوده‌ی ۳۰ تا ۶۰ درجه بیشتر به سمت جداره‌ی داخلی، و در امتداد عمق توزیع شده است، که از موقعیت ۶۰ درجه به بعد به سمت جداره‌ی خارجی کشیده می‌شود. هسته‌ی اصلی جریان ثانویه نزدیک جداره‌ی داخلی دیده شد که به ازای هر سه زبری جداره در ناحیه‌ی ۶۰ درجه‌ی قوس شکل گرفت. افزایش زبری باعث به تاخیر افتادن استهلاک هسته‌ی جریان ثانویه در انتهای قوس گردیده است. افزایش زبری جداره باعث افزایش تنش برشی بستر در نواحی پر تنش شده است. همچنین، محدوده‌ی ۷۰ تا ۸۰ درجه‌ی قوس به عنوان ناحیه‌ی با بیشترین قدرت جریان ثانویه تعیین گردید. در یک مقطع عرضی، با افزایش زبری جداره‌ی نهر، قدرت جریان ثانویه کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: قوس تند، زبری بدنه، سلول چرخش، تنش برشی

^۱ - فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ - استاد دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳ - دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

* - نویسنده مسؤل مقاله: asozapor@yahoo.com

مقدمه

اغلب محققان هیدرولیک به وجود جریانهای ثانویه در نهرهای باز و سایر مجاری آبی اشاره کرده‌اند. مطالعه‌ی جریانهای ثانویه در نهرهای باز در علم مهندسی هیدرولیک از اهمیت زیادی برخوردار است. این اهمیت بیشتر به دلیل تأثیر جریانهای ثانویه بر فراسنجهای مختلف مطرح در هیدرولیک و مهندسی رودخانه، همچون سرعت متوسط جریان، توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی می‌باشد که به‌وسیله‌ی محققین مختلفی از جمله نایت و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری مستقیم جریانهای ثانویه مشکل می‌باشد. این جریانها، که معمولاً مقدار آنها در حدود ۲ تا ۳ درصد سرعت متوسط جریان است، حاصل غیر همگن بودن آشفتگی جریان می‌باشد. بر اساس تحقیقات نزو و رودی (۱۹۸۵) که در مورد جریانهای ثانویه در نهرهای باز و صاف انجام پذیرفته، روشن گردیده است که الگوی جریانهای ثانویه در مجاری باز کاملاً با مجاری بسته، متفاوت بوده و این اختلاف به سبب میرائی جزء قائم نوسانهای آشفتگی به دلیل وجود سطح آزاد سیال است. محققین زیادی، از جمله نایت و پاتل (۱۹۸۵) در مورد الگوی سلول جریانهای ثانویه، مخصوصاً در نهرهای ذوزنقه‌ای، تحقیق کرده‌اند. آنان اظهار نمودند که توزیع زبری بستر، وجود سطح آب، هندسه‌ی نهر و ارتفاع آب، عاملهای مؤثری در آشفتگی، و طبیعتاً جریانهای ثانویه به‌شمار می‌روند. تامیناگا و نزو (۱۹۸۹) آزمایشهایی را در نهرهای مستقیم مستطیلی شکل با توزیع زبری یکنواخت و غیریکنواخت انجام دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که الگوی جریانهای ثانویه در صورت وجود زبری یکنواخت تقریباً شبکهابه با حالت صاف بوده و فقط بستگی به نسبت B/H مقطع دارد. انور (۱۹۸۹) مطالعاتی را با اندازه‌گیری سه بعدی سرعت در قوس رودخانه‌ای کوچک در انگلیس با شعاع داخلی ۱۹ متر انجام داده است. وی نتیجه گرفت که الگوی سرعت در ورودی قوس به شعاع قوس بستگی نداشته ولی در خروجی اثرات الگوی جریان مربوط به قوس باقی می‌ماند. محمودی و انعلیا (۱۳۷۷) الگوی جریان در پیچانرودها را با استفاده از شبیه فیزیکی و مقایسه‌ی آن با شبیه ریاضی بررسی کردند. نامبرده با مقیاس کردن

مشخصات یکی از قوسهای ۹۰ درجه کارون، شبیهی با مقیاس ۱:۵۰ با کف بتنی طراحی کرد. نامبرده در مورد توزیع سرعت در عمق، در مقطع عرضی و در تصویر افقی بررسیهایی انجام داده و نتایج را با شبیه یک بعدی و دو بعدی مقایسه نمود. مجتبی صفروور و همکاران (۱۳۸۷) تحقیقی تحت عنوان فراسنجهای هیدرولیکی جریان در مجاری انحناءدار انجام دادند. نامبرده نتایج شبیه‌های مختلف را با دستاوردهای مشاهده شده مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که ناحیه‌ی حداکثر سرعت در ابتدای قوس به سمت جدار داخلی، و در انتهای آن کاملاً به سمت جدار خارجی کشیده می‌شود. همچنین، سلول جریان ثانویه در تمام طول پیچ ثابت نبوده، و محل وقوع بیشترین جریان ثانویه را در حوالی رأس قوس عنوان کردند. قدسیان و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در یک خم ۹۰ درجه پرداختند، آزمایشها در یک نهر پایه‌دار مستطیل شکل، با انحنای نسبی (R/B) برابر ۳ انجام شد و به این نتیجه رسیدند که محدوده‌ی سرعتهای زیاد در ابتدای خم تا زاویه‌ی ۶۰ درجه قوس در قسمت دیواره‌ی داخلی نهر پایه‌دار بوده، از ۶۰ درجه به بعد به طرف میانه‌ی نهر پایه‌دار منحرف می‌شود، و بیشترین مقدار تنش برشی کف در موقعیت ۴۰ تا ۵۰ درجه، نزدیک دیواره‌ی داخلی نهر پایه‌دار اتفاق می‌افتد. تائبی و همکاران (۱۳۸۸)، به شبیه‌سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه‌ی تند با استفاده از شبیه CCHE2D پرداختند. بررسی تغییرات سرعت در طول نهر نشان داد که با عبور جریان از ورودی قوس، موقعیت حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به نزدیکی جداره‌ی داخلی کشیده می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مطالعات در مورد بررسی فراسنجهای جریان و جریان ثانویه بیشتر در مسیر مستقیم بوده، همچنین در قوسها بیشتر مطالعات بر اساس شبیه عددی صورت گرفته و به همین دلیل تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر زبری جداره‌ها بر فراسنجهای هیدرولیکی جریان و جریان، ثانویه در قوس ۹۰، درجه بر اساس نمونه‌ی فیزیکی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر نهر آزمایشگاهی خمیده با نسبت شعاع انحنای خط مرکزی به عرض ۲ و مقطع عرضی مستطیلی با زاویه مرکزی ۹۰ درجه استفاده شد. قوس مذکور جز قوسهای تند به شمار می‌آید. عرض نهر ۴۰ سانتی‌متر، شعاع داخلی ۶۰ سانتی‌متر و شعاع خارجی ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. طول راستای مستقیم نهر در بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۴ و ۲ متر است (جدول ۱). جداره‌ی نهر از جنس پلکسی و کف بتنی با $n=0.011$ می‌باشد. شیب نهر پایه‌دار تقریباً صفر در نظر گرفته شد، که در این شرایط، جریان تحت تأثیر بار آبی بالادست در محل ورود جریان به نهر پایه‌دار قرار دارد. سرعت جریان در سه بعد در یک مجموعه شبکه‌بندی متعامد در مقاطع عرضی مختلف محدوده‌ی قوس (شکل ۱- الف) با استفاده از سرعت‌سنج JFE ALEC با متناوب ۲۰ اندازه‌گیری شد.

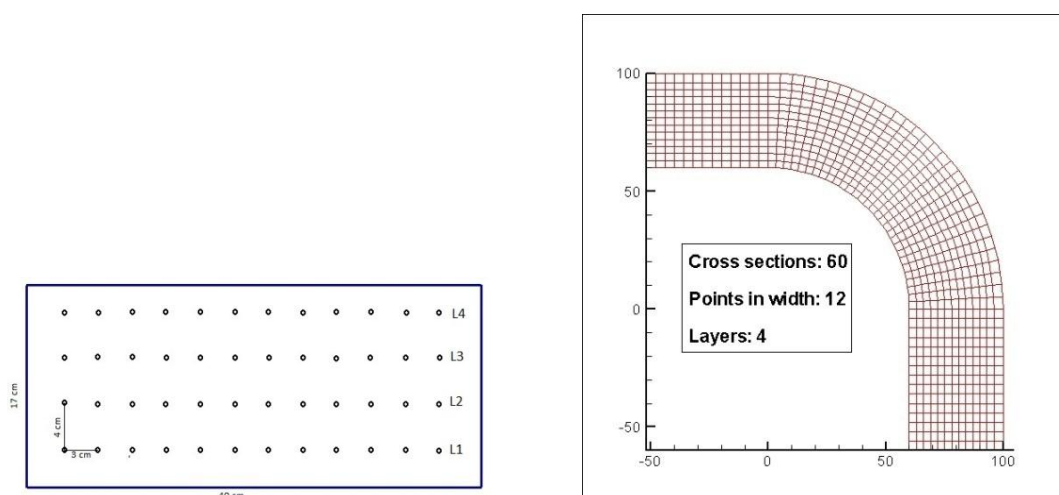
مدت ثبت سرعتها برای هر نقطه بسته به موقعیت نقطه ۵ تا ۲۰ ثانیه بوده‌است. آزمایشها در بده‌ی ۱۵ (فرود ۰/۱۷) لیتر بر ثانیه در عمق ثابت ۱۷ سانتی‌متر صورت گرفت. برای زبر کردن جداره‌ی نهر از ماسه‌ی دانه‌بندی شده با اندازه‌های متوسط ۰/۵، ۲ و ۵ میلی‌متر استفاده شد (جدول ۲). ماسه‌ها با استفاده از چسب آهن روی کف پوش چسبانده شدند (شکل ۳) سپس کف پوش در قوس طوری قرار گرفت که محدوده‌ی مورد بررسی بطور کامل تحت تأثیر زبری جداره باشد (شکل ۴). بعد از این که جداره زبر شد، بده‌ی مورد نظر در نهر جریان یافته و سطح آب در عمق ۱۷ سانتی‌متر ثابت نگاهداشته شد. جهت تنظیم عمق از دریچه‌ای واقع در پایین‌دست نهر استفاده گردید. برای اندازه‌گیری بده جریان از سریز مثلثی مجهز به مقیاس واقع در پایین‌دست نهر و رابطه‌ی بده مقیاس استفاده شد. به منظور مقایسه‌ی شرایط با مسیر مستقیم در ۳۰ سانتی‌متری بالادست و پایین‌دست قوس نیز سرعت جریان تعیین شد. همچنین، جهت بررسی عمقی شرایط جریان، اندازه‌گیریها در ۴ لایه به ترتیب از کف ۳، ۷، ۱۱ و ۱۵ سانتی‌متر برداشت شد (شکل ۱ سمت راست).

جدول (۱) مشخصات نهر پایه‌دار

طول نهر ورودی (متر)	طول نهر خروجی (متر)	شعاع انحنای متوسط (متر)	طول قوس (متر)	عرض نهر (متر)	نسبت شعاع انحنای به عرض قوس	زاویه‌ی قوس (درجه)
۴	۲	۰/۸۰	داخلی ۰/۹۵ خارجی ۱/۵۷	۰/۴	۲	۹۰

جدول (۲) طبقه‌بندی آزمایش‌ها براساس اندازه‌های زبری و مشخصات جریان.

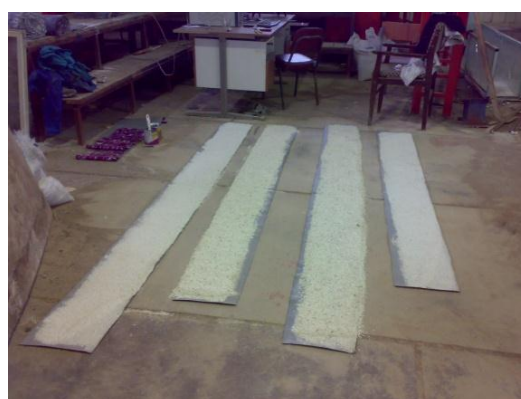
شماره آزمایش	عمق جریان (cm)	عدد فرود جریان	زبری بدنه (mm)	بده (لیتر بر ثانیه)
۱	۱۷	۰/۱۷	۰/۵	۱۵
۲	۱۷	۰/۱۷	۲	۱۵
۳	۱۷	۰/۱۷	۵	۱۵



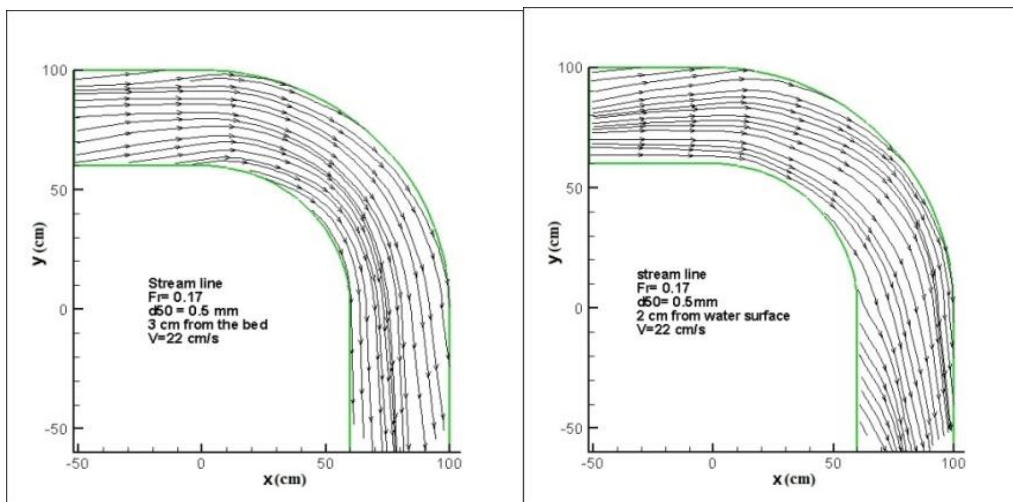
شکل ۱- میدان جریان که داده‌برداری در آن صورت گرفت (شکل سمت راست)، و موقعیت لایه‌ها و نقاط اندازه‌گیری سرعت نسبت به هم در هر مقطع عرضی (شکل سمت چپ).



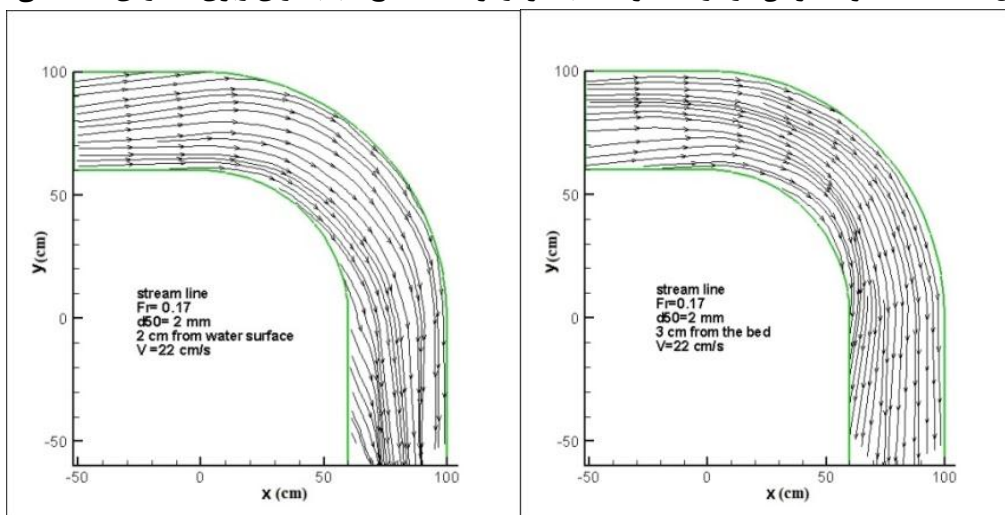
شکل ۲- کف پوش زیر شده.



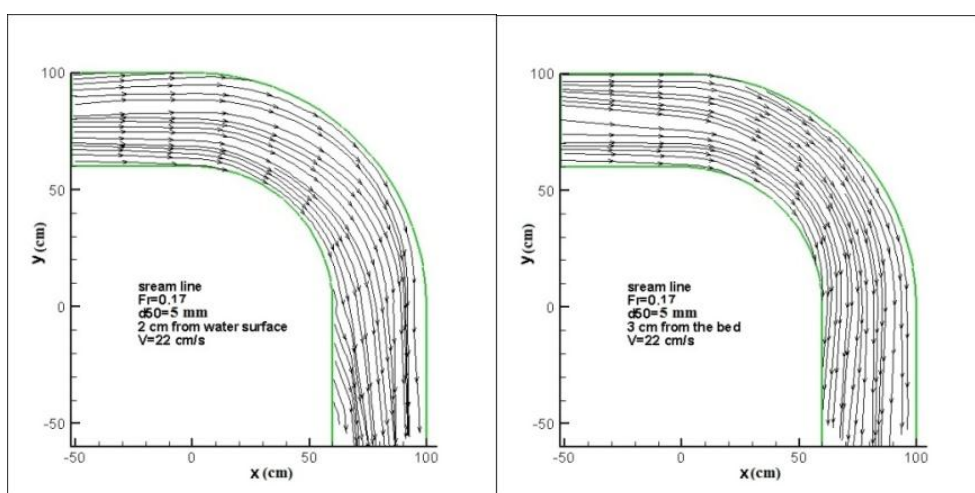
شکل ۳- جداره‌ی زبر شده.



شکل ۴-الف - خطوط جریان در دو لایه نزدیک بستر و نزدیک سطح آب به ازای زبری جداره‌ی ۰/۵ میلی‌متر.



شکل ۴-ب - خطوط جریان در دو لایه‌ی نزدیک بستر و نزدیک سطح آب به ازای زبری جداره‌ی ۲ میلی‌متر.



شکل ۴-ج - خطوط جریان در دو لایه‌ی نزدیک بستر و نزدیک سطح آب به ازای زبری جداره‌ی ۵ میلی‌متر.

نتایج

نتایج بررسی تأثیر زبری جداره‌ی نهر را بر خطوط جریان در طول قوس، خطوط هم سرعت در مقاطع عرضی، توزیع تنش برشی بستر، نیمرخ سطح آب و قدرت جریان ثانویه در قالب شکل و طیف رنگی عرضه می‌کنند. شکل (۴) خطوط جریان را در دو لایه‌ی نزدیک بستر و نزدیک سطح آب نشان می‌دهد. شکل (۵) خطوط میزان منحنی سرعت جریان را در مقاطع صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه قوس نشان می‌دهد. شکل (۶) خطوط جریان عرضی را در مقاطع مختلف از بالادست قوس تا پایین دست نشان می‌دهد. شکل (۷) توزیع تنش برشی بستر را نشان می‌دهد. شکل (۸) تغییرات قدرت جریانهای ثانویه در مقاطع مختلف قوس را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت در لایه‌ی نزدیک سطح آب، به علت غلبه‌ی نیروی گریز از مرکز بر شیب عرضی فشار، خطوط جریان به سمت جداره‌ی بیرونی کشیده شده‌اند. همچنین، در لایه‌ی نزدیک کف، با غلبه‌ی شیب عرضی فشار بر نیروی گریز از مرکز، خطوط جریان به سمت جداره‌ی داخلی کشیده شده‌اند. افزون بر آن، در هر سه زبری جداره در لایه‌ی نزدیک سطح آب، خطوط متمایل به ساحل خارجی بودند. می‌توان گفت که با افزایش زبری زاویه‌ی انحراف خطوط جریان در لایه‌ی نزدیک سطح آب کمتر شده است. همچنین، در لایه‌ی نزدیک کف، با افزایش زبری، انحراف خطوط جریان به سمت جداره‌ی داخلی بیشتر شده است.

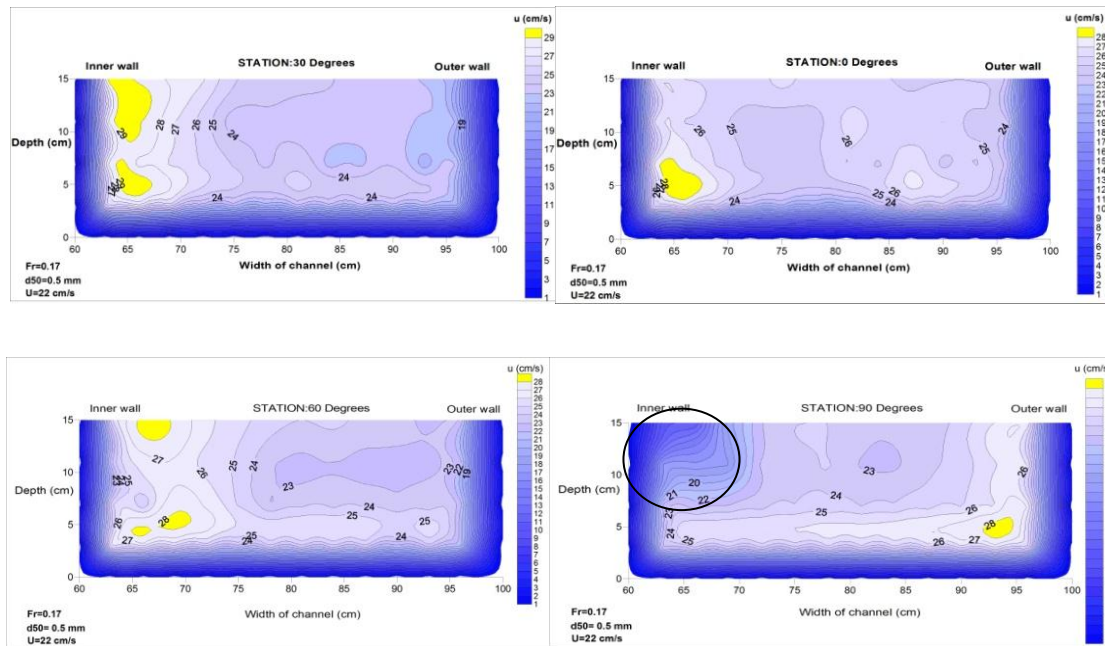
نتایج، با توجه به شکل ۵ برای مقاطع مختلف در طول قوس، نشان می‌دهند که، در مقطع عرضی و در ورودی قوس، ناحیه‌ی با سرعت بیشتر به ازای هر سه زبری نزدیک جداره‌ی داخلی بوده، که این ناحیه در موقعیت ۳۰ درجه، به علت غلبه‌ی شیب عرضی فشار در جهت دیواره‌ی داخلی قوس بر نیروی گریز از مرکز، بیشتر به سمت جداره‌ی داخلی، و در امتداد عمق، توزیع شده است. در موقعیت ۶۰ درجه، این ناحیه همچنان نزدیک جداره‌ی داخلی بوده، که به علت افزایش شیب عرضی فشار در لایه‌های نزدیک به کف، بیشتر به سمت کف کشیده شده است. از موقعیت ۶۰ درجه به بعد، به تدریج نیروی گریز از مرکز بر شیب عرضی فشار غلبه می‌کند؛

لذا، ناحیه‌ی پر سرعت به سمت جداره‌ی خارجی کشیده شده، که در موقعیت ۹۰ درجه، همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، بطور کامل به سمت دیواره خارجی کشیده شده، که بیشتر در امتداد کف و دیواره خارجی توزیع شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که، در لایه‌های نزدیک کف، از موقعیت ۳۰ درجه بر هم کنش نیروی گریز از مرکز و شیب عرضی فشار آغاز گردیده و تا ۹۰ درجه ادامه پیدا می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود، در هر سه حالت زبری جداره در موقعیت ۹۰ درجه یک ناحیه‌ی کم سرعت متمایل به سطح آب، و در نزدیکی جداره‌ی داخلی، مشاهده شده است. علت وجود این ناحیه تأثیر زیاد نیروی از مرکز، و ضعیف بودن شیب عرضی فشار در لایه‌های نزدیک سطح آب می‌باشد.

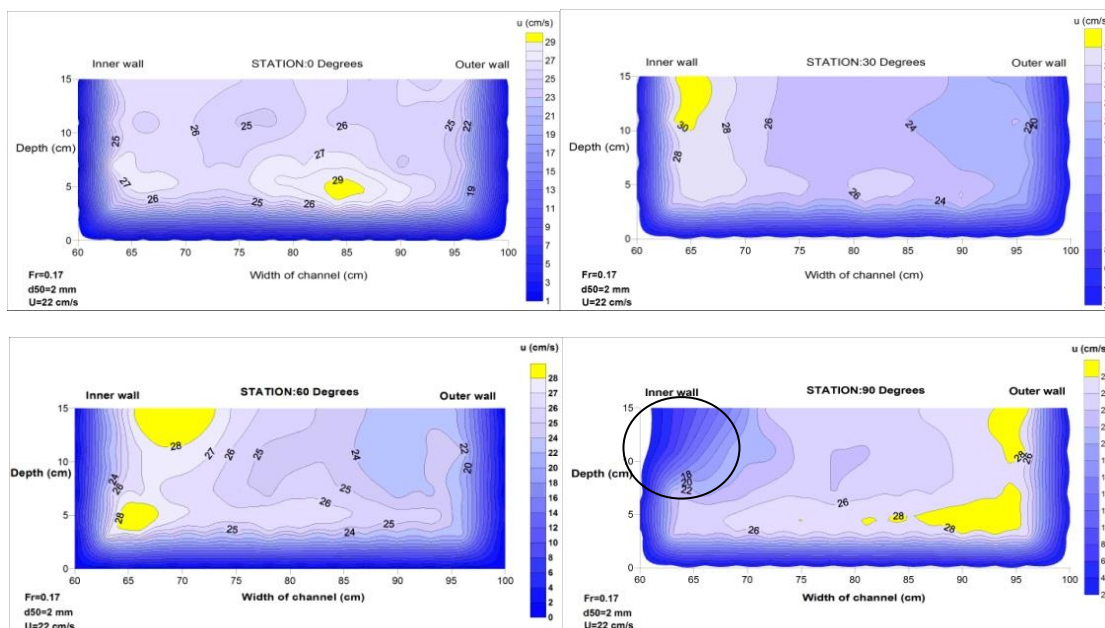
نتایج الگوی جریان ثانویه در مقاطع عرضی در طول قوس حاکی از آنند که در حالت کلی، تحت تأثیر انحنای قوس، جریانهای عرضی الگویی متفاوت را با مسیر مستقیم پیدا می‌کنند. شکل (۶) نشان می‌دهد که در ورودی قوس، جریان عرضی غالباً یکسویه و به سمت جداره‌ی خارجی بوده، که افزایش زبری باعث به وجود آمدن سلول چرخشی در میانه‌ی نهر شده است. هسته‌ی اصلی جریان ثانویه، که نزدیک جداره‌ی داخلی دیده می‌شود، به ازای هر سه زبری جداره در ناحیه‌ی ۶۰ درجه‌ی قوس شکل گرفته است. در موقعیت ۳۰ درجه، غالب جریان یکسویه بوده است، که با افزایش زبری در نواحی میانه‌ی نهر، و نزدیک کف سلولهای چرخشی نامنظم شکل گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که هسته‌ی اصلی سلول چرخشی جریان ثانویه در ناحیه‌ی ۶۰ تا ۹۰ درجه‌ی قوس نزدیک جداره‌ی داخلی باقی مانده است، که با افزایش زبری به علت کاهش نیمرخ سرعت نزدیک جداره به مقدار اندکی (۱۱ الی ۳ سانتی‌متر) از جداره‌ی داخلی دور شده است. با توجه به شکل (۶-الف)، به ازای زبری جداره‌ی ۰/۵ میلی‌متر در موقعیت ۹۰ درجه‌ی قوس، سلول چرخشی مستهلک شده و مجدداً جریان یکسویه به سمت جداره‌ی خارجی شکل گرفته است ولی در دو زبری جداره‌ی ۲ و ۵ میلی‌متر، سلول چرخشی تا موقعیت ۹۰ درجه همچنان وجود داشته و استهلاک آن به تأخیر افتاده است.

از فراسنجهای مورد بررسی دیگر این تحقیق قدرت جریانهای عرضی (ثانویه) بود. نتایج نشان می‌دهند که در هر سه زبری قبل از قوس، و تا حدود ۱۰ درجه‌ی قوس، قدرت جریان ثانویه روند کاهشی دارد. با توجه به شکل ۸ بیشترین مقدار قدرت جریان ثانویه در حوالی ۷۰ تا ۸۰ درجه‌ی قوس اتفاق افتاد، که این موضوع به علت انتقال جانبی اندازه‌ی حرکت به سمت جداره‌ی خارجی در این محدوده از قوس می‌باشد، که باعث تشدید جریانهای عرضی در این بازه می‌شود. در طول قوس همواره دو ناحیه با کمینه و بیشینه قدرت جریان ثانویه دیده شد. ناحیه‌ی دارای مینم قدرت جریان ثانویه معمولاً در ورودی قوس در محدوده‌ی صفر تا ۱۰ درجه‌ی قوس مشاهده شد. با توجه به شکل ۸، در یک مقطع عرضی با افزایش زبری جداره‌ی نهر، قدرت جریان ثانویه کاهش یافته است. دلیل این موضوع افزایش تلاطم جریان بر اثر افزایش زبری می‌باشد، که افزایش اندازه‌ی حرکت طولی نسبت به اندازه‌ی حرکت عرضی را به همراه خواهد داشت.

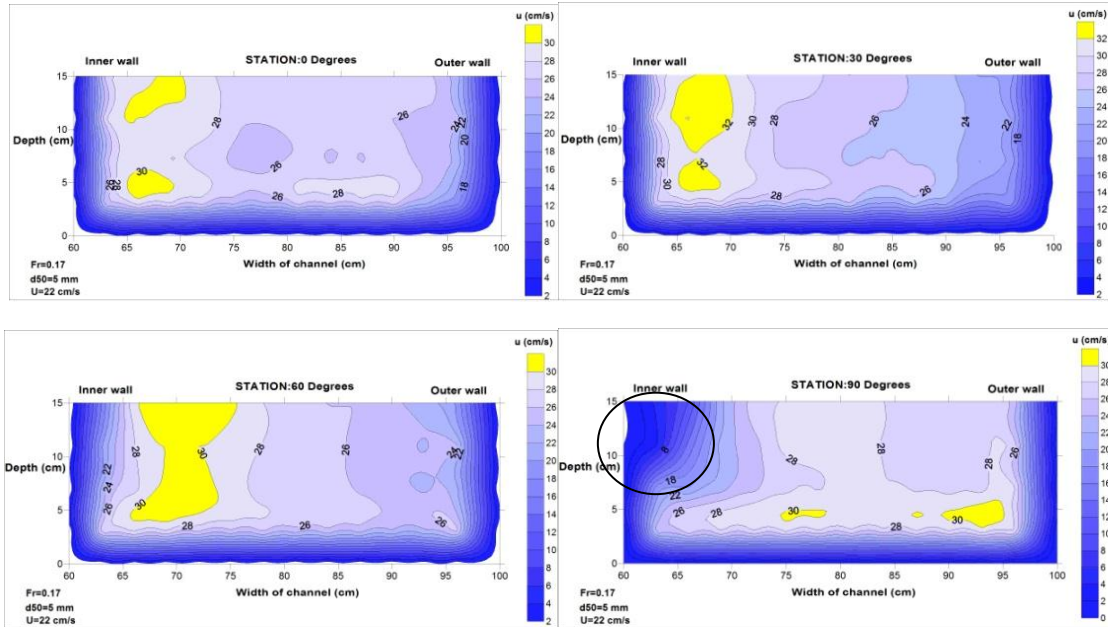
نتایج شکل (۷) نشان می‌دهند که توزیع کلی تنش برشی در طول قوس، و قبل و بعد از آن، از الگوی سرعت طولی جریان پیروی می‌کند، به این ترتیب که قبل از قوس تنش بیشینه نزدیک جداره‌ی خارجی بوده، که با نزدیک شدن به قوس به سمت دیواره‌ی داخلی کشیده شده که تا موقعیت ۷۰ درجه در مجاورت جداره‌ی داخلی باقی خواهد ماند. از موقعیت ۷۰ درجه به بعد از جداره داخلی به سمت میانه کشیده شده، که در موقعیت ۹۰ درجه بطور کامل در مجاورت جداره‌ی خارجی بوده، که تا مقطع اندازه‌گیری همچنان نزدیک جداره خارجی بوده است. با توجه به شکل (۷) می‌توان گفت که افزایش زبری جداره باعث افزایش تنش برشی بستر در کل محدوده‌ی اندازه‌گیری جریان شده است. در حالت کلی بیشینه و کمینه تنش به ازای همه آزمایش‌ها به ترتیب در موقعیت ۲۰ درجه و ۹۰ درجه‌ی قوس در ۳ سانتی‌متری جداره‌ی داخلی اتفاق افتاد. افزایش زبری جداره از ۰/۵ به ۵ میلی‌متر باعث افزایش تنش بیشینه، و همچنین کاهش تنش کمینه در دو موقعیت ۲۰ و ۹۰ درجه شده است.



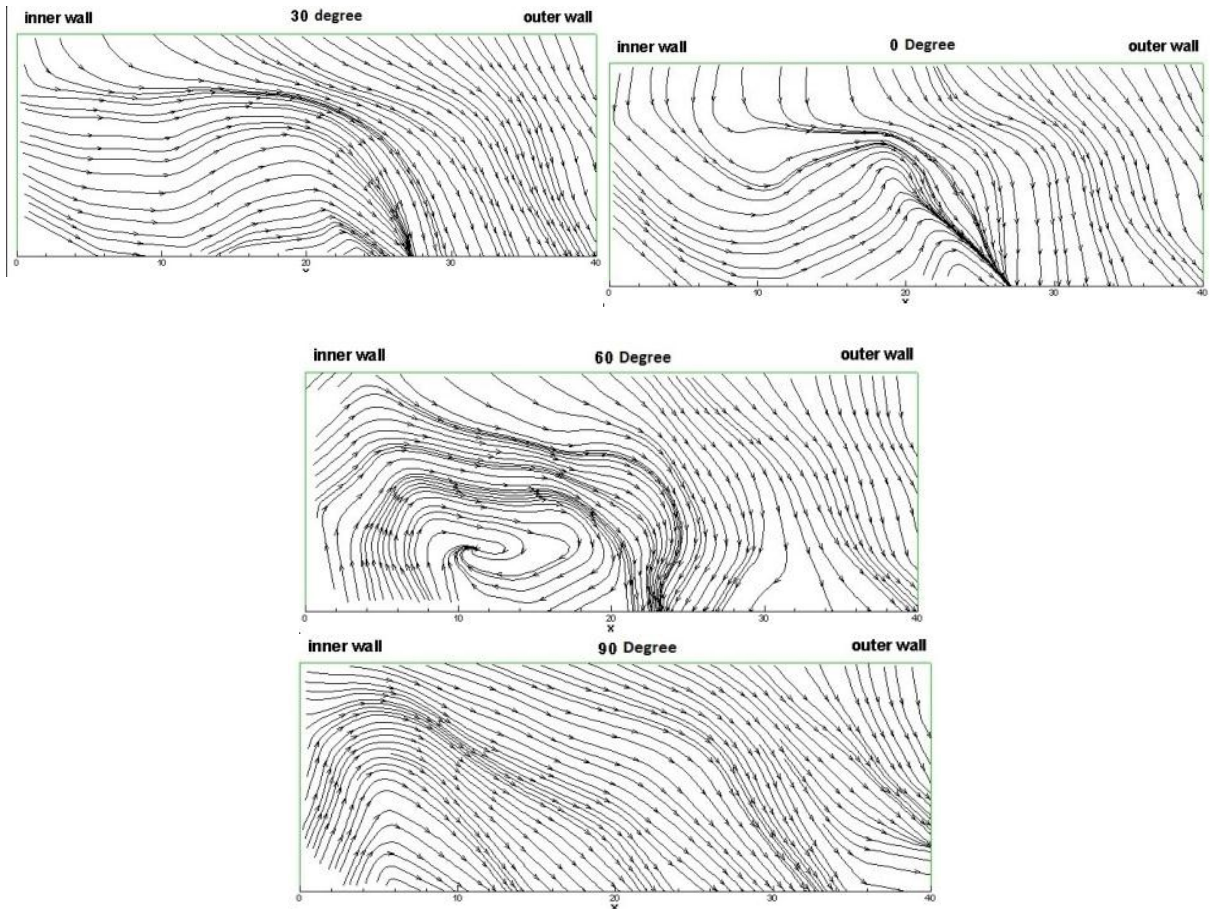
شکل ۵-الف - خطوط میزان منحنی سرعت جریان در مقاطع صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه‌ی قوس به ازای زبری جداره‌ی ۰/۵ میلی‌متر.



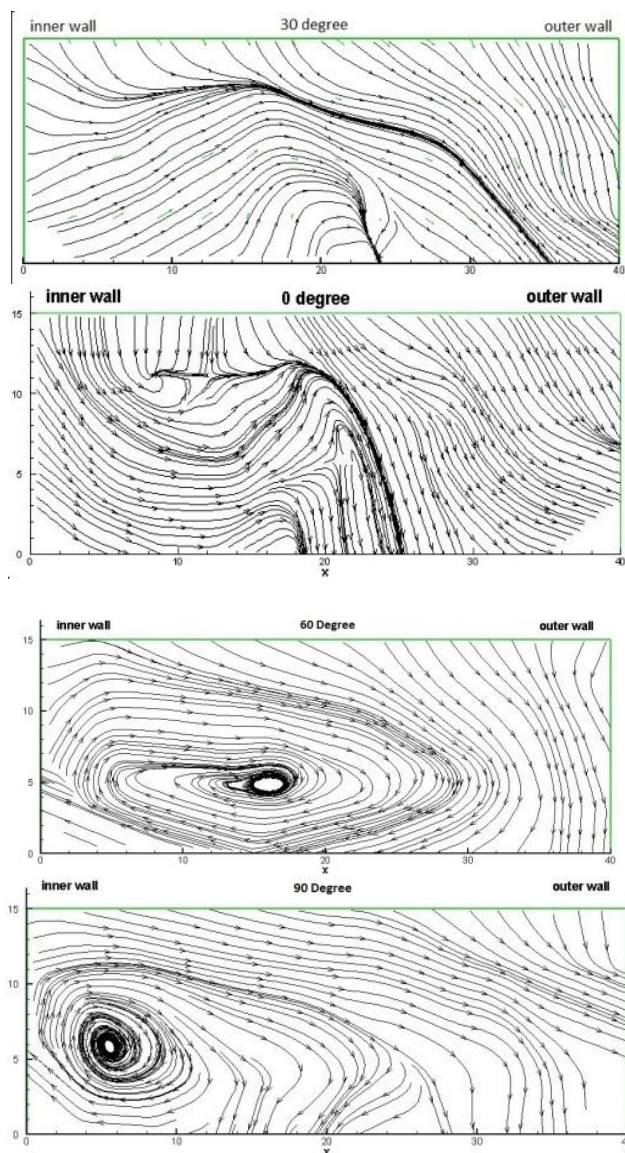
شکل ۵-ب - خطوط میزان منحنی سرعت جریان در مقاطع صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه‌ی قوس به ازای زبری جداره‌ی ۲ میلی‌متر.



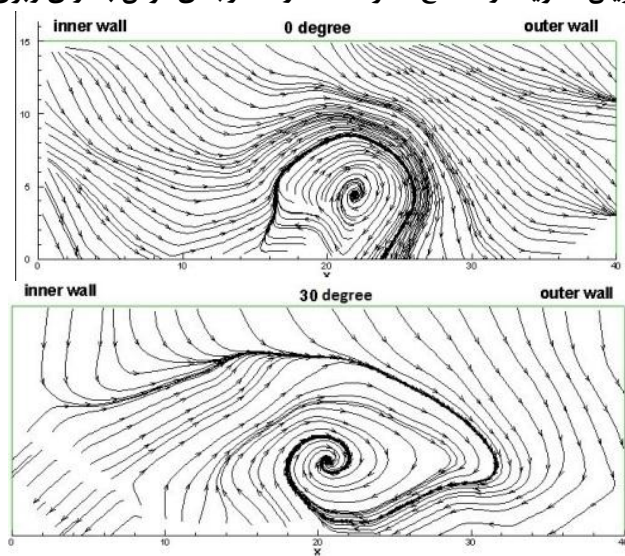
شکل ۵-ج- خطوط میزان منحنی سرعت جریان در مقاطع صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه‌ی قوس به ازای زبری جداره‌ی ۵ میلی‌متر.

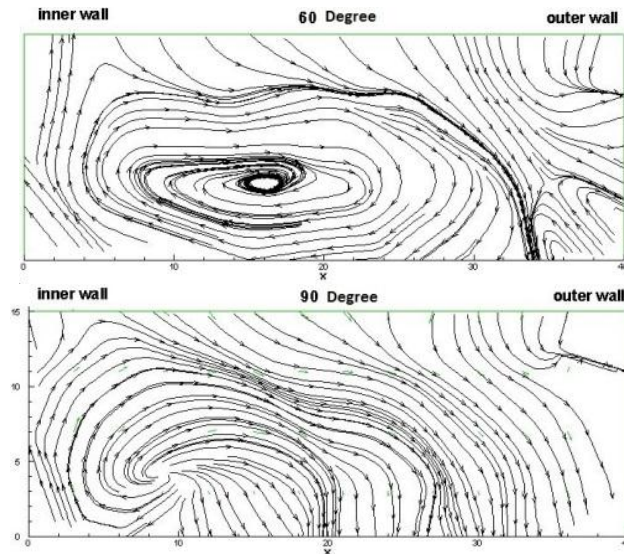


شکل ۶-الف- خطوط جریان ثانویه در مقاطع صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه‌ی قوس به ازای زبری جداره‌ی ۰/۵ میلی‌متر.

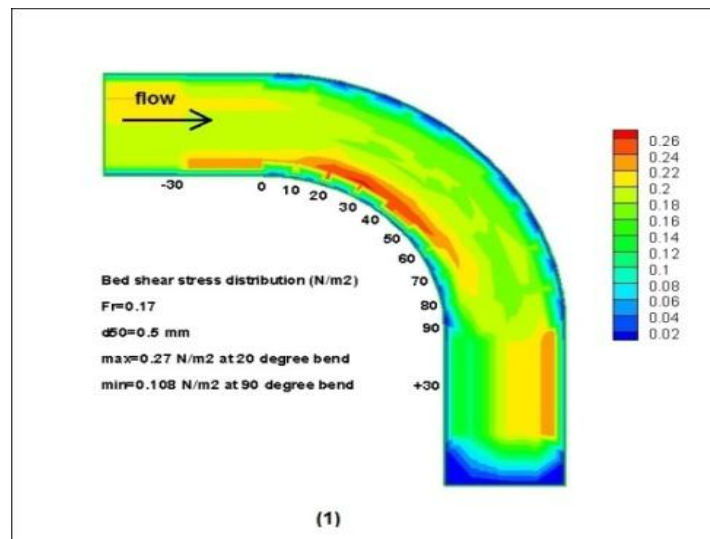


شکل ۶-ب- خطوط جریان ثانویه در مقاطع صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه‌ی قوس به ازای زبری جداره‌ی ۲ میلی‌متر.

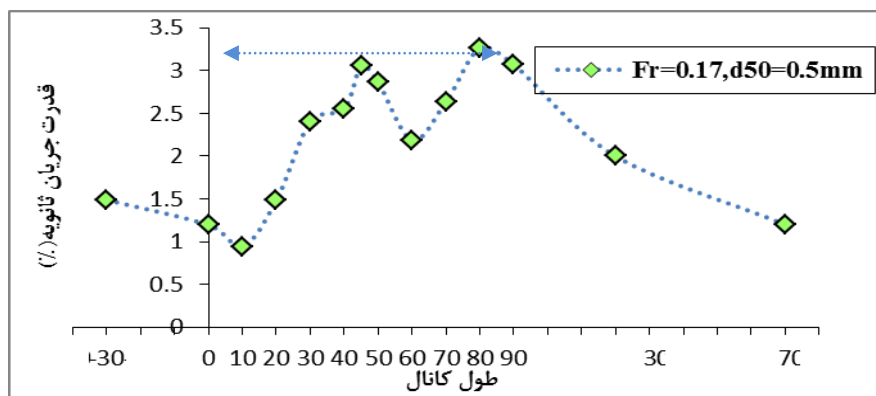




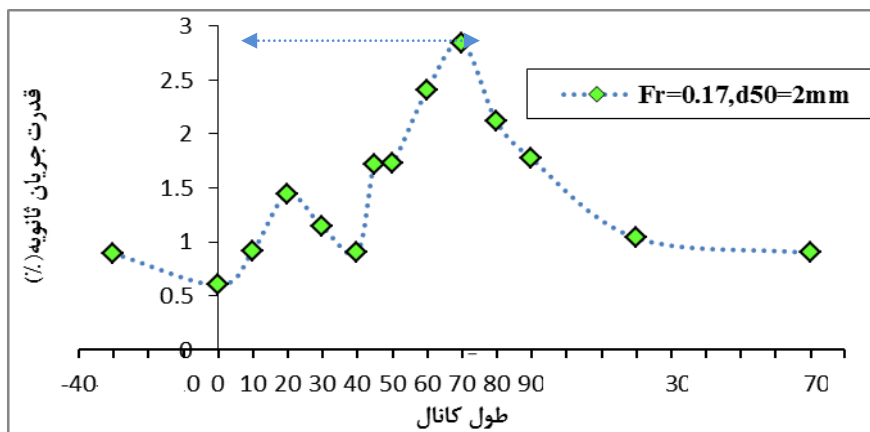
شکل ۶-ب- خطوط جریان ثانویه در مقاطع صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه‌ی قوس به ازای زبری جداره‌ی ۵ میلی‌متر.



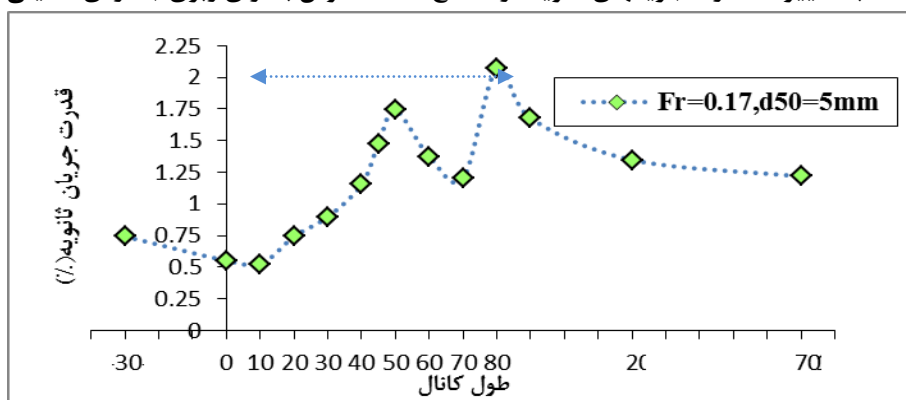
شکل ۷- توزیع تنش برشی بستر به ازای عدد فرود ۰/۱۷



شکل ۸-الف- تغییرات قدرت جریانهای ثانویه در مقاطع مختلف قوس به ازای زبری جداره‌ی ۵ میلی‌متر.



شکل ۸-ب- تغییرات قدرت جریانهای ثانویه در مقاطع مختلف قوس به ازای زبری جداره‌ی ۲ میلی‌متر.



شکل ۸-ج- تغییرات قدرت جریانهای ثانویه در مقاطع مختلف قوس به ازای زبری جداره‌ی ۵ میلی‌متر.

شکل گرفته است، ولی در دو زبری جداره‌ی ۲ و ۵ میلی‌متری سلول چرخشی تا موقعیت ۹۰ درجه همچنان وجود داشته، و استهلاک آن به تأخیر افتاده است.

نتایج ذکر شده در این تحقیق، با نتایج قدسیان و همکاران (۱۳۸۷) و سوزه پور و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارند.

قدردانی

هزینه‌های این تحقیق از محل پژوهانه‌ی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز پرداخت شده است که نگارنده مراتب سپاس و قدردانی خود را ابراز می‌دارد.

منابع

1. Nezu, I, and W. Rodi. 1985. Experimental study on secondary currents in a straight channel flow and the relation to its aspect ratio. 21st IHAR Congress. Melbourne, Australia Vol. 2: 19-23.

خلاصه نتایج

۱. در نزدیکی سطح آب، خطوط جریان به سمت قوس خارجی و در نزدیکی کف به سمت قوس داخلی می‌باشد.
۲. بیشترین سرعت در موقعیت ۳۰ و ۶۰ درجه نزدیک دیوار داخلی، و در موقعیت ۹۰ درجه نزدیک به دیوار خارجی می‌باشد.
۳. در ورودی قوس (موقعیت صفر درجه) جریان عرضی غالباً یکسویه و به سمت جداره‌ی خارجی بوده، که افزایش زبری باعث به‌وجود آمدن سلول چرخشی در میانه‌ی نهر شده است.
۴. هسته‌ی اصلی جریان ثانویه، که نزدیک جداره‌ی داخلی دیده می‌شود، به ازای هر سه زبری جداره در ناحیه‌ی ۶۰ درجه‌ی قوس شکل گرفته است.
۵. به ازای زبری جداره‌ی ۰/۵ میلی‌متری در موقعیت ۹۰ درجه‌ی قوس، سلول چرخشی مستهلک شده و مجدداً جریان یکسویه به سمت جداره‌ی خارجی

2. Knight, D. W., and H. S. Patel. 1985. Boundary shear in smooth rectangular duct. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 111: 29-35.
3. Tominaga, A, and I. Nezu. 1989. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flow with varying boundary-roughness. *Proc. 3rd Asian Cong. Fluid Mech. Tokyo*: p 608-611.
4. Anvar, H. 1986 . Turbulent structure in a river bend. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 112:657-669.
۵. محمودی وانعلیا، م. ۱۳۷۷. بررسی الگوی جریان در پیچان رودها با استفاده از مدل فیزیکی و مقایسه آن با مدل ریاضی. عمران آب. دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف.
۶. صفروپور، م.، ا. امیری تکلدانی، م. ابوالقاسمی، و ع. هورفر. ۱۳۸۷. مطالعه برخی از پارامترهای هیدرولیکی جریان در مجاری روباز انحنا دار. *مجله آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی*. جلد ۲۲. شماره ۲.
۷. قدسیان، م.، م. واقفی، و ن. پناه پور. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه. مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران.
۸. تائبی، ح.، م. شفاعی بجستان، و م. کاهه. ۱۳۸۸. شبیه سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدل C.CHE. مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهیدچمران اهواز.
۹. قدو، ی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری دیواره کانال روی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه تند. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۰. سوزه پور، ی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری کف کانال روی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه تند. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

