

## بررسی آزمایشگاهی تاثیر زبری جداره کانال بر روی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه تند

یوسف قدو<sup>۱\*</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>۳</sup> و عزیز سوزه پور<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

[yghado@yahoo.com](mailto:yghado@yahoo.com)

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۴

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۱۱

### چکیده

تحقیق حاضر به منظور بررسی تاثیر زبری جداره کانال بر روی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه تند با نسبت شعاع انحنا خط مرکزی به عرض ۲ و مقطع عرضی مستطیلی انجام شد. آزمایش ها در دو شرایط مختلف جریان با اعداد فرود ۰/۱۷ و ۰/۴ و دو اندازه زبری ۰/۵ و ۵ میلی متر انجام گرفت. در هر آزمایش و در طول قوس مولفه های سه بعدی سرعت جریان در ۵۷۶ نقطه اندازه گیری شد. ترسیم بردارهای سرعت و الگوی جریان با استفاده از نرم افزارهای SURFER و TECPLOT انجام گرفت. نتایج نشان داد که ناحیه حداکثر سرعت در ابتدا سمت جداره داخلی بوده و سپس به تدریج به سمت جداره خارجی جابجا شده به طوری که در انتهای پیچ کاملاً در نزدیکی جداره خارجی می باشد. همچنین با مقایسه الگوی جریان در دو زبری نتایج نشان داد که با افزایش زبری قدرت جریان های ثانویه کاهش و به تعداد سلول های چرخشی با قدرت کمتر افزوده می شود. در حالت کلی می توان گفت در قوس تند تا مقطع ۷۰ درجه، ناحیه با تنش برشی زیاد نزدیک جداره داخلی بوده و از ۷۰ درجه به پایین دست به طرف جداره بیرونی قوس کشیده می شود. همچنین افزایش زبری جداره باعث افزایش تنش برشی حداکثر و کاهش تنش برشی حداقل شده است. محل تشکیل بیشترین و کمترین مقدار تنش برشی در دو زبری ۰/۵ و ۵ میلی متر به ترتیب ۲۰ درجه و ۹۰ درجه قوس بود که در زبری ۰/۵ میلی متر به ترتیب برابر ۱/۴۷ و ۰/۵۴ نیوتن بر متر مربع و در زبری ۵ میلی متر به ترتیب برابر ۲/۲ و ۰/۴۶ نیوتن بر متر مربع بوده است.

کلید واژه ها: قوس تند، زبری بدنه، سلول چرخشی، تنش برشی.

### مقدمه

ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز بر آب وارد می شود که باعث می گردد شیب عرضی در سطح آب از قوس داخلی به سمت قوس خارجی تشکیل شود. این امر باعث به هم خوردن تعادل دینامیکی در قوس می شود. برای جبران این عدم تعادل به دلیل افزایش رقوم سطح آب در قوس خارجی، یک گرادیان عرضی فشار نیز در داخل مقطع بر سطح آب اعمال می گردد. گرادیان عرضی به وجود آمده نیرویی در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز به آب اعمال می کند. این نیروی مقابله کننده که بر تمام ذرات آب وارد می شود برای ذرات موجود در یک امتداد قائم مقداری یکسان دارد و مقدار آن متناسب با میانگین توان دوم سرعت المان های آن امتداد قائم

از نقطه نظر ویژگی های مورفولوژیکی، در شرایط طبیعی، رودخانه ها به ندرت دارای مسیر مستقیم بوده و معمولاً دارای پیچ و خم های متعددی می باشند که این امر باعث ایجاد پیچیدگی های فراوان در بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در آنها می شود. قوس رودخانه به خاطر داشتن الگوی جریان خاص بنام جریان حلزونی همواره مورد توجه مهندسين هیدرولیک بوده است. جریان حلزونی به حرکت مارپیچی ذرات آب که در جهت کلی جریان آب حرکت می کنند، گفته می شود و چنین استنباط می گردد که علاوه بر مولفه کلی سرعت در جهت عمود بر سطح مقطع جریان مولفه های دیگری از سرعت وجود دارند که بر مقطع جریان عمود نیستند. با

می‌باشد. از طرفی به علت توزیع نامتقارن سرعت در امتداد مماس بر خطوط جریان در داخل خم (به واسطه وجود مقاومت در بستر کانال) ذرات آب در نزدیکی سطح با سرعت بیشتری نسبت به سرعت میانگین و ذرات نزدیک بستر با سرعت کمتر نسبت به سرعت میانگین حرکت می‌کنند در حالی که مقدار نیروی گریز از مرکز متناسب با سرعت جریان در امتداد مماسی بوده و برای هر ذره در امتداد قائم مقدار متفاوتی دارد. در نتیجه برای ذرات آبی که سرعت آنها بیشتر از سرعت میانگین است برآیند دو نیروی مذکور به سمت دیواره خارجی و برای ذرات نزدیک بستر به سمت دیواره داخلی می‌باشد. در نتیجه ترکیب این دو نیرو منجر به القاء یک توزیع ثانویه سرعت در امتداد شعاع می‌شود (۷). رزوسکی<sup>۱</sup> نتیجه گرفت این پدیده باعث ایجاد جریانی در جهت عرضی موسوم به جریان ثانویه می‌شود که در اثر این جریان ذرات موجود در سطح آب به طرف دیواره بیرونی حرکت کرده و ذرات موجود در کف به طرف دیواره داخلی جابجا می‌شوند (۸). با توجه به پیچیدگی جریان در قوس‌ها و از طرفی به دلیل فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس‌ها که عامل اصلی آن الگوی توزیع جریان می‌باشد، شناخت دقیق شرایط جریان در محل خم‌ها مورد توجه محققین هیدرولیک بوده است. انور<sup>۲</sup> نیز با اندازه‌گیری سه بعدی سرعت در قوس رودخانه‌ای کوچک در انگلیس با شعاع داخلی ۱۹ متر، ساختار آشفتگی و تنش‌های برشی و نرمال و توزیع سرعت‌های طولی و به وجود عرضی را بررسی کرد. او نتیجه گرفت که الگوی سرعت در ورودی قوس به شعاع قوس بستگی ندارد ولی در خروجی قوس، تأثیر الگوی جریان ثانویه به پایین دست قوس منتقل می‌شود و این به این معنی است که الگوی جریان در پایین دست قوس تحت تأثیر شعاع انحنا قوس می‌باشد (۹).

شفاعی بجستان و نظری با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی از قوس ۹۰ درجه همگرا به بررسی شرایط جریان در این قوس پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که حداکثر سرعت در نزدیکی ساحل درونی است و توسعه جریان ثانویه از زاویه حدود ۴۰ درجه شروع و تا نزدیکی‌های زاویه ۶۰ درجه به حداکثر می‌رسد (۳). قدسیان تأثیر قدرت گردابه و قدرت جریان عرضی بر فرآیند آبستنگی در اطراف آبسکن در موقعیت‌های مختلف در قوس و در قوس‌های تند و ملایم ۹۰ درجه را بررسی کرد (۴). شبیه‌سازی عددی هیدرولیک جریان در خم ۹۰ درجه همگرا با مدل SSIIM توسط بازرگانی لاری و همکاران صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد بیشترین میزان فرسایش از موقعیت ۶۰ درجه شروع و تا انتهای قوس ادامه داشت (۵). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بیشتر تحقیقات انجام شده در قوس‌های ملایم و با کمک مدل‌های عددی انجام شده است. در تحقیق حاضر هدف اصلی بررسی الگوی جریان در قوس تند ۹۰ درجه به کمک مدل فیزیکی می‌باشد. همچنین از اهداف دیگر این مطالعه بررسی تأثیر زبری دیواره‌ها بر جابجایی و تغییر توزیع تنش برشی دیواره و بستر می‌باشد که می‌تواند منجر به ایده‌های کاربردی در رابطه با روش‌های کنترل فرسایش و رسوب‌گذاری گردد.

### مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر کانال آزمایشگاهی خمیده با نسبت شعاع انحنا 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 کانال ۴۰ سانتی‌متر، شعاع داخلی ۶۰ سانتی‌متر و شعاع خارجی ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. طول راستای مستقیم کانال در بالادست و پایین دست به ترتیب ۴ و ۲ متر می‌باشد. جداره کانال از جنس پلکسی گلاس و کف بتنی با  $n=0.011$  می‌باشد. شیب فلوم تقریباً صفر در نظر گرفته شد که در این شرایط جریان تحت تأثیر هد بالادست در محل ورود جریان به فلوم قرار دارد. سرعت‌های طولی و عرضی جریان برای دبی‌های مختلف با استفاده از سرعت‌سنج JFE ALEC با فرکانس ۲۰ اندازه‌گیری شد. مدت زمان ثبت سرعت‌ها برای هر نقطه بسته به موقعیت نقطه ۵ تا ۲۰

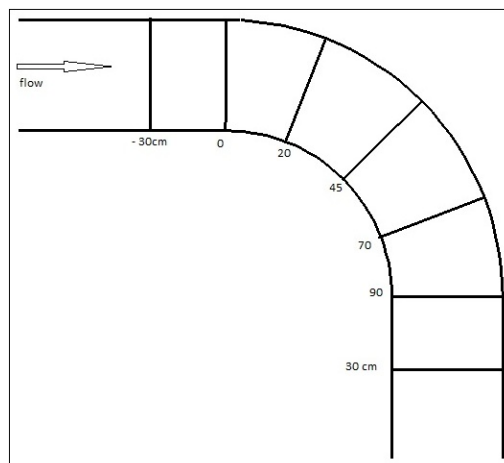
می‌باشد. از طرفی به علت توزیع نامتقارن سرعت در امتداد مماس بر خطوط جریان در داخل خم (به واسطه وجود مقاومت در بستر کانال) ذرات آب در نزدیکی سطح با سرعت بیشتری نسبت به سرعت میانگین و ذرات نزدیک بستر با سرعت کمتر نسبت به سرعت میانگین حرکت می‌کنند در حالی که مقدار نیروی گریز از مرکز متناسب با سرعت جریان در امتداد مماسی بوده و برای هر ذره در امتداد قائم مقدار متفاوتی دارد. در نتیجه برای ذرات آبی که سرعت آنها بیشتر از سرعت میانگین است برآیند دو نیروی مذکور به سمت دیواره خارجی و برای ذرات نزدیک بستر به سمت دیواره داخلی می‌باشد. در نتیجه ترکیب این دو نیرو منجر به القاء یک توزیع ثانویه سرعت در امتداد شعاع می‌شود (۷). رزوسکی<sup>۱</sup> نتیجه گرفت این پدیده باعث ایجاد جریانی در جهت عرضی موسوم به جریان ثانویه می‌شود که در اثر این جریان ذرات موجود در سطح آب به طرف دیواره بیرونی حرکت کرده و ذرات موجود در کف به طرف دیواره داخلی جابجا می‌شوند (۸). با توجه به پیچیدگی جریان در قوس‌ها و از طرفی به دلیل فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس‌ها که عامل اصلی آن الگوی توزیع جریان می‌باشد، شناخت دقیق شرایط جریان در محل خم‌ها مورد توجه محققین هیدرولیک بوده است. انور<sup>۲</sup> نیز با اندازه‌گیری سه بعدی سرعت در قوس رودخانه‌ای کوچک در انگلیس با شعاع داخلی ۱۹ متر، ساختار آشفتگی و تنش‌های برشی و نرمال و توزیع سرعت‌های طولی و به وجود عرضی را بررسی کرد. او نتیجه گرفت که الگوی سرعت در ورودی قوس به شعاع قوس بستگی ندارد ولی در خروجی قوس، تأثیر الگوی جریان ثانویه به پایین دست قوس منتقل می‌شود و این به این معنی است که الگوی جریان در پایین دست قوس تحت تأثیر شعاع انحنا قوس می‌باشد (۹).

محمودی و انعلیا در مورد الگوی جریان در پیچانرودها با استفاده از مدل فیزیکی و مقایسه آن با مدل ریاضی در دانشگاه صنعتی شریف تحقیق نمود. ایشان با مقیاس کردن مشخصات یکی از قوس‌های ۹۰ درجه کارون مدلی با مقیاس ۱:۵۰ با کف بتنی طراحی نمود. وی نتیجه گرفت که توزیع سرعت طولی در طول قوس

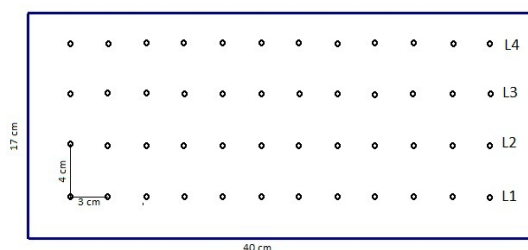
- 1- Rozovskii
- 2- Anvar
- 3- Odgaard and Bergs

برداشت داده‌ها در قوس به صورت قطبی ( $U_r, U_\theta$ ) انجام گرفت که برای تبدیل مختصات قطبی به دکارتی از روابط زیر استفاده گردید (شکل ۲). برای زبر کردن جداره کانال از ماسه دانه‌بندی شده با دو قطر با اندازه‌های متوسط  $0/5$  و  $5$  میلی‌متر استفاده شد. ماسه‌ها با استفاده از چسب آهن روی کف پوش چسبانده شده (شکل ۳) سپس کف پوش در قوس طوری قرار گرفت که محدوده مورد بررسی به طور کامل تحت تأثیر زبری جداره باشد (شکل ۴). بعد از اینکه جداره زبر شد دبی مورد نظر در کانال جریان یافته و سطح آب در عمق  $17$  سانتی‌متر ثابت شد. زمان انجام هر آزمایش از  $6$  تا  $9$  ساعت متغیر بود.

ثابته بوده است. آزمایش‌ها در دو دبی  $15$  (فرود  $0/17$ ) و  $35$  (فرود  $0/4$ ) لیتر در ثانیه با عمق ثابت  $17$  سانتی‌متر صورت گرفت. جهت تنظیم عمق از دریچه واقع در پایین دست کانال استفاده شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز مثلثی مجهز به اشل واقع در پایین دست کانال و رابطه دبی اشل استفاده شد. قوس کانال به پنج مقطع عرضی به ترتیب صفر،  $20$ ،  $45$ ،  $70$ ،  $90$  درجه (شکل ۱-الف)، هر مقطع شامل  $12$  نقطه عرضی تقسیم شد. به منظور مقایسه شرایط با مسیر مستقیم در  $30$  سانتی‌متری بالادست و پایین دست قوس نیز سرعت جریان اندازه‌گیری شد. همچنین جهت بررسی عمقی شرایط جریان، اندازه‌گیری‌ها در  $4$  لایه به ترتیب از کف  $3$ ،  $7$ ،  $11$  و  $15$  سانتی‌متر برداشت شد (شکل ۱-ب).

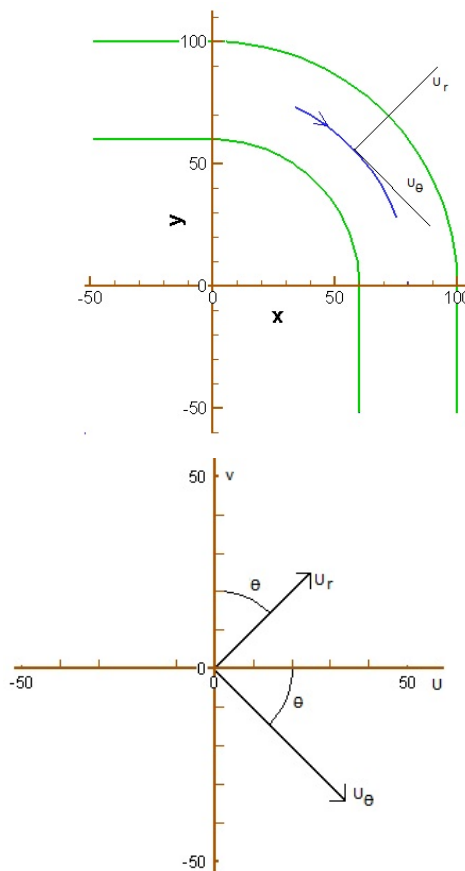


الف

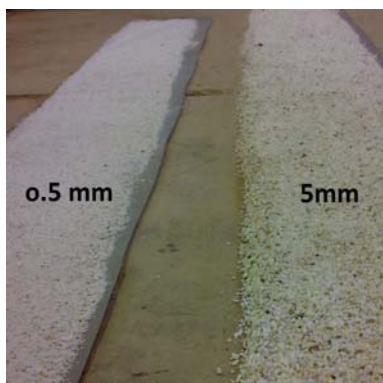


ب

شکل ۱-الف: پلان قوس و مقاطع عرضی مورد آزمایش، ب: مقطع عرضی و آرایش نقاط اندازه‌گیری سرعت جریان و موقعیت لایه‌ها



شکل ۲- موقعیت  $U_\theta$  و  $U_r$  و چگونگی تبدیل آنها به  $U$  و  $V$  ، واحد مکان بر حسب سانتی متر و واحد سرعت سانتی متر بر ثانیه می باشد.



شکل ۳- ماسه ها به وسیله چسب آهن مطابق شکل روی کف پوش چسبانده شد.

$$r = r' + \Delta h \tag{۳} \quad U = U_\theta \cos \theta + U_r \sin \theta \tag{۱}$$

$$x = r \sin \theta \tag{۴} \quad V = U_\theta \sin \theta - U_r \cos \theta \tag{۲}$$

$$y = r \cos \theta \quad (۵)$$

یکنواخت بوده که این موضوع در هر چهار آزمایش (دبی‌های ۱۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه وزبری ۰/۵ و ۵ میلی‌متر) دیده شد. همچنین تغییرات سرعت‌های عرضی و عمقی، گسترش و کاهش جریان‌های ثانویه را در قوس ۹۰ درجه نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ناحیه حداکثر سرعت ابتدا در جداره داخلی بوده و سپس به تدریج به سمت جداره خارجی حرکت کرده به طوری که در انتهای پیچ کاملاً در نزدیکی جداره خارجی می‌باشد. این تغییرات در لایه‌های مختلف متفاوت است (شکل ۵ و ۶). پروفیل‌های عرضی سرعت جریان برای هر چهار آزمایش در لایه‌های مختلف در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود.

در این روابط:

$\Delta h$ : فاصله نقطه اندازه‌گیری از دیواره داخلی (cm)

$U_r$  و  $U_\theta$ : سرعت‌های دو بعدی در مختصات قطبی

$U$  و  $V$ : سرعت‌های دو بعدی در مختصات دکارتی

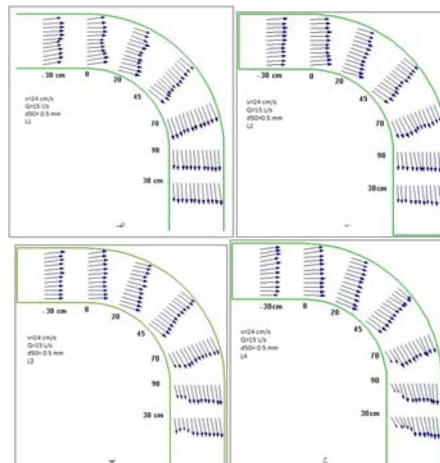
$r$ : شعاع قوس داخلی (60 cm)

### تحلیل نتایج

با توجه به شکل قوس و انحنای مسیر جریان ذرات جریان و در نهایت خود جریان تحت تأثیر انحنای مسیر قرار می‌گیرد که این پدیده باعث می‌شود سرعت‌های طولی در مقطع عرضی غیر

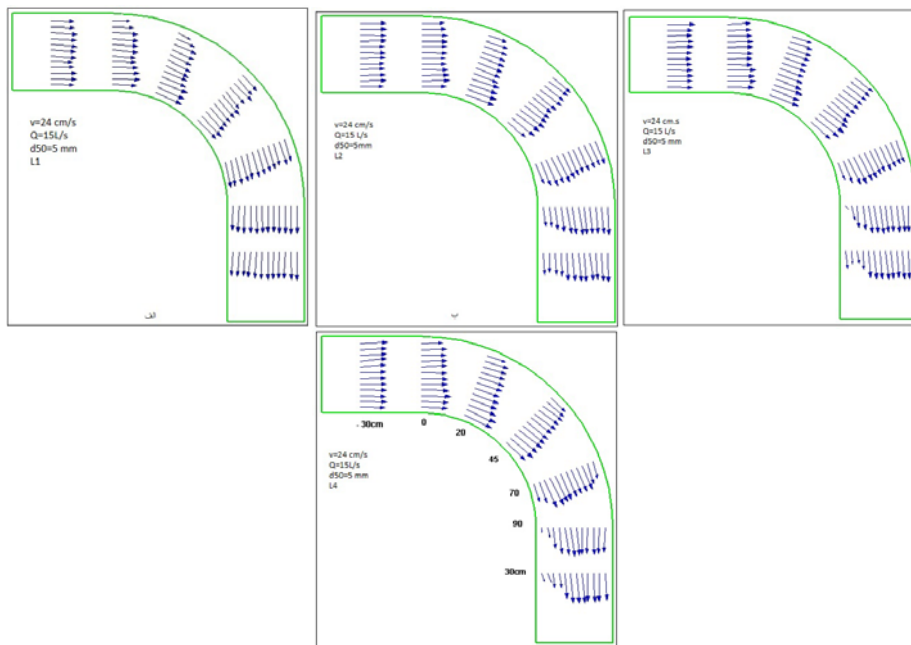


شکل ۴- نمایی از قوس و ذرات ماسه چسبانده شده به دیوار کانال



شکل ۵- بردارهای سرعت جریان الف: ۳ سانتی متری از کف (L1) - ب: ۷ سانتی متری از کف (L2) -

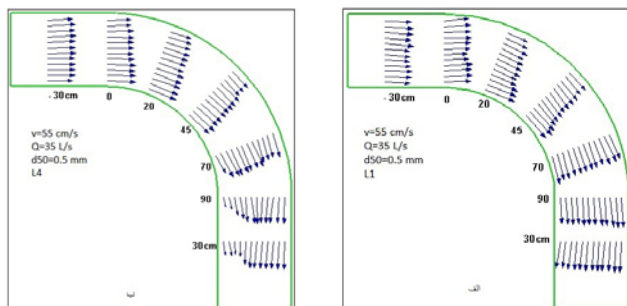
پ: ۱۱ سانتی متری از کف (L3) - ج: نزدیک سطح آب (L4) برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه وزبری ۰/۵ میلی‌متر



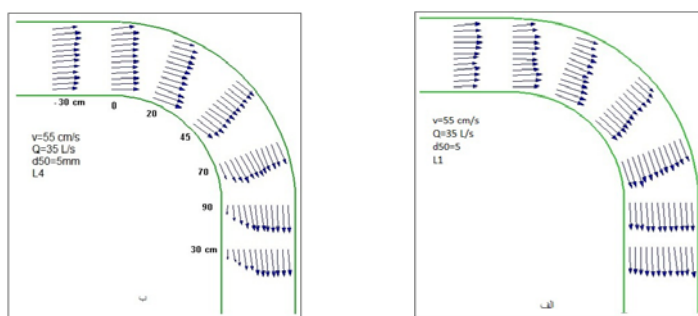
شکل ۶- بردارهای سرعت جریان در الف: ۳ سانتی متری از کف (L1) - ب: ۷ سانتی متری از کف (L2) پ: ۱۱ سانتی متری از کف (L3) - ج: نزدیک سطح آب (L4) برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و زبری ۵ میلی متر

شکل باقی خواهد ماند. نتایج نشان می‌دهد که از موقعیت ۴۵ درجه به بعد تغییرات بردارهای سرعت در لایه‌های مختلف در جهت عکس این تغییرات در بالادست می‌باشد. توجه به بردارهای سرعت در موقعیت‌های ۷۰ و ۹۰ درجه مبین این واقعیت هستند که در هر دو زبری تغییرات سرعت جریان در نزدیک کف کانال (L1) تقریباً یکنواخت بوده و در لایه‌های فوقانی این یکنواختی از بین می‌رود. می‌توان گفت در لایه نزدیک به سطح آب (L4) تغییرات کاملاً غیر یکنواخت بوده به طوری که در نقاط نزدیک به جداره داخلی افت شدید سرعت را خواهیم داشت (شکل ۵-ج و شکل ۶-ج). شایان ذکر است که شدت این تغییرات در موقعیت ۷۰ و ۹۰ درجه در زبری ۵ میلی متر بیشتر از زبری ۰/۵ میلی متر است. آزمایش فوق در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه (فرود ۰/۴) انجام شد که نتایج مشابه نتایج آزمایش در ۱۵ لیتر بر ثانیه (فرود ۰/۱۷) بود. شکل‌های (۷) و (۸) نتایج این آزمایش را در دو لایه نزدیک سطح آب و نزدیک کف در هر دو زبری نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) و (۷) و (۸) می‌توان گفت که در لایه فوقانی از ۷۰ درجه به بعد خط حداکثر سرعت متمایل به جداره خارجی بوده و تا انتهای کانال تقریباً بدون تغییر می‌ماند. علت این امر آن است که پروفیل‌های سرعت در مقاطع عرضی واقع در نیمه دوم قوس به حالت توسعه یافته رسیده و مقادیر سرعت بین دو مقطع تغییر چندانی ندارد.

نمودار شکل‌های (۵) و (۶) از مقادیر آزمایشگاهی سرعت‌های عرضی و طولی جریان به دست آمده‌اند. هر بردار معرف برآیند سرعت عرضی و طولی در آن نقطه می‌باشد. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد الگوی کلی جریان برای هر دو زبری ثابت می‌باشد. تغییرات سرعت جریان در لایه اول (L1) در هر دو حالت (۰/۵ و ۵ میلی متر) تقریباً شبیه به هم بوده با این تفاوت که در نزدیک جداره‌ها تحت تأثیر زبری بیشتر (۵ میلی متر) مقادیر سرعت با کاهش نسبی همراه بوده است. همچنین در ورودی قوس (صفر درجه) خطوط جریان در زبری ۰/۵ میلی متر به سمت جداره خارجی متمایل بوده که در زبری ۵ میلی متر تقریباً عمود بر راستای شعاع قوس می‌باشند. این موضوع بیانگر این است که سرعت‌های عرضی در ورودی قوس تحت تأثیر زبری دیواره می‌باشند که این حالت در دیگر لایه‌ها نیز مشاهده شد. شکل (۵) برای ۲۰ درجه قوس در تمام لایه‌ها افزایش سرعت در جداره داخلی و کاهش آن را در جداره خارجی نشان می‌دهد که این تغییرات در لایه نزدیک کف غیر یکنواخت (شکل ۵-الف) و برای لایه‌های فوقانی یکنواختی این تغییرات بیشتر می‌شود (شکل ۵-ب-پ-ج). با توجه به بردارهای سرعت جریان در موقعیت ۲۰ درجه قوس در شکل (۶) برای زبری ۵ میلی متر روند افزایش سرعت در جداره داخلی همانند زبری ۰/۵ میلی متر از کف به سطح یکنواخت تر می‌شود. این تغییرات تا زاویه ۴۵ درجه که رأس قوس است به همین



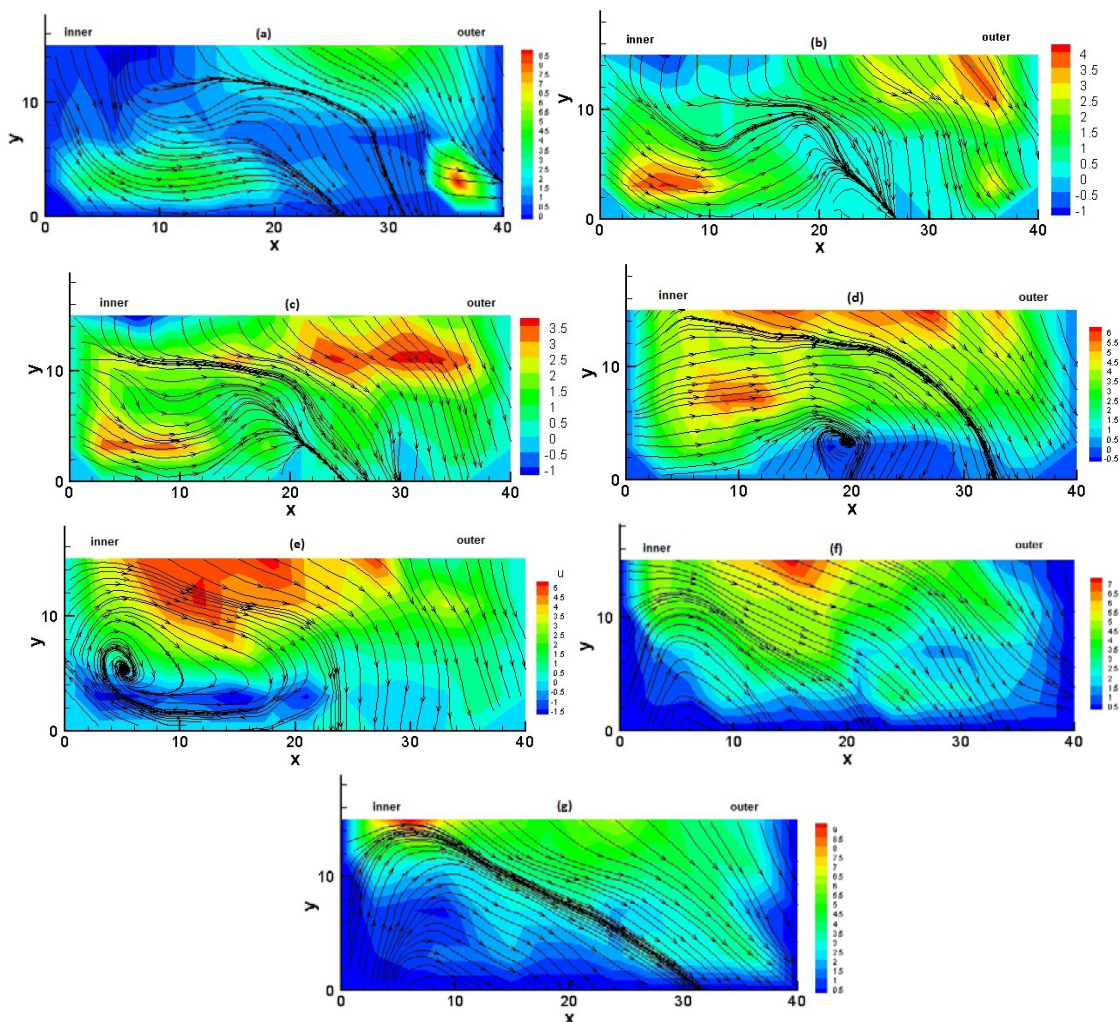
شکل ۷- بردارهای سرعت جریان الف: ۳ سانتی متری از کف (L1)-ب: نزدیک سطح آب (L4) برای دبی ۳۵ (فرود ۰/۴) لیتر بر ثانیه و زبری ۰/۵ میلی متر.



شکل ۸- بردارهای سرعت جریان در الف: ۳ سانتی متری از کف (L1) و-ب: نزدیک سطح آب (L4) برای دبی ۳۵ (فرود ۰/۴) لیتر بر ثانیه و زبری ۵ میلی متر

با پیشروی جریان در کانال، گرادیان فشار ناشی از انحنای قوس و خیزاب، کم کم قدرت گرفته و سلول چرخشی جریان ثانویه شکل می‌گیرد که این پدیده در شکل (d-۹) دیده می‌شود. شکل (d-۹) نشان دهنده جریان چرخشی شکل گرفته در مقطع ۴۵ درجه است. در این مقطع، سلول چرخشی شکل گرفته و به صورت یک جریان چرخشی در لایه‌های نزدیک به کف مقطع عرضی خود را نشان می‌دهد. از مقطع ۴۵ درجه و در جهت پایین دست به شدت و وسعت سلول چرخشی جریان ثانویه افزوده می‌شود (نواحی با رنگ تیره تر). در مقطع ۷۰ درجه علاوه بر اینکه در نیمه داخلی قوس جریان حلزونی شکل گرفته با توجه به ناحیه تیره رنگ می‌توان گفت توزیع سرعت‌های عرضی و عمقی در این ناحیه و لایه‌های سطح آب از مقدار بیشتری (حداکثر پنج برابر) نسبت به دیگر نواحی برخوردار است. از مقطع ۸۰ درجه به پایین تر می‌توان گفت که بردارهای سرعت جریان عرضی به سمت یک سویه شدن می‌روند که این موضوع با توجه به شکل‌های (f-۹) و (g-۹) قابل توجیه می‌باشد. مقایسه دو شکل (۹) و (۱۰) در مقاطع

جهت بررسی الگوی عمقی جریان در مقاطع مختلف قوس سرعت‌های عرضی و عمقی در چهار لایه برداشت شد. نتایج این آزمایش در فرود ۰/۱۷ و زبری ۰/۵ به صورت زیر می‌باشد. ترکیب نیروهای گریز از مرکز و گرادیان طولی فشار باعث ایجاد یک توزیع ثانویه سرعت در امتداد شعاعی می‌شود. سرعت‌های عرضی ایجاد شده در این فرآیند در مقاطع مختلف دارای الگوهای متفاوتی هستند. شکل‌های (۹) و (۱۰) تشکیل جریان عرضی در مقاطع مختلف از بالادست قوس تا پایین دست را در فرود ۰/۱۷ نشان می‌دهد. خطوط جریان نشان داده شده در هر مقطع از برآیند مولفه‌های  $W$  و  $V$  سرعت که به ترتیب در جهت شعاعی و قائم هستند به دست آمده‌اند. در بالادست (شکل a-۹) اثری از جریان حلزونی دیده نمی‌شود و جریان یک سویه ضعیف به سمت جداره بیرونی از لایه‌های فوقانی به سمت لایه‌های کف غالب می‌باشد. با نزدیک شدن جریان به قوس خطوط جریان تحت تأثیر انحنای قوس قرار گرفته و به میزان جریان‌های شعاعی افزوده می‌شود. بررسی الگوی جریان در ادامه کانال نشان می‌دهد که تا حدود مقطع عرضی ۴۰ درجه، این جریان یک سویه وجود داشته است (شکل c-۹-a-b).

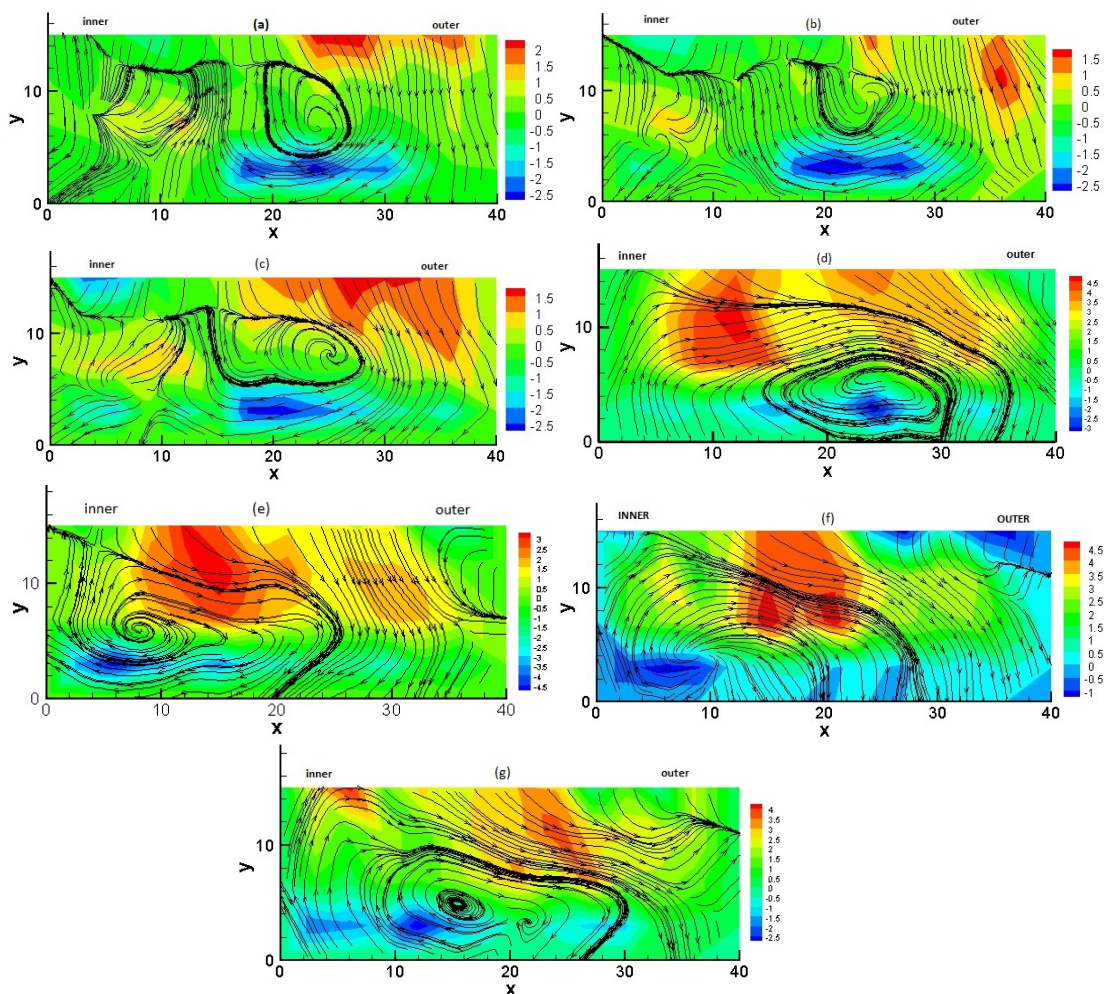


شکل ۹- خطوط جریان عرضی و توزیع سرعت در مقاطع عرضی برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و زبری ۰/۵ میلی‌متر a: ۳۰ سانتی‌متر بالادست قوس b: مقطع صفر درجه c: مقطع ۲۰ درجه d: مقطع ۴۵ درجه e: مقطع ۷۰ درجه f: مقطع ۹۰ درجه g: ۳۰ سانتی‌متر پایین دست

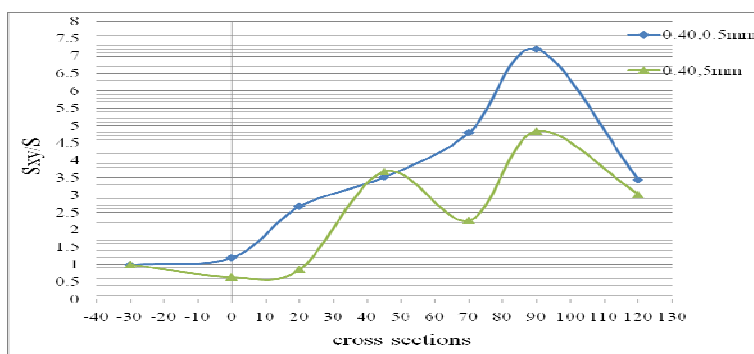
سانتی‌متری پایین دست قوس را نشان می‌دهد که در شکل (g-۹) این حالت مشاهده نمی‌شود. با مشاهده این وضعیت می‌توان گفت افزایش زبری علاوه بر شکل‌گیری، باعث انتقال سلول چرخشی به مقاطع پایین‌تر قوس می‌شود. شکل ۱۱ قدرت جریان ثانویه در دبی ثابت در قوس و در مقطعی که در شکل ۱ تعریف شد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان گفت قدرت جریان ثانویه با افزایش زبری در طول قوس کاهش یافته است.

مختلف قوس نشان می‌دهد که خطوط جریان عرضی تحت تأثیر افزایش زبری قرار می‌گیرند به طوری که در شکل (a-۱۰) دیده می‌شود خطوط جریان از حالت یک سویه بودن بیرون آمده با آشفتگی بیشتری همراه بوده و همچنین جریان‌های حلزونی ضعیف به وجود آمده‌اند. نتایج برای زبری ۵ میلی‌متر نشان می‌دهد که الگوی توزیع سرعت‌های عرضی در مقاطع مختلف از بالادست به پایین دست متأثر از افزایش زبری بوده و باعث تغییر مسیر خطوط جریان عرضی می‌شود. شکل (g-۱۰) وجود جریان چرخشی در ۳۰





شکل ۱۰- خطوط جریان عرضی و توزیع سرعت در مقاطع عرضی برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و زبری ۰/۵ میلی متر a: ۳۰ سانتی متر بالادست قوس b: مقطع صفر درجه c: مقطع ۲۰ درجه d: مقطع ۴۵ درجه e: مقطع ۷۰ درجه f: مقطع ۹۰ درجه g: ۳۰ سانتی متر پایین دست قوس

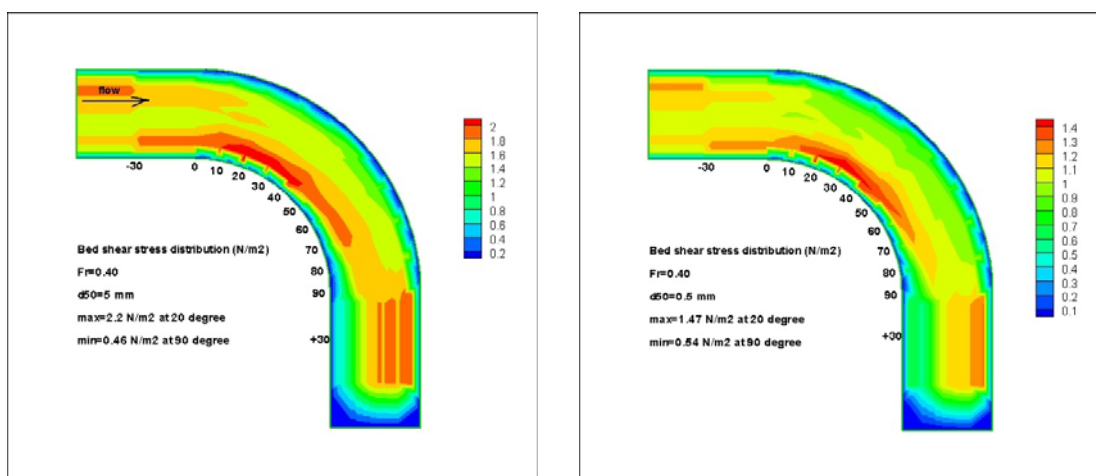


شکل ۱۱- تغییرات قدرت جریان ثانویه در مقاطع مختلف قوس در فرود ۰/۴ (دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه) و زبری ۰/۵ و ۵ میلی متر (S قدرت جریان ثانویه در بالادست و Sxy قدرت جریان ثانویه در مقاطع مختلف قوس می باشد).

### توزیع تنش برشی

شکل (۱۲) توزیع تنش برشی بستر در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و زبری جداره ۰/۵ و ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. با توجه به شکلها می‌توان گفت در حالت کلی در قوس تند تا مقطع ۷۰ درجه، ناحیه با تنش برشی زیاد نزدیک جداره داخلی بوده و از ۷۰ درجه به پایین دست به طرف جداره بیرونی قوس کشیده می‌شود. همچنین افزایش زبری جداره باعث افزایش تنش برشی حداکثر و کاهش تنش برشی حداقل شده است. محل تشکیل بیشترین و کمترین مقدار تنش برشی در دو زبری ۰/۵ و ۵ میلی‌متر به ترتیب ۲۰ درجه و ۹۰ درجه قوس بود که در زبری ۰/۵ میلی‌متر ۱/۴۷ و ۰/۵۴ و در زبری ۵ میلی‌متر ۲/۲ و ۰/۴۶ بوده است. واحدها بر حسب  $(N/m^2)$  می‌باشد. با توجه به نتایج توزیع تنش برشی بستر و مقایسه با نتایج دیگران

می‌توان گفت در مسیرهای خمیده تند با زاویه ۹۰ درجه، از مقطع ۷۰ درجه به پایین دست، نزدیک جداره داخلی مکان خوبی برای رسوبگذاری و نزدیک جداره خارجی مکان مناسب جهت فرسایش بستر می‌باشد. گسترش جریان ثانویه و تشکیل سلول چرخشی عامل مهم در انتقال رسوبات فرسایشی از جداره خارجی به جداره داخلی می‌باشد. اگرچه افزایش زبری باعث افزایش تنش برشی ماکزیمم شده است، کاهش قدرت جریان های ثانویه ناشی از افزایش زبری و انتقال سلول‌های جریان ثانویه به پایین دست (همان‌طور که در نتایج بیان شد) می‌تواند عاملی مؤثر در تصمیم‌گیری طرح‌های حفاظت سواحل رودخانه‌های ممانداری باشد.



شکل ۱۲- توزیع تنش برشی بستر در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و زبری جداره ۰/۵ و ۵ میلی‌متر

### سپاسگزاری

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

### منابع

- ۱- محمودی وانعلیا، م. ۱۳۷۷. بررسی الگوی جریان در بیجانرودها با استفاده از مدل فیزیکی و مقایسه آن با مدل ریاضی. دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- ۲- صفر پور و همکاران. ۱۳۸۷. "مطالعه برخی از پارامترهای هیدرولیکی جریان در مجاری روباز انحناءدار." مجله آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی، جلد ۲۲، شماره ۲.

- ۳- شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۹. "بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان در فلوم ۹۰ درجه همگرا." مجموعه مقالات نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۴- قدسیان، م. ۱۳۸۷. "بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه،" مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۵- بازرگان لاری و همکاران. ۱۳۸۹. "شبیه سازی عددی هیدرولیک جریان در خم ۹۰ درجه همگرا با مدل SSIM،" نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۶- صفرزاده، ا. ۱۳۸۳. "شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در آبگیر جانبی از قوس ۱۸۰ درجه." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

7- Shukry, A. 1950. "Flow around bends in an open flume." Transaction, vol, 115-118.

8- Rozovskii, I. L. 1957. "Flow of water in bend of open channel." Academy of Sciences of the Ukrainian SSR.

9- Anvar, H. 1986. "Turbulent structure in a river bend." ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 112(8).

10- Odgaard J. A. and M. A. Bergs. 1998. Flow processes in a curved alluvial channel. Water Resources Research, 24(1):45-56.