

بررسی اثر سازه هواده‌ی بر الگوی جریان ثانویه و قدرت جریان ثانویه و توزیع تنش برشی در قوس ملایم ۹۰ درجه

پری ملکی^۱، جواد احديان^{۲*}، سید محمود کاشفی پور^۳، منوچهر فتحی مقدم^۳، آنтон اشلايز^۴

^۱ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳ استاد گروه سازه‌های آبی، مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۴ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه لوزان سوئیس

دریافت: ۱۳۹۸/۲/۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۷، نشر آنلاین: ۱۳۹۹/۷/۷

چکیده

یکی از روش‌های نوین حفاظت از قوس رودخانه‌ها استفاده از سازه هواده‌ی (Air bubble screen) است. در این مقاله به مطالعه تأثیر سازه هواده‌ی بر الگوی جریان و قدرت جریان ثانویه و تنش برشی بستر در یک قوس ملایم ۹۰ درجه همراه با سازه هواده‌ی پرداخته شده است. در انجام این آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری سرعت از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیسی سه‌بعدی استفاده شده است. مقایسه بین کانتورهای (Countors) سرعت طولی در طول قوس انجام شده و مقادیر قدرت جریان ثانویه و الگوی آن و همچنین تنش برشی بستر موربدبررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که در حضور سازه هواده‌ی الگوی توزیع سرعت و تنش برشی اصلاح شده و مکان بیشینه سرعت و تنش برشی از قوس بیرونی دور شده و به میانه کانال منتقل می‌شود. الگوی جریان ثانویه نشان‌دهنده وجود یک سلول جریان ثانویه در خلاف جهت سلول ناشی از انحصار است و همچنین قدرت جریان ثانویه نیز کاهش یافت. با توجه به نتایج ارائه شده انتظار می‌رود مکان وقوع بیشینه آب‌شستگی که منطبق بر مکان بیشینه آب‌شستگی است از قوس بیرونی دور شده و به میانه فلوم منتقل شود.

کلیدواژه‌ها: سرعت‌سنج سه‌بعدی، قدرت جریان ثانویه، الگوی جریان، تنش برشی بستر، سازه هواده‌ی.

۱- مقدمه

گرفته که جهت آن‌ها از قوس داخلی به‌سمت قوس بیرونی است. در اثر برخورد این جریان‌ها و عدم یکنواختی پروفیل سرعت در عمق الگوی جریان‌های حازونی شکل می‌گیرد. وجود جریان‌های ثانویه و حازونی موجب تغییر توپوگرافی بستر شده به‌گونه‌ای که موجب برخورد شدید به قوس بیرونی و بستر رودخانه و درنتیجه تحریب آن می‌شود. شکل (۱) شماتیکی از جریان در قوس رودخانه را نشان می‌دهد (واقفی و اکبری، ۱۳۹۴).

با توجه به اهمیت رودخانه‌ها و بحرانی بودن قوس آن‌ها، از دیرباز تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه حفاظت از قوس رودخانه‌ها، الگوی جریان و آب‌شستگی آن‌ها انجام شده است.

طبیعت جریان در رودخانه‌ها به‌گونه‌ای است که مقطع یک رودخانه با گذشت زمان دچار تغییرات و دگرگونی شده و این تغییرات در قوس رودخانه‌ها نمایان‌تر است. قسمت‌های بحرانی رودخانه‌ها از جمله قوس‌ها نقش مهمی در شناسایی رفتار هیدرولیکی آن‌ها دارند. آشفتگی‌های موجود در قوس‌ها و ماهیت سه‌بعدی جریان و همچنین تغییرات غیریکنواخت توپوگرافی بستر و عمق جریان موجب شکل‌گیری جریان‌های ناشناخته‌ای در قوس می‌شود (واقفی و همکاران، ۱۳۹۵). با فرض این‌که تنها نیروی حاکم بر جریان در قوس نیروی گریز از مرکز باشد، با ورود جریان به درون قوس ذرات جریان تحت تأثیر این نیروی واقع شده و موجب افزایش سطح آب در قوس بیرونی و کاهش آن در قوس داخلی می‌شود. در اثر ایجاد اختلاف سطح آب جریان‌های عرضی شکل

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۶۱-۳۳۳۳۰۶۲۲

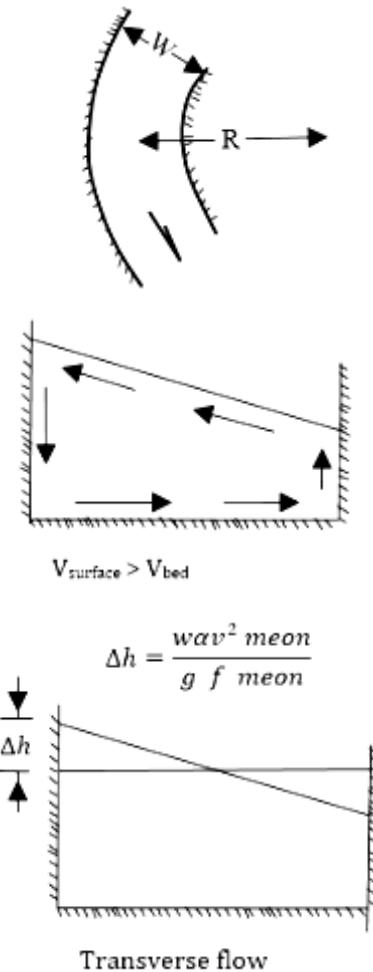
آدرس ایمیل: kashefipour@exite.com، ja.ahadiyan@yahoo.com (ج. احديان)، parima_6771@yahoo.com (پ. ملکی)، (س. م. کاشفی پور)، anton.schleiss@epfl.ch (آ. اشلايز)، mfathi@scu.ac.ir (م. فتحی مقدم).

است که مهم‌ترین تغییرات در الگوی سرعت و توپوگرافی در نیمه اول قوس اتفاق افتاده است.

آزمایشگاهی با قوس (۲۰۰۱) Graf و Blanckaert آن بود که سرعت بیشینه در نزدیکی بستر شکل گرفته و یک سلول چرخشی در مقطع ۶۰ درجه (مقطع موردمطالعه) شکل گرفته، همچنین یک سلول چرخشی با جهتی مخالف سلول اولیه شکل گرفته که محل آن در قوس بیرونی است به طوری که ماکریم سرعت در بین دو سلول است. بسیاری از محققان وجود جریان ثانویه دوم را که تحت کارگذاری سازه‌های حفاظتی مختلف و تغییرات هندسی کانال‌ها شکل می‌گیرد را عاملی جهت جلوگیری از آب‌شستگی در جدار بیرونی کانال‌ها ذکر کردند.

Dey و Zaramella (۲۰۰۶) محققان زیادی از جمله Marion و Barbhuiya (۲۰۰۵)، قدسیان و همکاران (۱۳۹۵)، Shafaie Bejestan و Bahrami Yarahmadi (۲۰۱۵) و Shukry (۱۹۵۰) از جدیدترین سازه‌های حفاظتی مختلف بررسی کردند. یکی از جدیدترین سازه‌های حفاظتی از قوس رودخانه‌ها که نخستین بار توسط Wijbenga و همکاران (۲۰۰۶) گزارش شد، استفاده از سازه هواده‌ی یا صفحه حباب است. آن‌ها در تحقیقی توزیع سرعت و جریان ثانویه را به وسیله سازه هواده‌ی در قوس کانال‌های باز مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان دادند که یک سازه هواده‌ی اندازه سلول گردش ناشی از انحنا را کاهش می‌دهد. این تحقیق علاوه بر نشان دادن پتانسیل تکنیک سازه هواده‌ی، اطلاعات دقیقی را از طریق اندازه‌گیری‌ها پیرامون میدان جریان سه‌بعدی در قوس‌های کانال باز ارائه می‌دهد که می‌تواند برای اعتبارسنجی به مدل عددی مناسب باشد در این روش لوله‌ای متخلخل در طول قوس و نزدیک قوس بیرونی نصب شده و دو انتهای آن به دو دستگاه کمپرسور هوا جهت تزریق هوا متصل می‌شود. با تولید حباب‌های هوا در طول لوله، صفحه‌ای از حباب در امتداد قوس بیرونی تشکیل می‌شود. وجود این سازه موجب تولید سلول جریان ثانویه‌ای می‌شود که در خلاف جهت سلول ناشی از انحنا است، لذا مانند سایر سازه‌های حفاظتی دیگر از برخورد جریان به قوس بیرونی و آب‌شستگی آن جلوگیری می‌کند. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به احداث سازه و پیشروی در عرض رودخانه اشاره نمود. همچنین صلب نبودن مانع ایجاد شده در مقابل جریان و سیال بودن آن موجب می‌شود مشکلی در بهره‌برداری از رودخانه از جمله انجام عملیات کشتیرانی ایجاد نشود.

Blanckaert و همکاران (۲۰۰۸) توزیع سرعت و تنش برشی بستر را در کانال‌های باز در مسیر مستقیم و قوسی ۱۹۳ درجه با استفاده از تکنیک هواده‌ی موردمطالعی قرار دادند. مطالعات اولیه



شکل ۱- الگوی جریان در قوس رودخانه (واقعی و اکبری، ۱۳۹۴)

Shukry (۱۹۵۰) از نخستین محققانی است که به مطالعه کانال قوسی ۱۸۰ درجه با نسبت‌های مختلف شعاع به عرض آن پرداخته است. وی توانست معیاری را برای جریان ثانویه در قوس‌ها مشخص کند به‌گونه‌ای که در یک مقطع مشخص به صورت نسبت انرژی جنبشی جریان به انرژی جنبشی جریان اصلی آن را تعریف نمود.

Rozovskii (۱۹۶۱) با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک قوس ۹۰ درجه تند به بررسی الگوی جریان پرداخت. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که ناحیه وقوع حداقل مقادیر سرعت جریان، بعد از رأس قوس به سمت ناحیه بیرونی قوس اتفاق می‌افتد.

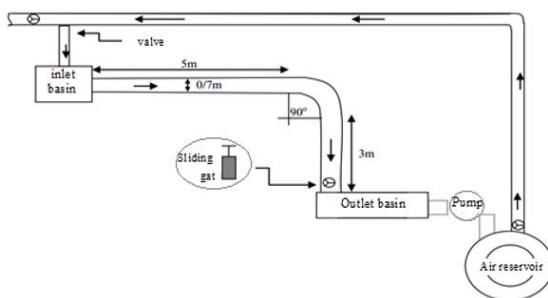
Lien و همکاران (۱۹۹۹) الگوی جریان را در کانال‌های قوسی شکل ۹۰ و ۱۸۰ درجه مطالعه کردند، نتایج آن‌ها نشان داد در کانال‌های با قوس تند نیروی حاصل از تنش انتشاری نیروی غالب و نیروهای گریز از مرکز و اصطکاک بستر اهمیت کمتری دارند ولی در قوس ملایم، نیروی گریز از مرکز غالب است.

Bergs و Odgaard (۱۹۸۸) الگوی جریان را در قوس ملایم ۱۸۰ درجه، با بستر متحرک بررسی کردند نتایج آن‌ها بیانگر آن

۲- مواد و روش‌ها

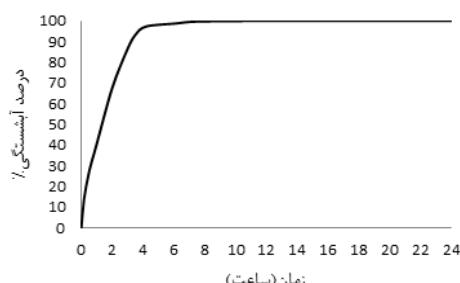
۱-۲- کanal آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشگاه شهید چمران اهواز در یک کanal آزمایشگاهی قوسی با جداره‌های شیشه‌ای انجام شد. طول بخش مستقیم بالا دست ۵ متر و در قسمت مستقیم پایین دست ۳ متر، شعاع بیرونی و درونی قوس به ترتیب $\frac{3}{15}$ و $\frac{2}{45}$ متر با عرض $\frac{7}{4}$ متر، با نسبت شعاع به عرض برابر ۴ است. جهت کنترل سطح آب از دریچه تنظیمی در انتهای فلوم استفاده شد. کف کanal از رسوباتی با قطر متوسط $1/5$ میلی‌متر با انحراف معیار $6.22 = \sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ در لایه‌ای به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر پوشیده شده بود که در آن d_{16} قطر ذراتی است که به ترتیب ۸۴ و ۶٪ ذرات از آن کوچک‌تر است. شکل (۲) شماتیکی از این کanal را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در چهار دبی ۳۶، ۳۳، ۳۰ و ۲۹ لیتر بر ثانیه با عمق ۱۱ سانتی‌متر و اعداد فرود جریان به ترتیب $۰/۳۷$ ، $۰/۴۱$ ، $۰/۰۴$ و $۰/۰۴۷$ در تراکم آب زلال انجام شدند. جهت تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، آرمایشی طولانی مدت ۲۴ ساعته در دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه انجام شده که با توجه به شکل مشاهده می‌شود که بیش از ۹۰ درصد آب‌شستگی تقریباً در ۴ ساعت اول انجام شده لذا در تمامی آزمایش‌ها زمان چهار ساعت به عنوان زمان تعادل انتخاب شد، شکل (۳) نمودار تعیین زمان تعادل آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۳- گسترش آب‌شستگی با زمان در آزمایش تعیین زمان تعادل

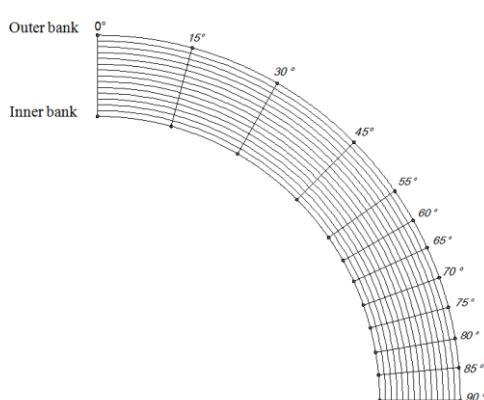
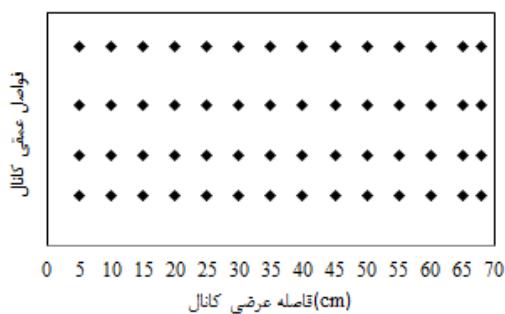
آزمایشگاهی نشان دادند که در جریان مستقیم، حباب ایجاد شده توسط دوران عرضی جریان، گستردگی حدود چهار برابر عمق آب را پوشش می‌دهد و ماکریم سرعت‌های عرضی نزدیک سطح و دور از پرده حباب حدود 0.2m/s^2 و نزدیک بستر به سمت آن حدود 1m/s^2 است. در جریان با انحنای شدید این گستردگی کمی ضعیفتر شده و حدود سه برابر عمق آب است. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد تکنیک تزریق حباب می‌تواند توجیه اقتصادی و عملی در رودخانه‌های واقعی برای مقابله با پدیده آب‌شستگی داشته باشد.

Dugue و همکاران (۲۰۱۱) و (۲۰۱۲) در مقاله‌ای تأثیر سازه هواده‌ی را در الگوی جریان و مورفولوژی بستر در کanal‌های باز و رودخانه‌ها مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج آن‌ها این سازه می‌تواند به عنوان یک تکنیک اصلاح مورفولوژی در رودخانه‌های کم عمق و کanal‌های باز مورد استفاده قرار گیرد. براساس گزارش‌های Dugue و همکاران (۲۰۱۲)، (۲۰۱۳) و (۲۰۱۵) قدرت و اندازه جریان ناشی از سازه هواده‌ی، با عمق آب افزایش یافته و مستقل از سرعت جریان پایه است، همچنین اندازه و قدرت سلول جریان ناشی از حباب در بستر متحرک بزرگ‌تر از بستر غیر متحرک است. آن‌ها معتقد هستند که این تحقیق، می‌تواند به عنوان یک تکنیک اصلاح مورفولوژی در رودخانه‌های کم عمق و کanal‌های باز مورد استفاده قرار گیرد.

Heidarpour Izadinia (۲۰۱۵) در تحقیقی تفاوت شکل و موقعیت صفحه تشکیل حباب را در اطراف پایه پل در کنترل آب‌شستگی مقایسه نمودند، نتایج آن‌ها نشان داد که گردنبند کامل ایجاد حباب را مؤثرتر از گردنبند ایجاد شده در نیمه جلوی پایه پل، برای کنترل آب‌شستگی است.

ملکی و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر سازه هواده‌ی را بر آب‌شستگی بستر در قوس ملایم ۹۰ درجه مورد مطالعه قرار دادند، نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که وجود این سازه در قوس موجب اصلاح الگوی مورفولوژی شده شد به طوری که بیشینه عمق آب‌شستگی را ۴۳ درصد کاهش و آن را از قوس بیرونی دور نموده، همچنین آن‌ها گزارش کردند با افزایش دبی تزریق را عمق آب‌شستگی کاهش یافته است. با توجه به نتایج مطالعات محققان در زمینه سازه هواده‌ی و کم بودن تحقیقات انجام شده در این زمینه و همچنین مزایای این روش نسبت به سایر روش‌های حفاظت قوس، لذا محققان را به این مهم سوق می‌دهد که جهت بهره‌وری از این سیستم نوین و کارآمد نیازمند انجام آزمایش‌های فراوان و مطالعات بیشتر در این زمینه است. در این مقاله قدرت جریان ثانویه، الگوی جریان و تنش برشی بستر در کanal قوسی شکل ملایم ۹۰ درجه بررسی شده و همچنین پیش‌بینی حرکت رسوبات و تغییرات بستر در طول کanal از نوآوری‌های این تحقیق است.

جهت بررسی الگوی توزیع سرعت در قوس ملایم، با و بدون حضور سیستم هوادهی از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیسی JEFALEC مدل ACM3-RS با دقت ± 2 درصد استفاده شد. در هر نقطه اندازه‌گیری‌ها با فرکانس ۲۰ هرتز و به مدت ۶۰ ثانیه انجام شد بنابراین در هر نقطه و در هر جهت ۱۲۰۰ نقطه برداشت شده که این داده‌ها توسط نرم‌افزارهای جانبی همچون Winlab EM و Excle متوسط‌گیری شدند. پس از پایان هر آزمایش توپوگرافی بستر با استفاده از محلول رقیق سیمان و آب به گونه‌ای تثبیت شد به‌نحوی که در زمان اندازه‌گیری سرعت هیچ ذره‌ای جابه‌جا نشده و توپوگرافی بستر به هم نخورد. مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت طولی، عرضی و عمقی برای دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه و دی تزریق ۵۰ لیتر بر دقیقه در حداقل ۴ عمق از بستر و در جهت عرضی در ۱۴ نقطه برداشت شد. همچنین در مقاطع ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰، ۷۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰ درجه و ۵۰ سانتی‌متر پایین‌دست و بالا‌دست قوس مؤلفه‌های سرعت برداشت شدند. شکل (۵) شماتیکی از نقاط و مقاطع برداشت سرعت را نشان می‌دهد.



شکل ۵- شماتیکی از نقاط و مقاطع برداشت سرعت

مختصات نقاط برداشت سرعت به صورت قطبی بوده که جهت استفاده از آن‌ها در نرم‌افزار مورد استفاده، بایستی به صورت کارتزین تبدیل شوند. نحوه تبدیل داده‌های سرعت و مختصات نقاط

دبی جریان به وسیله دبی‌سنچ آلتراسونیک^۱ با دقت ± 1 درصد اندازه‌گیری شد. در هر آزمایش جهت تسطیح سطح رسوبات در طول کanal، از ارایه‌ای مجهز به یک صفحه فلزی قائم، با قابلیت جابه‌جایی در عرض فلوم، استفاده شد، سپس با بستن دریچه کنترل پایین‌دست، شیر ورودی در ابتدای کanal به‌آرامی باز شده به‌گونه‌ای که هیچ انتقال رسوبی به پایین‌دست صورت نگیرد و شرایط آب زلال حفظ شود. با افزایش تدریجی عمق آب در کanal به تدریج دریچه کشویی پایین‌دست باز شده و همزمان دبی ورودی به کanal به‌آرامی افزایش و با ادامه این روند دبی و عمق موردنظر تنظیم شد. جهت ساخت سیستم هوادهی از لوله‌ای متخلخل به قطر بیرونی $1/5$ سانتی‌متر (از ابتدای کanal) نصب شده بر روی پایه‌های فلزی که در کف فلوم تعییه شده بود استفاده شد. همچنین از دو دستگاه بلور^۲ ۸۰۰ وات جهت تأمین دبی هوا استفاده شد که از دو طرف به دو سر لوله متصل و دبی هوا به شکل یکنواخت در تمام طول لوله توزیق شود و دبی تزریق هوا توسط روتامتر^۳ اندازه‌گیری شد. شکل (۶) تمامی آزمایش‌ها در سه دبی تزریق هوا ۴۶، ۴۸ و ۵۰ لیتر بر دقیقه انجام شد.



(الف)



(ب)

شکل ۶- (الف) نحوه نصب لوله متخلخل در کف کanal،
ب) سیستم هوادهی در حین اجرا

۳-۲- قدرت جریان ثانویه

Shukry (۱۹۵۰) با بررسی الگوی جریان در قوس رودخانه‌ها، با تشریح فرآیند جریان ثانویه، بهمنظور تعیین پارامتر کمی برای این پدیده رابطه زیر را به عنوان قدرت جریان ثانویه تعریف نمود:

$$S_{yz} = \frac{K_{lateral}}{K_{main}} = \left(\frac{\sqrt{u^2 + w^2}}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \right)^2 * 100 \quad (11)$$

که در آن $K_{lateral}$ انرژی جنبشی جانبی و K_{main} انرژی جنبشی جریان اصلی است. در این رابطه u , v و w به ترتیب سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی در هر مقطع هستند. در این تحقیق مقدار قدرت جریان ثانویه مطابق رابطه (۱۱) برای تمامی مقاطع به دست آمد، همچنین به کمک تحلیل داده‌های آرمایشگاهی و نرم‌افزارهای جانبی همچون Tec Plot360° و Excel توزیع سرعت طولی برای جریان ثانویه ترسیم شد.

۳- نتایج و بحث

۱-۱- الگوی سرعت در طول کanal

الگوی توزیع سرعت طولی برای آزمایش مرتع (بدون حضور سازه هواده) برای عدد فرود $4/45$ در فاصله سه سانتی‌متری از بستر، در شکل (۶-الف)، نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل قابل مشاهده است، ناحیه بیشینه سرعت (۵۵ سانتی‌متر بر ثانیه) در ورودی قوس و در نزدیکی قوس داخلی است و منطقه‌ای با سرعت کمتر (۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر بر ثانیه) در نزدیکی قوس بیرونی شکل گرفته است، ولی با پیشروی در قوس سرعت‌ها در قوس بیرونی و داخلی به هم متصل شده و ناحیه با سرعت ماقزیم در قسمت انتهایی نیمه دوم قوس (یک سوم انتهایی) و در مجاورت قوس بیرونی شکل گرفته و تا انتهای کanal ادامه دارد، با توجه به این که منطقه ماقزیم سرعت، محل ماقزیم فرسایش بهشمار می‌رود لذا این منطقه نیاز به محافظت بیشتری دارد.

Shukry (۱۳۹۵)؛ شاکر و کاشفی پور (۱۳۹۳)؛ Shukry (۱۹۵۰) نتایج مشابهی را در مطالعات خود در کanal قوسی گزارش کردند. شکل (۶-ب) الگوی توزیع سرعت طولی را برای آزمایش با حضور سازه برای عدد فرود $4/45$ نشان می‌دهد. قسمت طویل رنگ بیانگر محل کارگذاری لوله متخلخل در کanal است. در این وضعیت منطقه بیشینه سرعت از قوس داخلی فاصله گرفته و به میانه کanal منتقل شده و در نیمه دوم قوس نیز منطقه ماقزیم از قوس بیرونی و قسمت انتهایی جدا شده و به میانه کanal منتقل شده است. درواقع وجود سازه هواده با تولید حباب‌هایی عمود بر جریان اصلی به عنوان مانعی در مقابل جریان عمل کرده و موجب انحراف خطوط بیشینه سرعت از قوس بیرونی به میانه کanal شده و همچنین قسمت مستقیم پایین‌دست نیز از برخورد جریان

برداشت شده از سیستم قطبی به سیستم کارتزین در روابط (۱) تا (۵) تبدیل نشان داده شده است:

$$u = Ur \sin \theta + U_\theta \cos \theta \quad (1)$$

$$v = Ur \cos \theta - U_\theta \sin \theta \quad (2)$$

$$X = R \sin \theta \quad (3)$$

$$Y = R \cos \theta \quad (4)$$

$$R = R_{out} - \Delta R \quad (5)$$

در این روابط R فاصله نقطه اندازه‌گیری از مرکز قوس، θ زاویه نقطه اندازه‌گیری نسبت به محور y , R_{out} شاعع خارجی قوس که برابر $۳/۱۵$ متر و ΔR فاصله نقطه اندازه‌گیری از قوس بیرونی می‌باشد.

۲-۲- محاسبه تنش برشی

برای محاسبه تنش برشی بستر از روابط زیر در لایه‌های نزدیک بستر به صورت زیر استفاده شده است (شاکر و کاشفی پور، ۱۳۹۳):

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (7)$$

در این روابط τ_{bx} و τ_{by} به ترتیب تنش برشی بستر در جهت طولی و عرضی می‌باشند، همچنین ρ جرم مخصوص سیال و g و شتاب ثقل است. \bar{u} و \bar{v} متوسط عمقی سرعت در جهت طولی و عرضی و c ضریب شزری^۴ مطابق رابطه (۸) است.

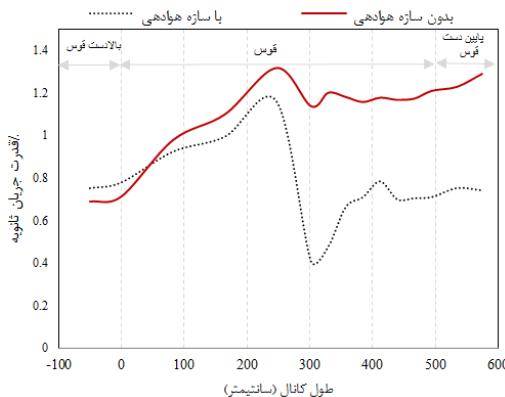
$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (8)$$

که R شاعع هیدرولیکی و n ضریب زیری معادل می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$n = \frac{1}{21.1} D_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (9)$$

برای رسوبات موردادستفاده این تحقیق با $d_{50}=1.5$ میلی‌متر مقدار زبری برابر $۰/۰۱۶$ به دست آمد. درنهایت جهت محاسبه تنش برشی کل بستر (τ_b) از رابطه زیر استفاده شد:

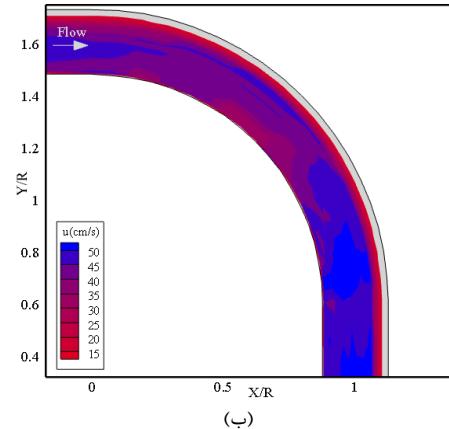
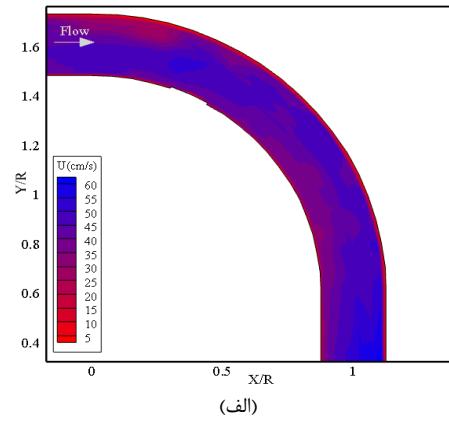
$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (10)$$



شکل ۷- تغییرات قدرت جریان ثانویه بر حسب طول کanal

این افزایش تا نزدیکی رأس قوس در محدوده ۴۰ تا ۴۵ درجه ادامه دارد در این محدوده به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز سطح آب در قوس بیرونی افزایش می‌یابد، از طرفی جهت برقاری تعادل دینامیکی، گرادیان فشار عرضی که ناشی از اختلاف سطح آب در قوس بیرونی و داخلی است، نیروی در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز وارد می‌کند که موجب افزایش مؤلفه‌های سرعت عرضی می‌شود. با توجه به رابطه (۱۱) پارامتر قدرت جریان ثانویه با مربعات مؤلفه‌های جانبی نسبت مستقیم دارد، لذا مقدار آن افزایش می‌یابد. از رأس قوس تا مقطع ۶۰ درجه به دلیل کشیده شدن منطقه ماکزیمم سرعت به میانه فلوم و کاهش گرادیان فشار عرضی که موجب به تعادل رسیدن نیروهای گریز از مرکز و گرادیان فشاری می‌شود، قدرت جریان ثانویه روند کاهشی دارد. از مقطع ۶۰ درجه تا انتهای قوس به دلیل جدا شدن خطوط سرعت از جدار درونی و برخورد آن‌ها با جدار خارجی و درنتیجه انتقال مومنتوم^۵ مجدداً روند قدرت جریان ثانویه افزایشی است و در این ناحیه ماکزیمم آن در مقطع ۶۵ درجه اتفاق می‌افتد. با توجه به روند منحنی قدرت جریان ثانویه انتظار می‌رود دو منطقه با ماکزیمم آب‌شستگی در کanal مشاهده شود، مکان اول در ابتدای فلوم و مکان دوم در نیمه دوم قوس در محدوده ۶۰ درجه، در جایی که سرعت و قدرت جریان ثانویه ماکزیمم است. پیش از این Vaghefi و همکاران (۲۰۱۵) با شبیه‌سازی جریان در اطراف آب‌شکن T شکل با مدل سیم، ماکزیمم قدرت جریان ثانویه را در فلوم ۹۰ درجه مالیم را مقطع ۴۵ درجه گزارش کردند که علت آن را برخورد خطوط جریان با دیواره خارجی قوس ذکر شد. همچنین Abhari و همکاران (۲۰۱۰) ماکزیمم آن را در مقطع ۳۰ درجه گزارش کردند. در آزمایش با حضور سازه هوادهی به دلیل جایی منطقه ماکزیمم سرعت و کاهش گرادیان فشار عرضی تحت تأثیر جت هوا قدرت جریان ثانویه نسبت به آزمایش مرجع کاهش

بیشینه محافظت شده است. با توجه به این که منطقه بیشینه سرعت، محل ماکزیمم آب‌شستگی است لذا انتظار می‌رود وجود سازه هوادهی موجب تغییر محل خط‌التعزیز کanal و همچنین افزایش عرض کشتیرانی شود. نتایج این تحقیق با نتایج محققانی همچون Dugue و همکاران (۲۰۱۱) و (۲۰۱۵) بر روی کanal قوسی ۱۹۳ درجه مطابقت دارد.

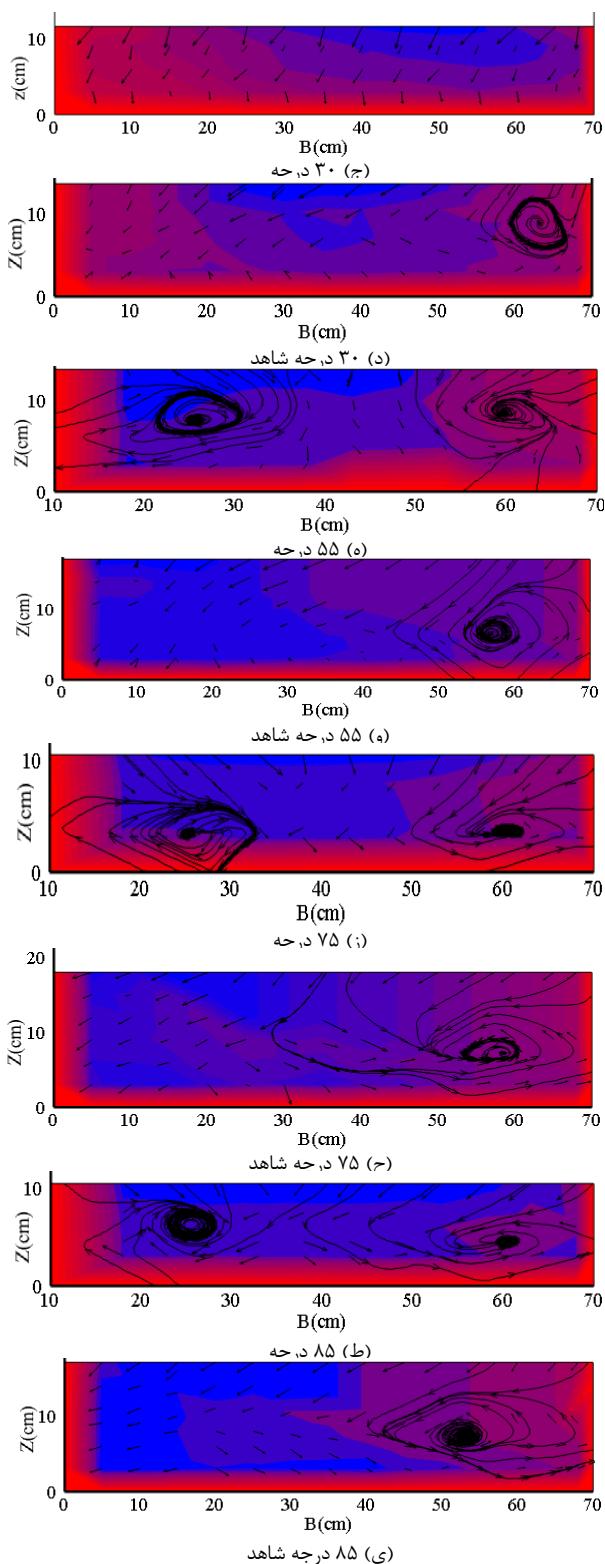


شکل ۶- الگوی توزیع سرعت در عدد فرود ۰/۴۵
الف) آزمایش مرجع، ب) آزمایش با حضور سازه هوادهی

۲-۳- قدرت جریان ثانویه

به منظور بررسی تأثیر سازه هوادهی بر الگوی جریان ثانویه، برای آزمایش‌های بدون سازه هوادهی و در حضور سازه هوادهی برای تمامی مقاطع سرعت اندازه‌گیری شده، با استفاده از رابطه (۱۱) قدرت جریان ثانویه محاسبه شده و نتایج آن در شکل (۷) ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در آزمایش بدون سازه هوادهی، سلول جریان ثانویه در هنگام ورود جریان به درون قوس شکل گرفته و با شبیه‌تندی قدرت آن تا مقطع ۳۰ درجه افزایش یافته است.



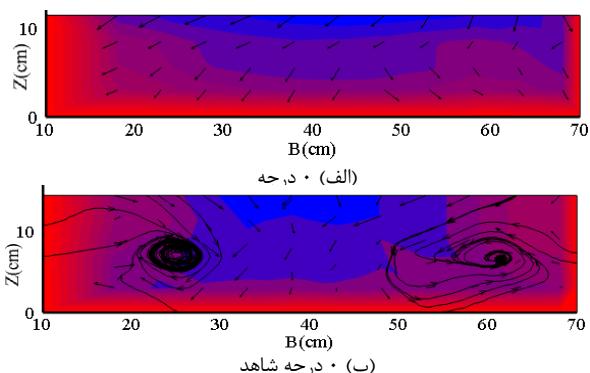
شکل ۸- الگوی جریان ثانویه و توزیع سرعت در مقاطع مختلف در عرض کanal در آزمایش با حضور سازه

محققانی همچون Shukry (۱۹۵۷)، Rozovskii (۱۹۵۰)، Graf و Blanckaert (۲۰۰۱)، Fazli و Shafaie Bejestan و Bahrami (۲۰۱۵) در تحقیقات خود وجود

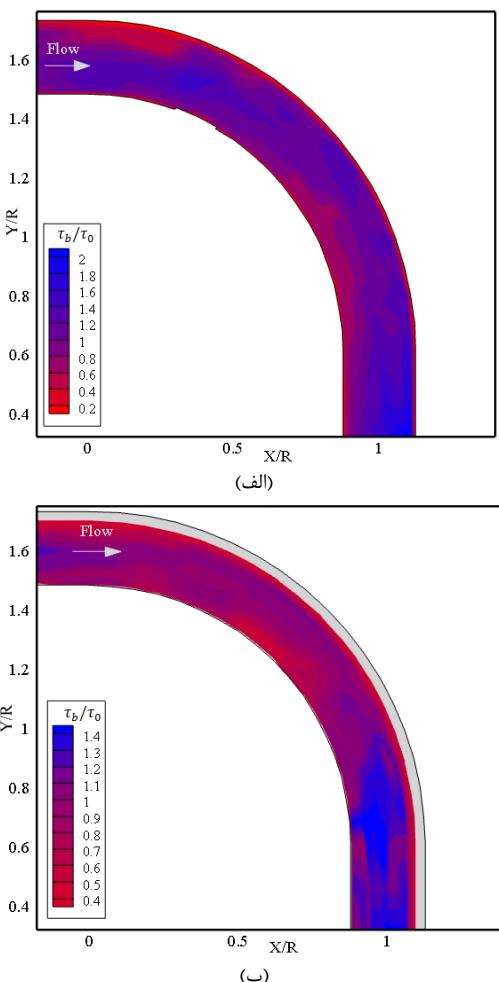
یافته است. در این آزمایش از شروع قوس تا مقطع ۴۵ درجه روند آن افزایشی است سپس با شبیه تندتری نسبت به آزمایش مرجع، از زاویه ۴۵ درجه تا ۵۵ درجه با کاهش جریان‌های عرضی، مقدار آن کاهش می‌یابد. از مقطع ۶۵ درجه تا انتهای قوس مجددًا مقدار آن افزایش یافته و ماکریم آن در مقطع ۷۵ درجه اتفاق می‌افتد. سازه هوادهی با انحراف خطوط سرعت از دیواره خارجی به میانه فلوم و افزایش سرعت طولی در نیمه دوم قوس، ناحیه بیشینه قدرت جریان ثانویه را از مقطع ۶۰ درجه به مقطع ۷۵ درجه منتقل کرده و مقدار آن را به میزان ۳۵ درصد کاهش داده است. لذا انتظار می‌رود میزان آب‌شستگی در این محدوده نیز کاهش یابد.

۳-۳- الگوی جریان ثانویه و توزیع سرعت عرضی

در شکل (۸) الگوی جریان ثانویه (برآیند سرعت‌های عرضی و عمقی) و همچنین الگوی توزیع سرعت در مقاطع ۰، ۳۰، ۵۵، ۷۵ و ۸۵ درجه برای آزمایش بدون سازه هوادهی ترسیم شده است. در این شکل‌ها عدد صفر نشان‌دهنده قوس بیرونی و عدد ۷۰ سانتی‌متر بیانگر قوس خارجی است. همان‌طور که قابل مشاهده است در مقطع ۰° بیشینه سرعت طولی به‌فاضله ۵ سانتی‌متری از ساحل داخلی شکل گرفته است. به تدریج با پیشروی در قوس ۳۰° منطقه ماکریم سرعت به میانه فلوم جای‌جا شده (مقطع درجه) و در مقطع ۵۵° تا مقطع ۸۵° منطقه ماکریم سرعت در مجاورت دیواره بیرونی قرار می‌گیرد که موجب فرسایش در این ناحیه می‌شود. خطوط جریان در نزدیکی سطح آب به سمت قوس بیرونی و در نزدیکی بستر به سمت قوس داخلی بوده و به‌دلیل تقابل نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار جانبی یک سلول جریان ثانویه پادساعت‌گرد از ابتدای قوس ایجاد می‌شود و تا ۸۵° ادامه دارد که موجب انتقال خطوط جریان از سطح آب به بستر شده و با برخورد آن‌ها به بستر موجب فرسایش در این ناحیه می‌شوند زیرا زاویه برخورد این خطوط در جدار بیرونی در جهت نایابداری ذرات است. در قوس داخلی جهت خطوط بر عکس بوده و به‌دلیل کاهش سرعت در آن، الگوی رسوب‌گذاری در این ناحیه شکل می‌گیرد.



قوس داخلی و $0/۴$ در قوس بیرونی شکل گرفته است از آنجاکه در قوس داخلی بیشینه تنش برشی از مقدار متوسط مستقیم بالادست بیشتر شده انتظار می‌رود فرسایش بستر در این ناحیه آغاز شود. با پیشروع در طول قوس و در نیمه دوم آن ناحیه پرتنش در عرض قوس توزیع شده و در انتهای آن به سمت قوس خارجی کشیده می‌شود. در این ناحیه در قوس بیرونی تا انتهای کanal ناحیه‌ای با تنش برشی $1/۸$ تا ۲ و لایه‌ای با تنش $۰/۶$ در قوس داخلی شکل گرفته که بیانگر پتانسیل بالای فرسایش در قوس بیرونی تا قسمت مستقیم پایین دست کanal و ضرورت نیاز به حفاظت قوس در این ناحیه است. در شکل (۹) الگوی توزیع تنش برشی را در حضور سازه هوادهی نشان می‌دهد، قسمت طوسی رنگ بیانگر کارگذاری لوله متخلخل است. به طور کلی در این وضعیت از نسبت تنش برشی در کل کanal کاسته شده است همچنین در قسمت ورودی و نیمه ابتدایی قوس بیشینه تنش با نسبت $۱/۳$ به میانه فلوم منقل شده و در سایر نقاط این نیمه مقادیر تنش کاهش چشمگیری داشته است.



شکل ۹- الگوی تنش برشی بستر در عدد فرود $۰/۴۵$. (الف) آزمایش شاهد، (ب) آزمایش با حضور سازه هوادهی

یک سلول گردشی را گزارش کردند که عامل آن را تقابل نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار جانی در کanal آزمایشگاهی خود می‌دانستند. شکل (۸) الگوی جریان ثانویه و توزیع سرعت را در مقاطع $۰, ۳۰, ۵۵, ۷۵$ و ۸۵ درجه برای آزمایش با حضور سازه هوادهی نشان می‌دهد.

به دلیل تداخل بین حباب‌های هوا و سینکللهای دستگاه سرعت‌سنجد، سرعت‌های نزدیک سیستم هوادهی قابل اندازه‌گیری نبود لذا اندازه‌گیری‌ها با فاصله تقریباً ۱۵ سانتی‌متری از قوس بیرونی انجام شد. در تمامی مقاطع منطقه ماکریم سرعت از قوس بیرونی به میانه فلوم منتقل شده است و منطقه کمینه سرعت در نزدیکی ساحل خارجی شکل گرفته است. به دلیل وجود سازه و انتقال سرعت بیشینه سلول گردشی دیگری (ساعت‌گرد)، در خلاف جهت سلول قبلی (پادساعت‌گرد) ایجاد شده است. همچنین شکل‌گیری یک لایه برشی در بین دو سلول جریان ثانویه سبب حرکت خطوط جریان به سمت بستر شده انتظار می‌رود خط القعر از قوس بیرونی به سمت میانه فلوم انتقال یابد.

سلول ناشی از وجود انحنای در اثر نیروی گریز از مرکز و وجود گرادیان فشار موجود در قوس بیرونی و داخلی ایجاد شده و سلول دیگری به دلیل تولید حباب‌های هوا ایجاد شده از سازه هوادهی است.

Blanckaert و همکاران (۲۰۰۸)؛ Wijbenga و همکاران (۲۰۰۶)؛ Dugue و همکاران (۲۰۱۱) تا (۲۰۱۵) در تحقیقات خود نیز این موضوع را گزارش نمودند. در آزمایش مرجع به تدریج با فاصله گرفتن از شروع قوس در مقاطع $۵۵, ۷۵$ و ۸۵ درجه بیشینه سرعت به ترتیب در فاصله $۱۵, ۱۰$ و ۱۵ سانتی‌متر از قوس بیرونی و در آزمایش با حضور سازه هوادهی این فواصل به ترتیب در $۴۳, ۳۸$ و ۴۳ سانتی‌متری از قوس بیرونی قرار گرفته است درنتیجه وجود این سازه در قوس بیشینه سرعت را این مقاطع به ترتیب ۶۵ و ۶۵ درصد از دیواره خارجی دور نموده است.

۴-۳- الگوی توزیع تنش برشی

با تغییر شرایط هیدرولیکی جریان میزان تنش برشی بستر تغییر می‌کند، از طرفی نواحی با بیشینه تنش برشی محتمل ترین مناطق موجود در رودخانه‌ها در مقابل فرسایش به شمار می‌روند. جهت تعیین توزیع تنش برشی بستر با استفاده از روابط (۶) تا (۱۰) تنش برشی موجود در هر نقطه محاسبه و سپس میانگین هر مقاطع نسبت به تنش برشی مقاطع مستقیم بالادست قوس بی- بعد شده است. شکل (۹) کانتورهای تنش برشی بستر را در ارتفاع ۳ سانتی‌متری از بستر را برای آزمایش مرجع (بدون حضور سازه هوادهی) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است در نیمه اول قوس ناحیه‌ای با تنش برشی نسبی $۱/۵۲$ در نزدیکی

واقفی م، اکبری م، "تعیین شدت آشفتگی در کانال قوسی ۱۸۰ درجه تند با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۳۹۴، ۲۰، ۳۴-۱۶.

واقفی م، قدسیان م، اکبری م، "تأثیر قدرت جریان ثانویه بر تنش برشی بستر پیرامون آبشکن سرسپری مستقر در موقعیت‌های مختلف قوس ۹۰ درجه با بستر صلب"، نشریه علوم آب و خاک، صنعتی اصفهان، ۱۳۹۵، ۷۵، ۴۵-۵۷.

Bahrami Yarahmadi M, Shafaie Bejestan M, "Sediment management and flow patterns at river bend due to triangular vanes attached to the bank", Journal of Hydro-Environment Research, 2015, 10, 64-75.

Blanckaert K, Buschman FA, Schleiss A, Wijbenga JHA, "Redistribution of velocity and bed-shear stress in straight and curved open channels by means of air bubble screen: Laboratory experiments", Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 2008, 134 (2), 184-195.

Blanckaert K, Graf WH, "Mean flow and turbulence in open channel bend", Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (10), 835-846.

Dey S, Barbhuiya AK, "Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment", Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32 (1), 213-232.

Dugue V, Blanckaert K, Schleiss A, "An Air-Bubble Screen used as a countermeasure to Reduce Erosion in Open-Channel bends", ICSE6-204, 27-31 August, Paris, 2012.

Dugué V, Blanckaert K, Schleiss A, "Influencing bend morphodynamics by means of an airbubble screen - Topography and velocity field", Proc of the 7th IAHR Symp on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Beijing, China, 2011.

Dugué V, Blanckaert K, Schleiss A, "Flow patterns induced by a bubble screen in a sharply curved flume based on Acoustic Doppler Velocity Profiler measurements", 8th Int Symp. on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Dresden, Germany, 19-21 September, 2012.

Dugue V, Blanckaert K, Chen Q, Schleiss A, "Reduction of bend scour with an airbubble screen Morphology and flow pattern", International Journal of Sediment Reserch, 2013, 28 (1), 15-23.

Dugue V, Blanckaert K, Chen Q, Schleiss A, "Influencing flow patterns and bed morphology in open channels and rivers by means of an air-bubble screen", Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 2015, 141 (1), 1-13.

Fazli M, Ghodsian M, Salehi Neyshabouri AA, "Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend", International Journal of Sediment Research, 2008, 23, 56-68.

Izadinia E, Heidarpour M, "Comparison of different configurations of air-bubble screens around the pier to control scour", International Congress on Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, 2015.

Lien HC, Hsieh TY, Yang JC, Yeh KC, "Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125 (10), 1097-1108.

مقایسه شکل‌های ۹-الف) با ۹-ب) بیانگر جایه‌جایی مکان بیشینه تنش برشی با نسبت ۱/۴ در نیمه دوم قوس از دیوار بیرونی به میانه کانال است، ازانگاهه پیش‌بینی می‌شود مسیر حرکت رسوبات بستر منطبق بر نقاطی باشد که تنش بیشتری دارند لذا با حضور سازه هوادهی ناحیه بیشینه آب‌شستگی به میانه کانال منطبق خواهد شد. پیش از این واقعی و همکاران (۱۳۹۵)، شاکر و کاشفی‌پور (۱۳۹۳) با به‌کاربردن سازه حفاظتی آب‌شکن در قوس ۹۰ درجه نیز الگوی تنش برشی مشابهی را گزارش کردند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه آزمایشگاهی بررسی قدرت جریان ثانویه، توزیع تنش برشی و الگوی جریان در حضور سازه هوادهی در قوس ملایم ۹۰ درجه پرداخته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که حضور سازه هوادهی در قوس موجب جایه‌جایی منطقه ماکزیمم سرعت و کاهش گرادیان فشار عرضی شده و قدرت جریان ثانویه نسبت به آزمایش مرجع کاهش یافته است. همچنین وجود سازه موجب انتقال ناحیه بیشینه قدرت جریان ثانویه از مقطع ۶۰ درجه به مقطع ۷۵ درجه شده و مقدار آن را به میزان ۳۵ درصد کاهش داده است لذا انتظار می‌رود میزان آب‌شستگی در این محدوده نیز کاهش یابد. همچنین حضور سازه موجب اصلاح الگوی توزیع سرعت شده به گونه‌ای که در مقطع ۷۴، ۶۵ و ۵۵ درجه بیشینه سرعت را به ترتیب به میزان ۷۵ و ۶۵ درصد از دیواره خارجی دور نموده است و سبب تولید جریان ثانویه‌ای شده که در خلاف جهت سلول گردشی ناشی از انحصار است. علاوه بر آن، سازه هوادهی الگوی تنش برشی را نیز اصلاح کرده و منطقه ماکزیمم تنش را به میانه فلوم منتقل نموده است لذا پیش‌بینی می‌شود منطقه ماکزیمم فرسایش از قوس بیرونی به میانه فلوم و در منطقه ماکزیمم سرعت و تنش برشی قرار گیرد.

۵- مراجع

شاکر، کاشفی‌پور س، م، "بررسی آزمایشگاهی توزیع سرعت و تنش برشی جریان در قوس ۹۰ درجه همراه و بدون وجود سری آب‌شکن"، نشریه دانش آب و خاک، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳، ۳، ۵۵-۶۸.

کوچک پ، "بررسی اثر هندسه آب‌شکن باندال لایک بر روی الگوی فرسایش در قوس ۹۰ درجه در شرایط استغراق"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۹۵.

ملکی پ، احديان ج، کاشفی‌پور س، م، فتحی‌قدم م، اشليز آ، "تأثیر سیستم تزریق هوا در کاهش آب‌شستگی قوس ملایم ۹۰ درجه"، نشریه هیدرولیک ایران، ۱، ۹۱-۱۰۵.

- Marion A, Zaramella M, "Effects of velocity gradients and secondary flow on the dispersion of solutes in a meandering channel", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132, 1295-1302.
- Mehraein M, Ghodsian M, Khosravi M, Vaghefi M, "Experimental study on flow pattern and scour hole dimensions around a t-shaped spur dike in a channel bend under emerged and submerged conditions", *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 15, 1019-1034.
- Odgaard A, Bergs A, "Flow processes in a curved alluvial channel", *Journal of Water Resources Research*, 1988, 24 (1), 45-56.
- Rozovskii IL, "Flow of water in bend of open channel", Academy of sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering, 1957, 233p.
- Shukry A, "Flow around bends in an open flume", *Transactions of the American Society of Civil Engineering*, 1950, 115 (1), 751-779.
- Wijbenga JHA, Schielen R, Blanckaert K, Buschman F, "Secondary flow and velocity redistribution by bubble screens in open channel bend", *International Conference on Fluvial Hydraulics*, LISBON, PORTUGAL, 6-8 September, 2006.
- Vaghefi M, Safarpoor Y, Hashemi SS, "Effects of distance between the T-shaped spur dikes on flow and scour patterns in 90 bend using the SSIIM model", *Journal of Ain Shams Engineering*, 2015, 7 (1), 31-45.
- Abhari MN, Ghodsian M, Vaghefi M, Panahpur N, "Experimental and numerical simulation of flow in a 90 bend", *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21 (3), 292-298.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of the an Air-bubble Screen on Flow Pattern and Secondary Flow Strength and Bed Shear Stress in a 90 Degree Mild Bend

Pari Maleki ^a, Javad Ahadiyan ^{a,*}, Seyed Mahmood Kashefipour ^a, Manoochehr Fathi Moghadam ^a, Anton Schleiss ^b

^a Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

^b College of Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland

Received: 28 April 2019; Accepted: 28 September 2020

Keywords:

3-D velocimeter, Secondary flow strength, Flow Pattern, Bed shear stress, Air bubble screen.

1. Introduction

The complex interactions between streamwise flow and curvature-induced secondary flow in bends, bed morphology cause erosion near the outer bank, and deposition near the inner bank, that it can endanger the outer bank's stability and also reduce the navigable width of the rivers. There are several techniques to protect the outer bank, reduce adverse impacts and control bed erosion in bends. Methods used in most parts of the world include submerged groynes, spur dikes, and bandal-like structures. But, many these Methods have the disadvantage of being fixed constructions on the bed river that caused a threat for navigation. This paper describes a new way that consists in changes the bed morphology with provoking changes in the flow pattern. Dugue, et al. (2011, 2012) studied morph dynamic bends rivers with the Air-bubble screen method. Their results reveal that the air bubble screen is able to modify the flow pattern by shifting the maximum scouring from the outer bank towards the center of the flume and does not endanger its stability anymore. Dugue et al., 2013 studied scour reduction at a 193° bend by an air-bubble screen method. Velocity pattern at 70° bend showed that the bubble-induced flow pattern overcame the secondary flow induced by the outer bank while decreasing the morphology slope. It also showed 50 percent reduction in the maximum scour depth. Shukry (1949) is one of the first researchers in the study of erosion of the outer bank of rivers in a canal with a 180-degree bend with various proportions of the rivers radius to its width. There have been very few investigations about air bubble screen in 90 bend, therefore in this study the effect of the air bubble screen on flow pattern and Secondary flow strength and bed shear stress in 90 degree bend under Froude numbers 0.45 is examined.

2. Methodology

2.1. Experimental study

The all of the experiments were carried out in a 90 degree bend channel with 0.7m width and 0.8m height, The R/B ratio for the channel bend was 4, at the hydraulic models laboratory of the faculty of water science and engineering of Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. The channel sidewalls were made of plexiglass. The straight channel lengths at the upstream was 5m and downstream of the bend was 3m, (Fig. 1).

* Corresponding Author

E-mail addresses: parima_6771@yahoo.com (Pari Maleki), ja_ahadiyan@yahoo.com (Javad Ahadiyan), kashefipour@excite.com (Seyed Mahmood Kashefipour), fatthi_mh@yahoo.com (Manochehr Fathi Moghadam), anton.schleiss@epfl.ch (Anton Schleiss).



Fig. 1. View of 90 degree bend channel

The flow depth was controlled using a slide gate that was installed at the end of the channel, and it of flow was kept at a constant 0.11m in all tests. The flow discharge was measured using an ultrasonic discharge meter, Digi Sonic E+Model (accuracy of ± 0.01 l/s). The flume bed was covered by uniform sand with a mean diameter of $d_{50}=1.5$ mm and a geometric standard deviation equal to 1.22 and the depth of the sediment in the channel was 20cm. In each test after leveling the bed sediments, the gate was completely closed and water slowly entered the channel and the depth and discharge were adjusted. To avoid any disturbance of the velocity meter due to moving sediment, the bed was fixed by spraying a mixture of diluted cement and after a one day the bed surface was hard enough to start the test. The three-dimensional velocity components (u, v, w) were measured using the electromagnetic velocity meter JFE ALEC model ACM3-RS in experiment with and without an air bubble screen. The sampling rate was 20 Hz and the minimum time of sampling was 60 seconds. Therefor, 1200 data points were recorded for each point and for analysis the result, their mean was determined. The Measurements were made in the cross sections 1.5m upstream of the bend and at 0, 15, 30, 45, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90° in the bend. The bubble screen system was formed from a porous pipe with an outer diameter of 1.5cm. The distance between the pores on the tube is 5cm. The air injection rate was also measured by a rotameter. Two 800-watt blowers were also used to provide airflow, which were connected on both sides of the pipe to allow air flow uniformly throughout the pipe (Fig. 2).



Fig. 2. Porous tube installed in the bend

3. Results and discussion

3.1. Effect of air bubble screen on velocity distribution variations and Secondary flow strength and shear stress

Flow pattern at transverse sections of 0, 30, 85 degrees, as well as the vector pattern of transverse and vertical (v, w) velocities for testing without air bubble screen are shown in Fig. 3. in figure at 0° in beginning of the bend, the max velocity (u), is formed near the inner bank of channel at a distance of 5 cm from it. According to Rozovskii (1957), the effect of secondary flow is also exist in the before the bend. At 30° to 85° , the max velocity region is located adjacent to the outer bank which causes erosion in this area. The contrast between the centrifugal force and the force induced by the lateral pressure gradient another cell of secondary current is generated anti-clockwise from the beginning of the bend to an section of 85 degrees. Shukry (1950), Blanckhardt and Graph (2001), Bahrami Yar Ahmadi and Shafaei Bejestan (2015) reported of existence of a rotating cell which is generated due to the contrast between the centrifugal force and the force induced by the lateral pressure gradient in their laboratory channel. Due to Fig. (3-d) to (3-f) show the flow pattern for the test with air bubble screen system that two types of re-circulating flow at the channel observe. The anti-clockwise cell is created by centrifugal force and the existence of a pressure gradient between the outer and inner bank, and clockwise cell is generated by the operation of air bubble screen. It was found that with the air bubble screen, the minimum velocities created near the outer bank for all angles along the bend, and the maximum velocity area is transferred from the outer bank to the center of the channel. According to result the experiments air

bubble screen caused the secondary flow power to be decreased in an average of 35% in comparison with the reference experiment and this reduction was due to the increasing of lateral velocity in the second half of the bend. As well as, the results showed that the application of the bubble screen resulted in a reduction of the maximum bed shear stress and the location of maximum shear stress with a ratio of 1.4 in the second half of the arc is moved away from the outer wall. These elementary experiments show the potential of air bubble screen to influence and modify the flow pattern and bed topography.

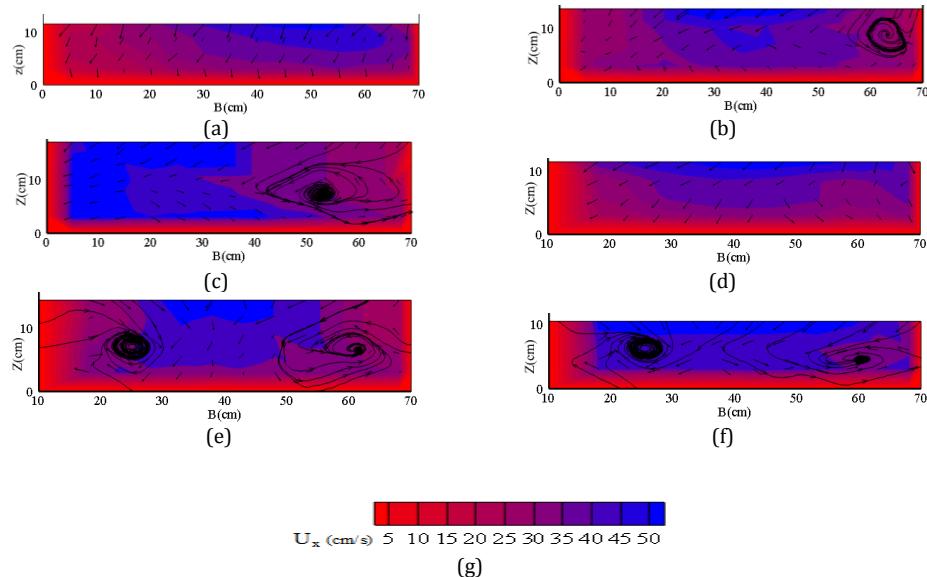


Fig. 3. View of Secondary flow pattern and velocity distribution in different sections;for reference test: a) 0° , b) 30° , c) 85° , and with air bubble screen, d) 0° , e) 30° , f) 85° , g) Longitudinal velocity

4. Conclusions

In this research, the effect of aeration structure on the flow pattern and secondary flow power and bed shear stress pattern in a 90 degree mild bend has been studied. All of the experiments were carried out under the clear water conditions. According to result experiments, the air bubble screen system was able to shift the maximum velocity lines and shear stress from the outer bank to the middle of the channel. The results show the potential of the bubble screen as a method to modify the flow pattern and morphology in a variety of applications in and open Channels and Especially Shallow rivers.

5. References

- Dugué V, Blanckaert K, Schleiss A, "Influencing bend morphodynamics by means of an airbubble screen- Topography and velocity field", Proc of the 7th IAHR Symp. on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Beijing, China, 2011.
- Dugué V, Blanckaert K, Schleiss A, "Flow patterns induced by a bubble screen in a sharply curved flume based on Acoustic Doppler Velocity Profiler measurements", 8th Int Symp. on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Dresden, Germany, 19-21 September, 2012.
- Dugué V, Blanckaert K, Chen Q, Schleiss A, "Reduction of bend scour with an airbubble screen Morphology and flow pattern", International Journal of Sediment Reserch, 2013, 28 (1), 15-23.
- Shukry A, "Flow around bends in an open flume", Transactions of the American Society of Civil Engineering, 1950, 115 (1), 751-779.
- Rozovskii IL, "Flow of water in bend of open channel", Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering, 1957, 233.
- Bahrami Yarahmadi M, Shafaie Bejestan M, "Sediment management and flow patterns at river bend due to triangular vanes attached to the bank", Journal of Hydro-Environment Research, 2015, 10, 64-75.
- Blanckaert K, Graf WH, "Mean flow and turbulence in open channel bend", Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (10), 835-846.