

مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی و آبستگی در قوس ۹۰ درجه

محمد واقفی^۱، مسعود قدسیان^{۲*}، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری^۳

۱- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس

۲- استاد هیدرولیک، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

ghods@modares.ac.ir

چکیده - جریان در قوس رودخانه‌ها تحت تأثیر دو نیروی گرادیان فشار و گریز از مرکز قرار دارد که اندرکنش آنها، جریان ثانویه را به وجود می‌آورد. در این مقاله به اندازه‌گیری آزمایشگاهی میدان جریان و آبستگی در قوس ۹۰ درجه پرداخته شده است. آزمایشها در نوعی کانال آزمایشگاهی با شعاع انحنای ملایم انجام شد. برای اندازه‌گیری میدان جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی استفاده شد. همچنین تغییرات توپوگرافی بستر با استفاده از دستگاه لیزری برداشت بستر اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده بیانگر تشکیل جریانی در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی، موسوم به جریان ثانویه دوم در نزدیکی ساحل خارجی است. این جریان از مقاطع میانی نیمه اول قوس تا انتهای قوس مشهود است. همچنین قدرت جریان ثانویه اصلی و مقدار چرخش سلولها در موقعیت ۴۵ درجه بیشترین مقدار را دارد. مقایسه‌ای بین مقاطع مختلف عرضی و افقی انجام و الگوی جریان و آبستگی تجزیه و تحلیل شد. گردابه‌های موجود در قوس، تغییرات در جریان ثانویه و چرخش المانها و بحث پیرامون آبستگی در ساحل خارجی و رسوبگذاری در ساحل داخلی، نکات دیگر مطرح شده در این مقاله است.

کلیدواژگان: الگوی جریان، قوس ۹۰ درجه، گردابه، جریان ثانویه، توپوگرافی بستر.

۱- مقدمه

مسیرهای قوسی رودخانه‌ها یکی از نقاطی است که الگوی پیچیده‌ای از جریان در آن برقرار می‌شود. این پیچیدگی نه فقط به دلیل آشفتگی و طبیعت سه‌بعدی جریان، بلکه به سبب توپوگرافی و تغییرات عمق است که در حالت کلی، از فرایندهای فرسایش، انتقال رسوب و رسوبگذاری تأثیر می‌پذیرد.

با ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز بر آن اثر می‌گذارد. این نیرو در راستای شعاع قوس و نیز در جهت عمق بخاطر تغییر سرعت متغیر می‌باشد. نیروی گریز از مرکز موجود در قوس باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب و این پدیده موجب ایجاد گرادیان فشار جانبی در مقطع عرضی می‌شود. هرگاه گرادیان فشار بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند، جریانی در جهت عرضی در قوس

شکل می‌گیرد که به جریان ثانویه موسوم است. در اثر این جریان، ذرات موجود در سطح آب به طرف دیوار بیرونی حرکت کرده و ذرات کف به طرف دیوار داخلی جابه‌جا می‌شوند. بر اثر اندرکنش جریان ثانویه با جریان طولی، الگوی جریان خاصی به نام جریان حلزونی تشکیل می‌شود.

در زمینه آبشستگی و الگوی جریان در مسیرهای قوسی تحقیقات متعددی انجام شده است. Shukry (۱۹۵۰) به تعیین معیاری برای تعیین قدرت جریان ثانویه در قوس رودخانه‌ها پرداخت که این معیار در هر مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی. Drinker و Ippen (۱۹۶۲) با تزریق ماده رنگی مشاهده کردند که جهت حرکت رشته‌های رنگی نازک در بستر کانال به طرف قوس داخلی می‌باشد، در حالی که مسیر حرکت در سطح آب تمایل به سمت ساحل خارجی دارد. آنان این پدیده را تأثیر اصطکاک دیوارها بر میدان جریان نامیدند. Nouh و Townsend (۱۹۷۹) به بررسی تأثیر جریان ثانویه بر توزیع تنش برشی بستر پرداختند و نشان دادند که تأثیر جریان ثانویه تولید شده پس از خروجی قوس، نه تنها از بین نمی‌رود بلکه تا فاصله‌ای مستقیم در پایین دست قوس ادامه می‌یابد. Rodi و همکاران (۱۹۷۸) در حل معادلات ناویر استوکس از مدل $k-\varepsilon$ استفاده کردند و با در نظر گرفتن بار بستر و بار معلق، به تعیین الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه پرداختند. Lien و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده از مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق، الگوی جریان را در دو قوس ۹۰ و ۱۸۰ درجه بررسی کردند. Graf و Blanckaert (۲۰۰۱) به بررسی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه پرداختند. آنان مشاهده کردند که یک جریان چرخشی اصلی و یک جریان چرخشی در خلاف جهت جریان اول در نزدیکی ساحل بیرونی وجود

دارد و حداکثر سرعت در مرز این دو جریان روی می‌دهد. Shams و همکاران (۲۰۰۲) با تحلیل عددی و آزمایشگاهی در یک کانال قوسی نتیجه گرفتند که کمیت‌های متوسط اندازه‌گیری شده جریان با نتایج مدل عددی شباهت دارد، اما پارامترهای آشفتگی ناشی از اندازه‌گیری‌ها با نتایج مدل عددی متفاوت است. Graf و Blanckaert (۲۰۰۴) به بررسی باز توزیع سرعت، تنش برشی مرزی، شکل و خصوصیات توپوگرافی بستر در خم کانال‌ها پرداختند و براساس داده‌های آزمایشگاهی، جمله‌های مختلف معادله مومتم را بررسی قرار کردند. Yang (۲۰۰۵) به بررسی اندرکنش تنش برشی مرزی و الگوی توزیع سرعت و جریانهای ثانویه در کانال‌های باز پرداخت. او توزیع سرعت و تنش برشی را در حالت جریان یکنواخت، ماندگار و متلاطم به کار برد و با در نظر گرفتن اثر سرعت عمود بر دیوار کانال، به تبیین معادلات حاکم برای توزیع تنش رینولدزی و تنش برشی مرزی پرداخت. Roca و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی و کاهش فرسایش بستر کانال‌های قوسی با استفاده از نوعی کف‌بند خاص پرداختند که کاهش ۴۰ درصدی آبشستگی را در پی داشت. Zeng و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی جریان و انتقال رسوب در کانال‌های قوسی با شیب تند پرداختند و با بررسی دو حالت بستر تخت و تعادل یافته مربوط به دو مرحله ابتدایی و انتهایی فرایند آبشستگی و رسوبگذاری، نتیجه گرفتند که بهبود کیفی مدل‌های آشفتگی و مدل‌های انتقال رسوب، باعث پیش‌بینی و سازگاری بهتر مدل‌های انتقال رسوب می‌شود. دهقانی و همکاران (۱۳۸۶) به بررسی تغییرات بستر کانال‌های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه پرداختند و نتیجه گرفتند که در شرایط هیدرولیکی متفاوت، در نیمه اول قوس یک تپه رسوبی در قوس داخلی و یک چاله فرسایشی در روبروی این تپه رسوبی

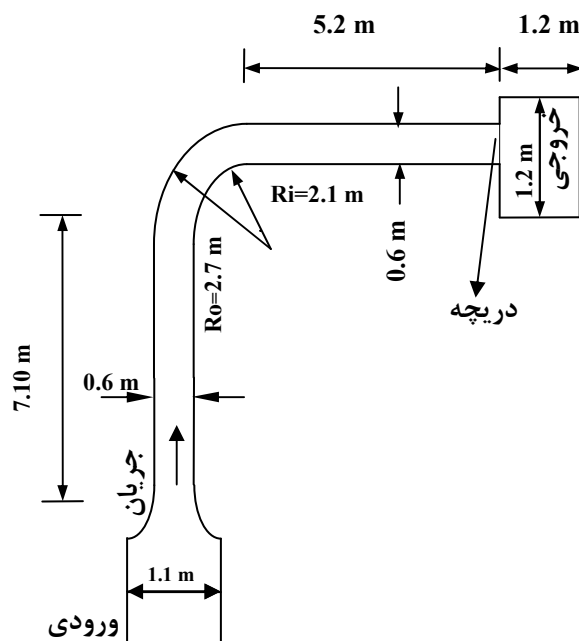
شکل می‌گیرد. همچنین در نیمه دوم قوس، تپه رسوبی در قوس داخلی و چندین ناحیه فرسایشی در قوس خارجی شکل می‌گیرد که محل چاله‌های فرسایشی تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان است. فضلی و همکاران (۱۳۸۶) به بررسی تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه در شرایط مختلف جریان پرداختند و نتیجه گرفتند که در حالت $1/33 < U/U_c < 1/24$ دو چاله فرسایشی در جدار خارجی قوس تشکیل می‌شود (U و U_c به ترتیب سرعت جریان و سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب می‌باشند). اما در حالت $U/U_c < 1$ فقط یک چاله فرسایشی در نزدیکی خروجی قوس به وجود می‌آید و در حالت $1/1 < U/U_c < 1$ دو چاله فرسایشی در جداره خارجی به یکدیگر نزدیک یا در یکدیگر ادغام می‌شوند.

در مقاله حاضر به بررسی الگوی جریان و آبستگي در قوس ۹۰ درجه ملایم پرداخته شده است. بحث در باره جریان ثانویه، تعیین قدرت جریان ثانویه، چرخش المان‌های شبکه اندازه‌گیری شده و تغییرات خط جریان در لایه‌های مختلف برخی از نکات مطرح شده در این مقاله است.

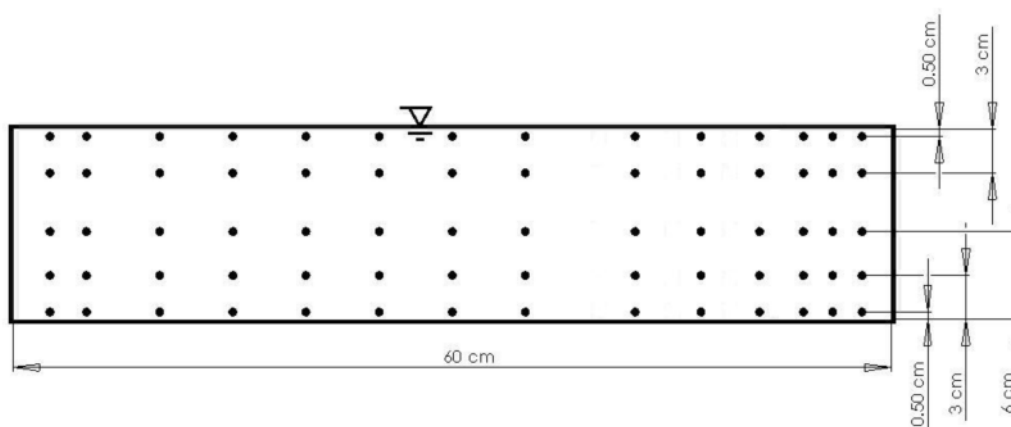
۲- آزمایشها

آزمایشهای مورد نظر در کانالی با قوس ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. شکل ۱ هندسه کانال را نشان می‌دهد. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۷/۱ متر در بالادست قوس و قسمت مستقیمی به طول ۵/۲ متر در پایین‌دست قوس تشکیل شده که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه‌ای به شعاع انحنای خارجی ۲/۷ متر به یکدیگر متصل شده است. کانال از شیشه ساخته شده و توسط قاب‌هایی فولادی پایداری آن حفظ می‌شود. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر ۴، ارتفاع آن برابر ۷۰

سانتی‌متر و عرض آن برابر ۶۰ سانتی‌متر است. کف کانال از رسوبهایی با قطر متوسط ۱/۲۸ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی ۱/۳ ($\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$) به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر پوشیده شده است. برای تنظیم جریان از دریچه‌ای قطاعی در انتهای کانال استفاده شد. در تمامی آزمایشها دبی جریان ثابت و برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه و شرایط آب زلال حاکم بود. زمان تعادل آزمایشها برابر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد و مبنای این انتخاب آبستگي کمتر از یک میلی‌متر در دو فاصله متوالی ۵ ساعته بوده است. مدت زمان اشباع کانال بین ۲۰ تا ۳۰ دقیقه است. قبل از شروع آزمایش، آب توسط لوله‌ای از بالادست و پایین‌دست کانال جاری می‌شود. در طی این مدت، یک دریچه کشویی در جلوی دریچه قطاعی کانال قرار می‌گرفت که وظیفه آن جلوگیری از خروج آب از کانال است. پس از بالا آمدن سطح آب در کانال، جریان به‌طور تدریجی به دبی مورد نظر افزایش می‌یافت. سپس دریچه کشویی به‌طور تدریجی از جلوی مسیر جریان خارج می‌شد. مقدار جریان در طول آزمایش توسط روزنه نصب شده در کنار کانال تنظیم می‌شد. در انتهای آزمایش نیز با خاموش کردن پمپ، جریان به‌طور تدریجی از کانال خارج و زهکشی کانال در مدت زمان ۲ تا ۳ ساعت انجام می‌شد. عمق آب در ابتدای قوس برابر ۱۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. برداشت مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان، در ۱۲ مقطع عرضی در طول قوس (صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه) و در ۵ لایه انجام شد. همچنین در هر محور عرضی ۱۴ نقطه قرائت و ثبت می‌شد. شبکه‌بندی ذکر شده غیر یکنواخت بوده و در نزدیکی قوس خارجی شبکه ریزتر است. در شکل ۲ طرحواره نقاط برداشت در مقاطع عرضی ارائه شده است. برای اندازه‌گیری سرعت از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی Vecterino استفاده شد.



شکل ۱ هندسه کانال آزمایشگاهی



شکل ۲ طرحواره نقاط برداشت داده در مقاطع عرضی

تعریف شده برابر یک دقیقه بود. در هر نقطه و در هر جهت، ۳۰۰۰ داده با این دستگاه برداشت شد که این داده‌ها توسط نرم‌افزارهای جانبی *vecterino* و *explore v* متوسط‌گیری می‌شود. سرعت‌های برداشت شده در طول قوس ۹۰ درجه از مختصات قطبی به مختصات دکارتی تبدیل شد. همچنین مشاهدات کیفی (تزریق مواد رنگی، حرکت ربا‌های رنگی و تزریق براده چوب) به‌منظور

این دستگاه، مولفه‌های سرعت را در فاصله ۵ سانتی‌متری نوک حسگر آن اندازه‌گیری می‌کند. به همین دلیل در اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی سطح، از حسگر جانب‌نگر^۱ و در لایه‌های دیگر از حسگر پایین‌نگر^۲ استفاده شد. دستگاه سرعت‌سنج روی فرکانس ۵۰ هرتز تنظیم شد و مدت زمان اندازه‌گیری هر نقطه از شبکه‌بندی

1. Side Looking
2. Down looking

مشاهده الگوی جریان انجام شد. برای برداشت توپوگرافی بستر نیز از دستگاه لیزری برداشت پروفیل بستر¹ LBP استفاده شد. این دستگاه به منظور برداشت داده در کانال‌های آزمایشگاهی توسط نویسندگان مقاله و جمعی از مهندسان طراحی و ساخته شده است. در شکل ۳ نمای از این دستگاه نمایش داده شده است. این دستگاه قابلیت برداشت پروفیل بستر در مسیرهای قوسی و مستقیم را دارد. دستگاه مذکور به صورت کاملاً خودکار، بر روی عرض کانال حرکت کرده و بدون هیچگونه تماسی با بستر کانال و نیز با دقتی کمتر از نیم میلی‌متر، تراز کف کانال را ثبت کرده و به صورت مختصات سه بعدی در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

برای برداشت پروفیل بستر از شبکه‌ای شامل ۴۵ مقطع عرضی استفاده شده است. در هر مقطع عرضی نیز ۶۰ نقطه در عرض کانال برداشت شد. شکل ۴ قسمتی از شبکه مذکور را که بزرگنمایی شده نشان می‌دهد. شکل ۵ توپوگرافی قوس ۹۰ درجه و مسیر مستقیم پایین دست آن را که توسط دستگاه مذکور برداشت شده نشان می‌دهد.

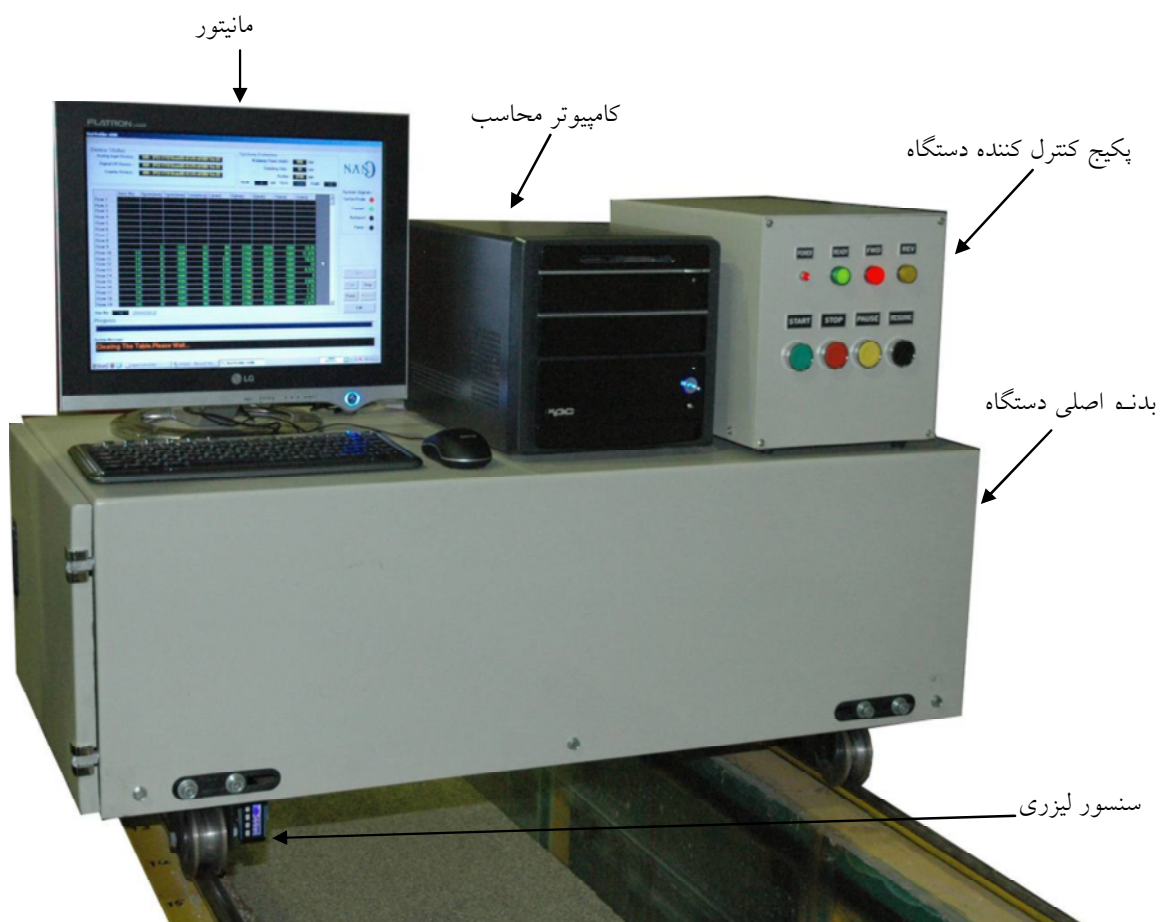
۳- نتایج و مشاهدات

مشاهدات الگوی جریان در قوس بیانگر وجود جریانهای ثانویه در مقاطع مختلف است. در شکل ۶ برای نمونه، الگوی جریان در مقاطع مختلف قوس ۹۰ درجه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود خطوط جریان در تمامی مقاطع در سطح آب به سمت قوس خارجی و در بستر به سمت قوس داخلی است. علت آن است که با ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر کرده و باعث اختلاف تراز سطح آب بین ساحل خارجی و داخلی می‌شود. بر اثر این پدیده، اختلاف فشاری بین دو سمت قوس ایجاد می‌شود.

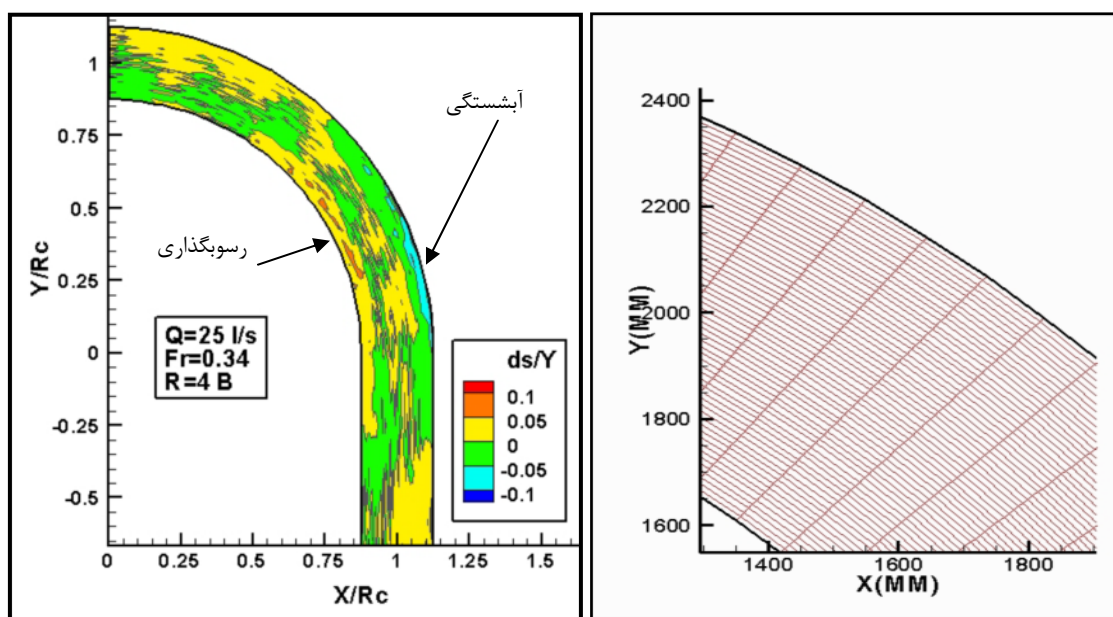
نتایج نشان می‌دهد که جریان ثانویه در مقاطع عمود بر مسیر آب و از مقطع ۳۰ درجه به بعد به وجود می‌آید. در شکل ۶- ب وجود جریان ثانویه دوم در مقطع ۵۰ درجه در خلاف جهت جریان ثانویه اول در نزدیکی قوس خارجی و در لایه‌های بالایی مشهود است. علت تشکیل این جریان آن است که تراز جریان سطحی پس از برخورد به دیوار قوس خارجی افزایش یافته و نیرویی را به طرف پایین دست ایجاد می‌کند و در نتیجه، جریان ثانویه دوم در نزدیکی قوس خارجی شکل می‌گیرد. تا زاویه حدود ۸۰ درجه، جریان ثانویه دوم با شدت کمتری مشاهده می‌شود. جریان ثانویه دوم عاملی برای کاهش آبشستگی در قوس خارجی است. لازم است ذکر شود که Graf و Blanckaret در سال ۲۰۰۱ در طی مطالعاتی که بر روی الگوی جریان در قوس ۱۲۰ درجه انجام دادند، وقوع سلول چرخشی دوم را در زاویه ۶۰ درجه گزارش کردند.

همچنین توپوگرافی بستر در قوس، آبشستگی را در ساحل خارجی از حدود زاویه ۶۵ درجه به بعد نشان داد که دلیل آن، کاهش قدرت جریان ثانویه دوم از این مقطع تا انتهای قوس بوده که با توجه به جهت مخالف آن نسبت به جریان ثانویه اصلی، باعث شروع آبشستگی می‌شود، ضمن این که رسوبگذاری در ساحل داخلی و از زاویه ۵۰ درجه به سمت پایین دست قوس آغاز می‌شود. شکل ۷ نمونه‌ای را از پروفیل عرضی بستر در طول قوس ۹۰ درجه نشان می‌دهد. شکل ۷- الف پروفیل عرضی بستر را در ابتدای قوس نشان می‌دهد. در این مقطع توپوگرافی بستر تقریباً ثابت است. شکل‌های ۷- ب تا ۷- و پروفیل‌های عرضی بستر را در نیمه دوم قوس نشان می‌دهند، که بیانگر آبشستگی در قوس خارجی و رسوبگذاری در قوس داخلی است و تاثیر جریان ثانویه را در حرکت مصالح بستر به سمت قوس داخلی نشان می‌دهد.

1. Laser Bed Profiler

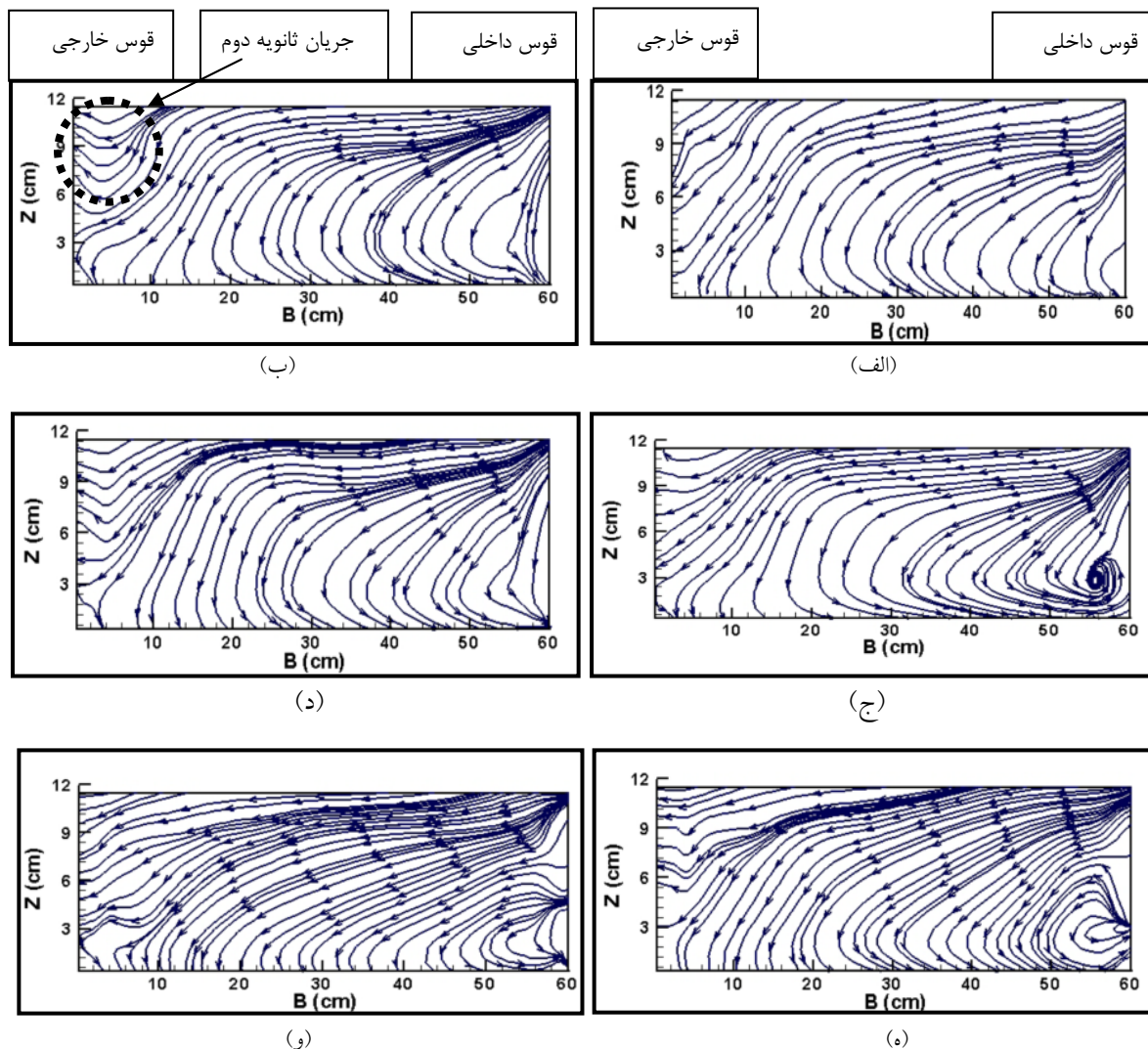


شکل ۳ نمایشی از دستگاه برداشت پروفیل بستر لیزی



شکل ۵ توپوگرافی قوس ۹۰ درجه و مسیر مستقیم پایین دست بستر

شکل ۴ قسمتی از شبکه برداشت توپوگرافی



شکل ۶ نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع مختلف عرضی قوس ۹۰ درجه:

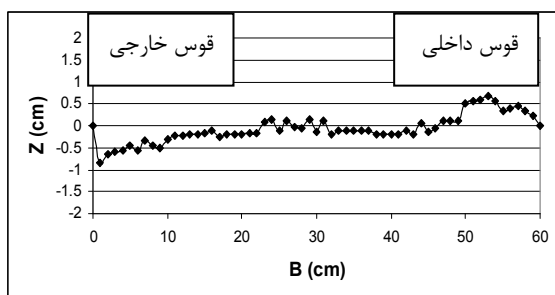
(الف) ۳۰، (ب) ۵۰، (ج) ۶۰، (د) ۷۰، (ه) ۸۰ و (و) ۹۰ درجه

تغییر مکان هندسی مسیر سرعت حداکثر به سمت ساحل خارجی و حرکت مورب رسوبات به سمت ساحل داخلی به دلیل عملکرد جریان حلزونی است. شکل ۷-ه پروفیل عرضی بستر را در یک متری بعد از قوس و در مسیر مستقیم پایین دست قوس نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم تغییر عمده در توپوگرافی بستر است. البته در فاصله بین انتهای قوس تا مقطعی به فاصله حدود ۱/۵ برابر عرض کانال، آبشستگی در نزدیکی ساحل خارجی مشاهده

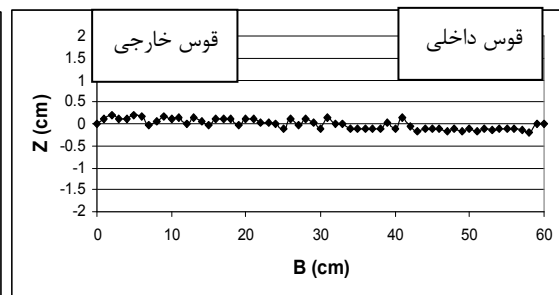
دلیل این پدیده، تغییر مکان هندسی مسیر سرعت حداکثر به سمت قوس خارجی و در نتیجه افزایش سرعت جریان در این محدوده است. با افزایش سرعت جریان، تنش برشی در نزدیکی بستر بیشتر شده و در نتیجه آبشستگی ایجاد می‌شود. در محدوده انتهایی قوس، عدم تشکیل جریان ثانویه دوم نیز به افزایش میزان آبشستگی کمک می‌کند. همچنین رسوبگذاری در ساحل داخلی از مقطع ۵۰ درجه به بعد به دلیل کاهش سرعت جریان ناشی از

می‌شود که دلیل آن کاهش تراز آب در پایین‌دست قوس خارجی است. به همین دلیل گرادیان طولی فشار در خروجی قوس منفی می‌شود که این باعث افزایش تنش برشی، حرکت رسوبات و در نتیجه ایجاد آبشستگی می‌شود. بیشترین مقدار آبشستگی و رسوبگذاری به ترتیب به اندازه ۸/۵ و ۷ درصد عمق جریان در ابتدای قوس به ترتیب در موقعیت ۸۵ درجه‌ای (در نزدیکی ساحل

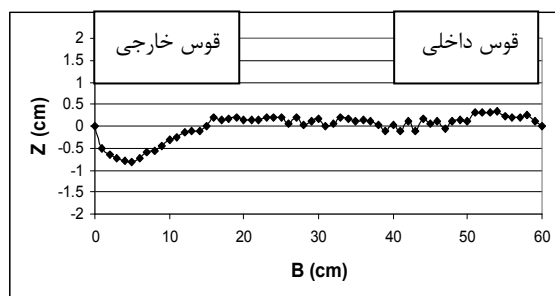
خارجی) و ۵۵ درجه‌ای (در نزدیکی قوس داخلی) می‌دهد. شکل ۸ (الف تا ج) برای نمونه، خطوط جریان را در فاصله ۵ میلی‌متری از بستر اولیه، در فاصله میانی عمق جریان و در فاصله ۵ میلی‌متری از سطح جریان نشان می‌دهد.



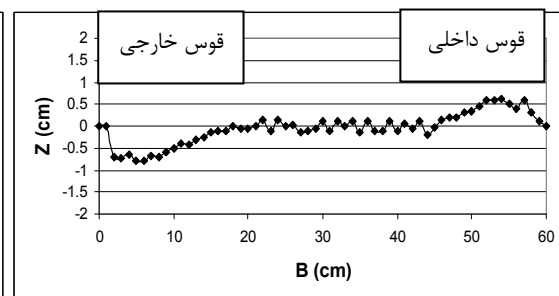
(ب)



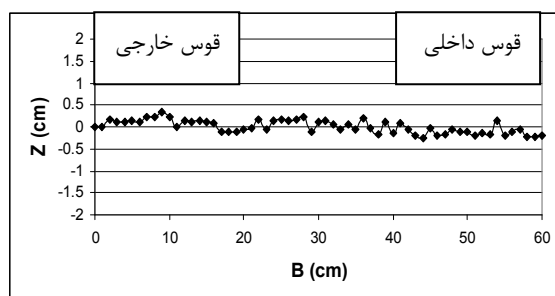
(الف)



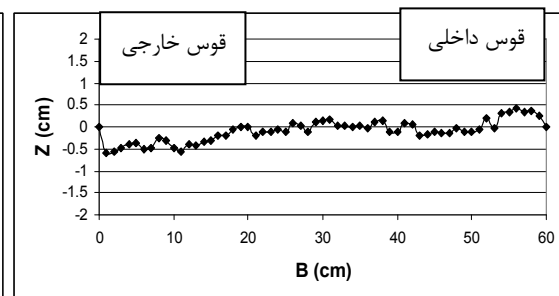
(د)



(ج)



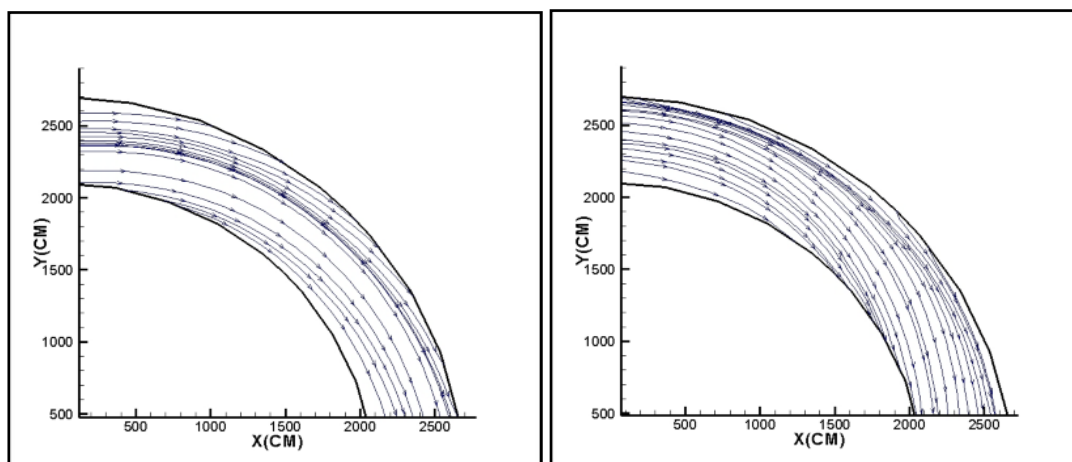
(ه)



(و)

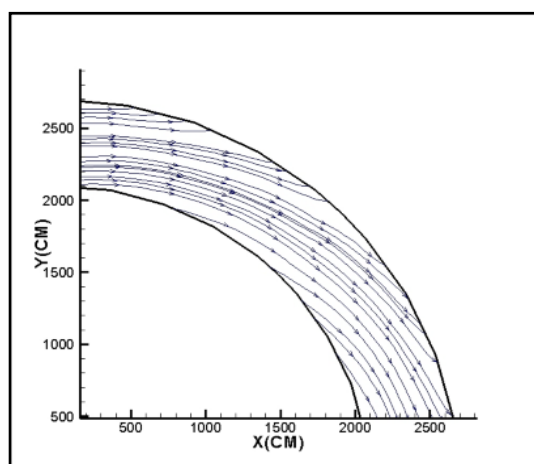
شکل ۷ نمونه ای از پروفیل‌های عرضی بستر در مقاطع مختلف عرضی قوس ۹۰ درجه:

(الف) صفر، (ب) ۶۰، (ج) ۷۰، (د) ۸۰، (و) ۹۰ و (ه) یک متری پایین‌دست قوس



(ب)

(الف)



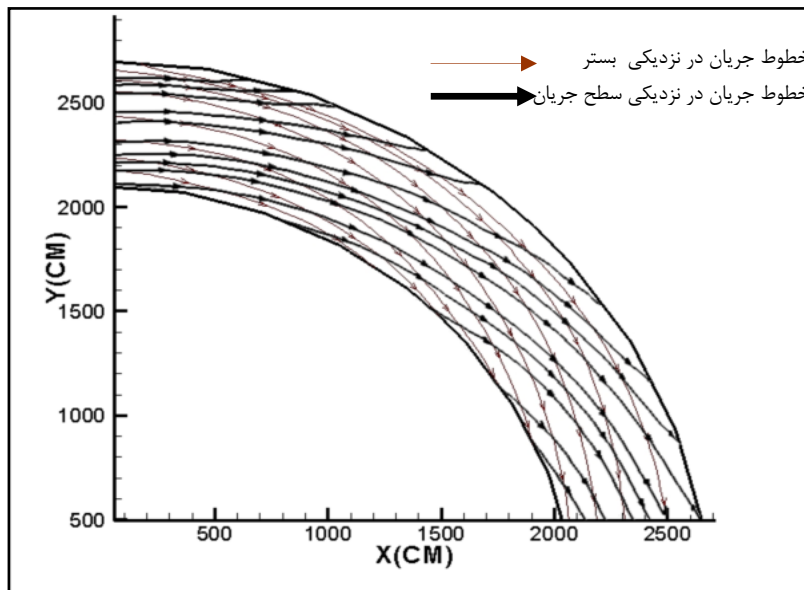
(ج)

شکل ۸ الگوی جریان در پلان‌های مختلف قوس ۹۰ درجه:

(الف) ۵ میلی‌متری، (ب) ۶۰ میلی‌متری و (ج) ۱۱۵ میلی‌متری از کف

شکل ۹ نمایش همزمان خطوط جریان در لایه نزدیک کف و سطح آب است. بررسی نتایج نشان داد که زاویه بین خطوط جریان در سطح و در نزدیکی بستر به‌طور متوسط بین ۱۵ تا ۲۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و به سمت ساحل خارجی است و بیانگر الگوی جریان شکل گرفته در قوس است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود جریان در نزدیکی بستر به سمت قوس داخلی بوده و با افزایش تراز سطح آب، خطوط جریان به سمت قوس خارجی متمایل می‌شود. این پدیده ناشی از ترکیب جریان ثانویه با جریان طولی و تشکیل جریان حلزونی و بیانگر قوی‌تر شدن جریان ثانویه در قوس نسبت به مسیر مستقیم است.



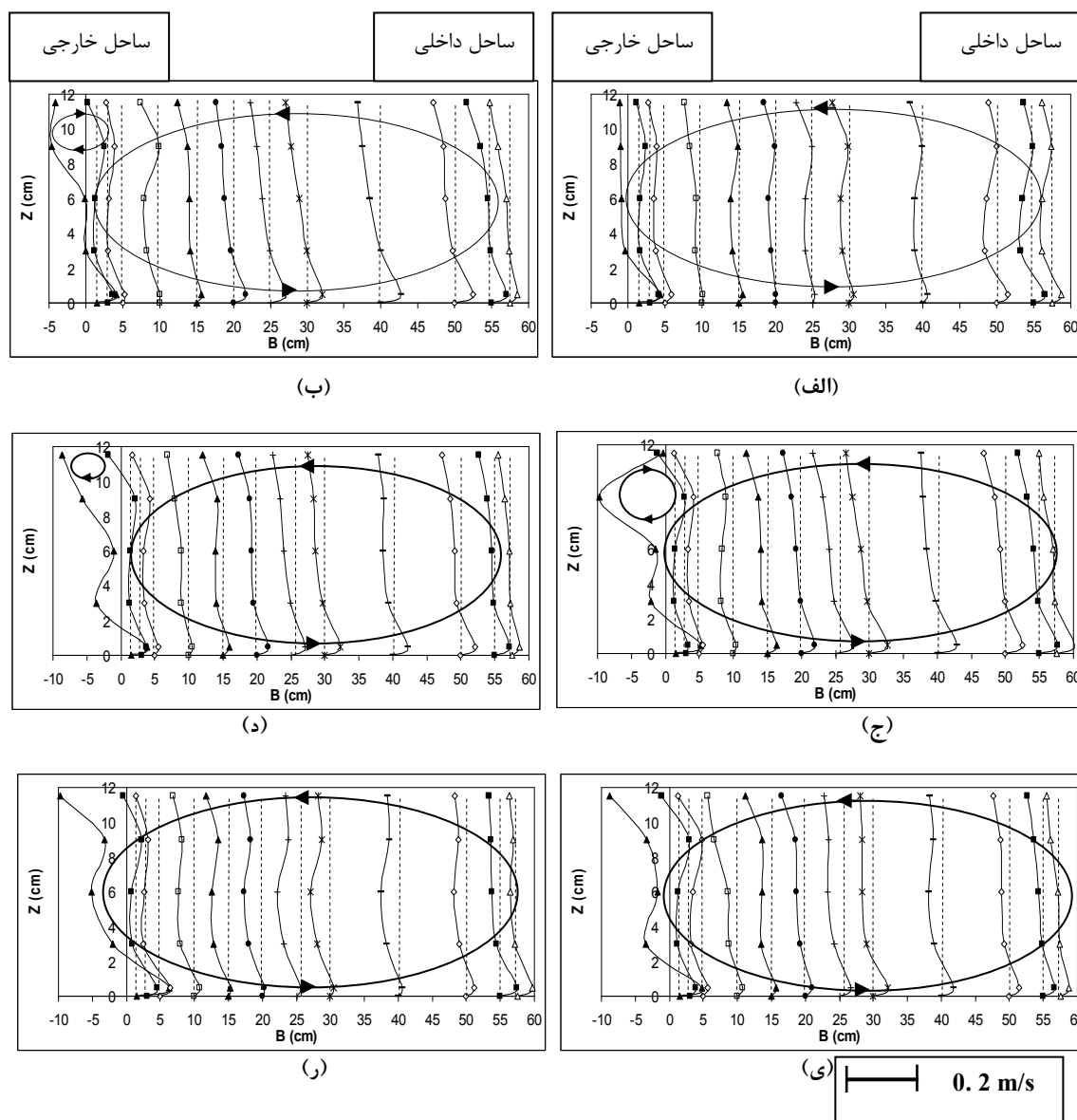
شکل ۹ نمایش همزمان خطوط جریان در لایه کف بستر و نزدیک سطح آب

ثانویه اصلی می‌شود. با افزایش قدرت جریان ثانویه و در نتیجه جریان حلزونی در قوس خارجی آبشستگی پدید می‌آید که این پدیده در پروفیل‌های بسترارائه شده در شکل‌های ۷-ج تا ۷-ه مشاهده می‌شود.

شکل ۱۱ نمونه‌ای از پروفیل‌های سرعت طولی در مقاطع مختلف قوس ۹۰ درجه را نشان می‌دهد. اگر عرض کانال به ۳ قسمت فرضی تقسیم شود، در یک سوم میانی و در مقاطع ابتدایی و انتهایی تقریباً توزیع لگاریتمی سرعت برقرار است. اما در نزدیکی ساحل به دلیل وجود جریان‌های ثانویه و حلزونی و تأثیرگذاری دیوار بر جریان و انحنای خطوط جریان، سرعت طولی در عمق توزیع لگاریتمی ندارد.

شکل ۱۲ نمونه‌ای از پروفیل سرعت عمقی را در مقاطع مختلف عرضی نشان می‌دهد. در نزدیکی ساحل، به‌ویژه در ساحل خارجی، به دلیل تأثیر دیوار و تشدید جریان‌های حلزونی، جریان‌هایی رو به بالا و رو به پایین به‌طور متناوب مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰ نمونه‌ای از پروفیل‌های سرعت عرضی را در چند مقطع از قوس ۹۰ درجه نشان می‌دهد. در ابتدای قوس جریان ثانویه شروع به شکل‌گیری کرده و قدرت کمتری دارد. در شکل ۱۰-الف این جریان با توجه به تغییرات پروفیل عرضی سرعت آشکار است. شکل‌های ۱۰-ب و ۱۰-ج به ترتیب مربوط به مقاطع عرضی ۵۰ و ۶۰ درجه می‌باشند. در این مقاطع علاوه بر افزایش قدرت جریان ثانویه، وقوع جریان ثانویه دوم با جهتی مخالف جریان ثانویه اصلی در لایه‌های میانی تا سطح آب و نزدیک ساحل خارجی مشهود است. وقوع جریان ثانویه دوم با توجه به جهت مخالف آن با جریان اصلی از قدرت جریان ثانویه اصلی می‌کاهد. این روند در خطوط جریان ترسیم شده در شکل‌های ۶-ب و ۶-ج نیز قابل مشاهده است. در مقطع ۷۰ درجه همان‌طور که در شکل ۱۰-د مشاهده می‌شود، سرعت‌های عرضی در لایه بالایی قوس خارجی مقدار کمتری دارد و باعث کاهش قدرت جریان ثانویه دوم می‌شود. در مقاطع پایانی قوس، جریان ثانویه دوم از بین رفته و باعث افزایش مجدد قدرت جریان



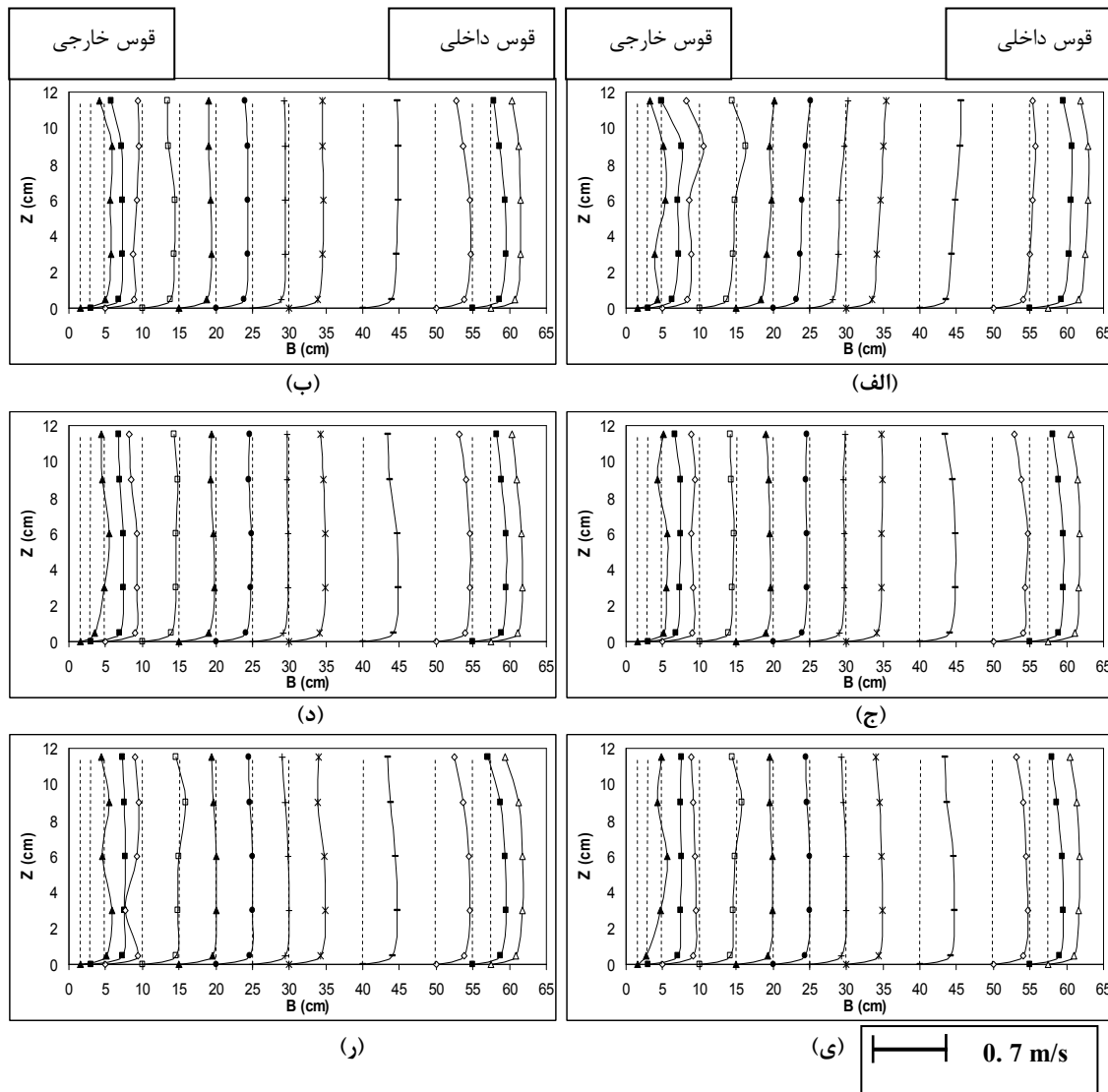
شکل ۱۰ نمونه‌ای از پروفیل عرضی سرعت در مقاطع قوس ۹۰ درجه:

(الف) صفر، (ب) ۵۰، (ج) ۶۰، (د) ۷۰، (ی) ۸۰ و (ر) ۹۰ درجه

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بردارهای سرعت در نزدیکی سطح جریان به سمت ساحل خارجی و در نزدیکی بستر به سمت ساحل داخلی است. مسیر خط حداکثر سرعت در ترازهای مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

همچنین جریان در بیشتر نقاط به‌ویژه لایه نزدیک بستر، به دلیل وجود جریان‌های عرضی به سمت ساحل داخلی به صورت رو به پایین و در نزدیکی سطح آب رو به بالا است.

در شکل ۱۳ نمونه‌ای از بردارهای سرعت در نزدیکی بستر، وسط عمق جریان و نزدیکی سطح جریان نشان داده



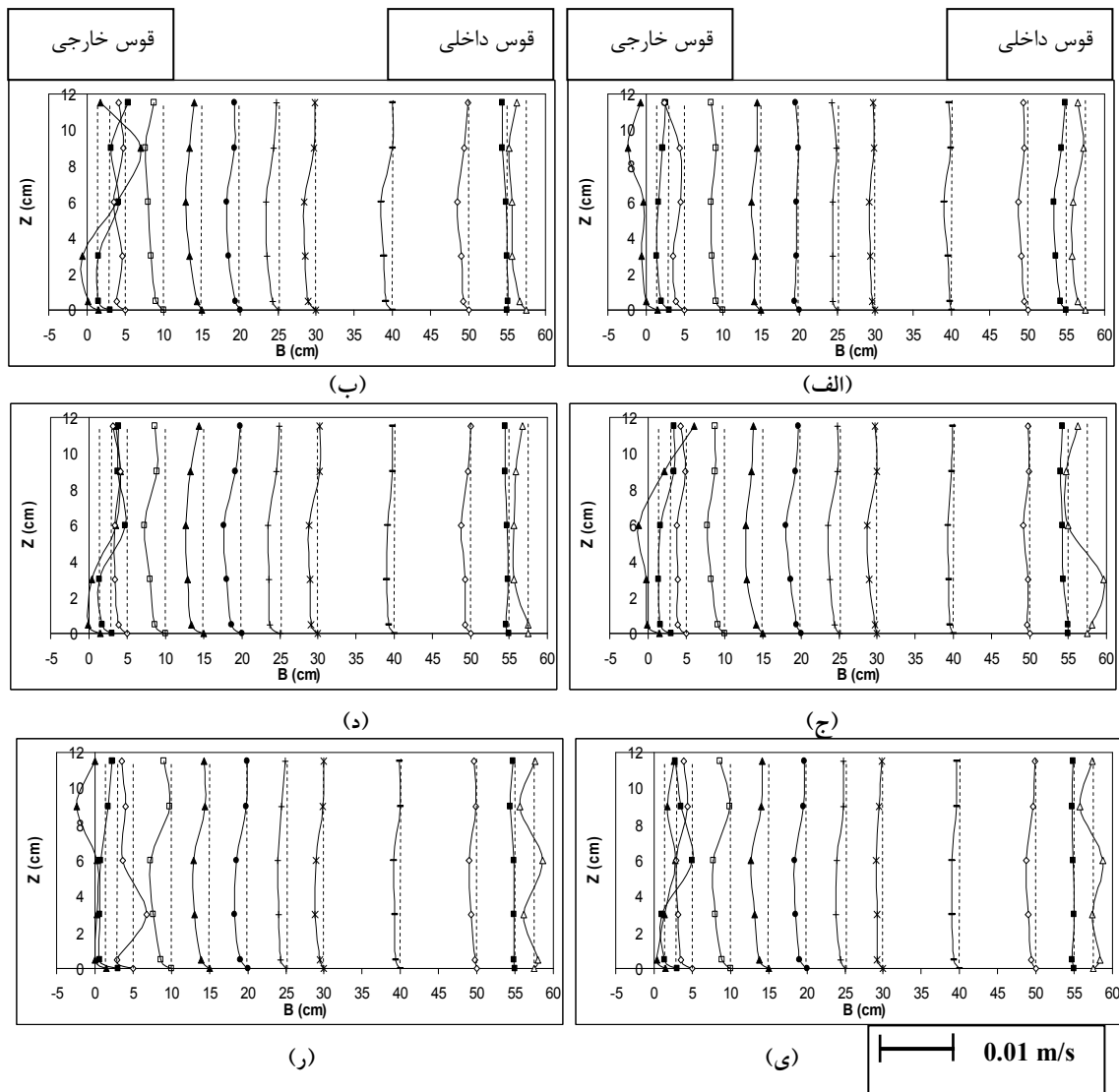
شکل ۱۱ نمونه‌ای از پروفیل طولی سرعت در مقاطع قوس ۹۰ درجه:

(الف) صفر، (ب) ۵۰، (ج) ۶۰، (د) ۷۰، (ی) ۸۰ و (ر) ۹۰ درجه

به منظور بررسی کمی جریان ثانویه در مسیرهای قوسی دو معیار اصلی وجود دارد که در این مقاله این دو معیار بررسی می‌شود. Shukry در سال ۱۹۵۰ با انجام مطالعاتی روی جریان در قوس رودخانه، ضمن تشریح سازوکار جریان ثانویه، معیار زیر را برای قدرت جریان ثانویه (S_{xy}) معرفی کرده است:

$$S_{xy} = \frac{K_{lateral}}{K_{main}} \quad (1)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود در لایه‌های نزدیک بستر، حداکثر سرعت در ساحل داخلی شکل می‌گیرد و موقعیت آن نیز در طول قوس متمایل به ساحل داخلی است. با افزایش تراز جریان، تغییر موقعیت سرعت حداکثر مشهود است. در لایه نزدیک سطح جریان - همان‌طور که مشاهده می‌شود - خط سرعت حداکثر به سمت قوس خارجی سوق می‌یابد.



شکل ۱۲ نمونه‌ای از پروفیل عمقی سرعت در مقاطع قوس ۹۰ درجه:

(الف) صفر، (ب) ۵۰، (ج) ۶۰، (د) ۷۰، (ی) ۸۰ و (ر) ۹۰ درجه

محور Z (متوسط مجموع چرخش وجوه Δx و Δy)، چرخش نامیده شده و به صورت معادله (۲) بیان می‌شود.

$$\overline{\omega_z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

در این معادله u سرعت در جهت عرضی و v سرعت در جهت عمقی است. در این تحقیق برای ۱۲ مقطع در طول قوس ۹۰ درجه با هر دو روش ذکر شده قدرت جریان

که در آن K_{main} و $K_{lateral}$ به ترتیب عبارتند از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی و انرژی جنبشی جریان اصلی.

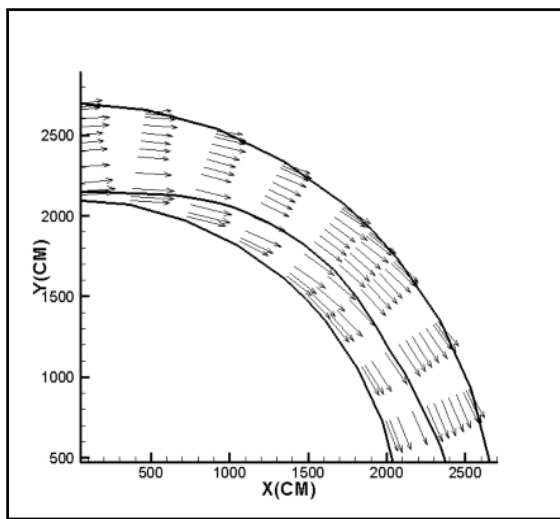
معیار دیگری که برای قدرت جریان ثانویه در مراجع به آن اشاره شده، معیار چرخش^۱ است. طبق تعریف، نرخ خالص چرخش پادساعتگرد المانی به ابعاد $\Delta x \times \Delta y$ حول

1. Vorticity

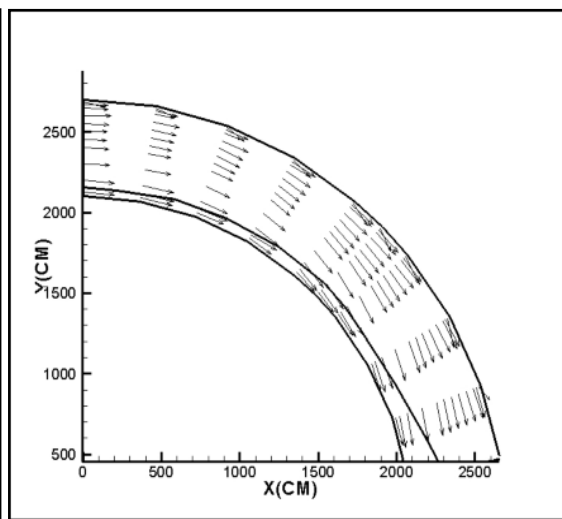
ثانویه و میزان چرخش المان‌های شبکه محاسبه شده است.

در شکل ۱۴ مقایسه‌ای کمی بین قدرت جریان ثانویه به روش شکری و مقدار چرخش مربوط به هر مقطع نشان داده شده است. در محاسبه چرخش برای هر مقطع، مقدار متوسط چرخش محاسبه شده و با مقدار حداکثر چرخش (ω_{max}) در مقاطع مختلف در طول قوس بی‌بعد شده

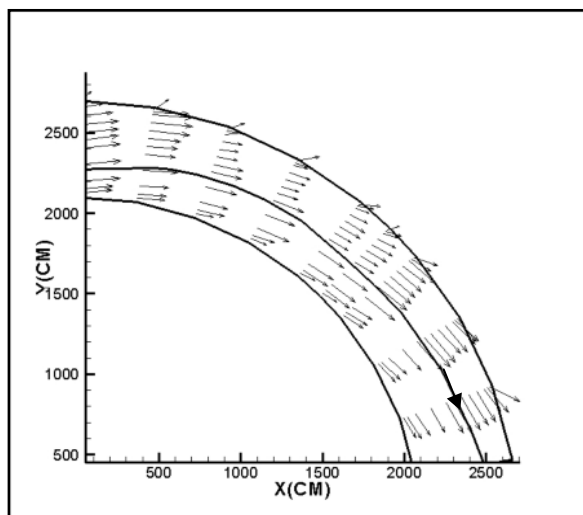
است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش شکری از ابتدای قوس تا زاویه ۴۵ درجه، قدرت جریان ثانویه افزایش می‌یابد که دلیل آن برخورد مستقیم خط جریان از مسیر مستقیم بالادست به ساحل خارجی در فاصله ۳۰ تا ۳۵ درجه و جدایی جریان در این محدوده و افزایش مقدار جریان‌های عرضی است.



(ب)



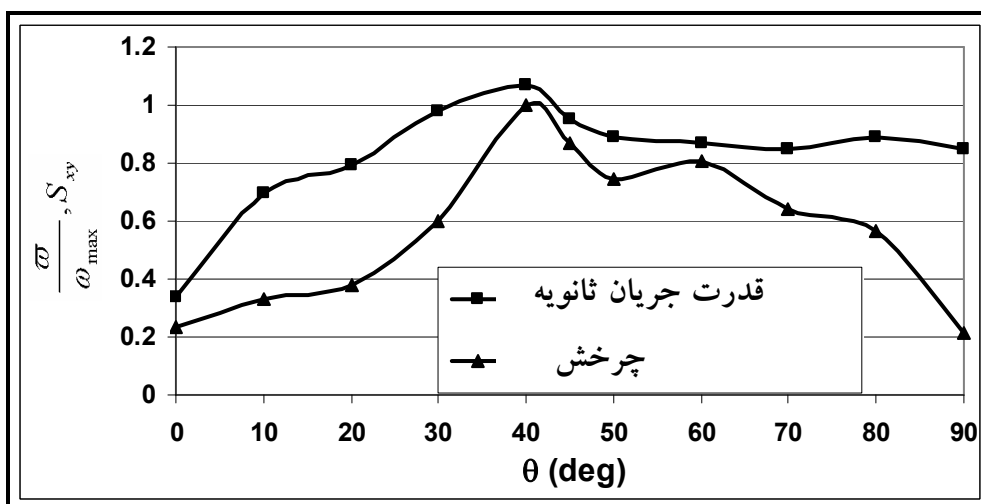
(الف)



(ج)

شکل ۱۳ نمونه‌ای از بردارهای سرعت و خط سرعت حداکثر در ترازهای مختلف قوس ۹۰ درجه:

(الف) ۵ میلی‌متری، (ب) ۶۰ میلی‌متری و (ج) ۱۱۵ میلی‌متری از کف



شکل ۱۴ مقایسه قدرت جریان ثانویه و چرخش در مقاطع مختلف قوس ۹۰ درجه

۴- نتیجه گیری

براساس بررسی های آزمایشگاهی در یک قوس ۹۰ درجه ملایم نتایج زیر قابل جمع بندی می باشد:

- جریان ثانویه دوم در مقطع ۳۰ درجه در خلاف جهت جریان ثانویه اول به وجود می آید و تا زاویه حدود ۸۰ درجه با شدت کمتری مشاهده می شود.
- آبستگي در ساحل خارجی از حدود زاویه ۶۵ درجه به بعد و رسوبگذاری در ساحل داخلی از زاویه ۵۰ درجه به سمت پایین دست قوس مشاهده می شود.
- زاویه بین خطوط جریان در سطح و در نزدیکی بستر به طور متوسط بین ۱۵ تا ۲۰ درجه در خلاف جهت عقربه های ساعت و به سمت ساحل خارجی است.
- جریان ثانویه دوم با توجه به جهت مخالف آن با جریان اصلی از قدرت جریان ثانویه اصلی می کاهد.
- در لایه های نزدیک بستر سرعت حداکثر در نزدیکی ساحل داخلی شکل می گیرد و موقعیت آن در طول قوس نیز متمایل به ساحل داخلی است. با تغییر هندسه مورد بررسی و در لایه نزدیک سطح جریان

از موقعیت ۴۵ درجه تا موقعیت ۷۰ درجه، قدرت جریان ثانویه روند نزولی دارد که با توجه به شکل های ۶- ب تا ۶- د و شکل های ۱۰- ب تا ۱۰- د دلیل آن، وجود جریان های ثانویه دوم به وجود آمده در ساحل خارجی می باشد. در مقاطع انتهایی قوس و با کاهش قدرت جریان ثانویه دوم - که در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی است - قدرت جریان ثانویه اصلی افزایش می یابد. در باره میزان چرخش المان ها می توان گفت که جریان در ابتدای قوس تا زاویه ۲۰ درجه، تحت تأثیر جریان ورودی از مسیر بالادست، دارای چرخش زیادی نیست و در فاصله ۲۰ تا ۴۵ درجه - با توجه به برخورد جریان به ساحل خارجی و جدایی جریان از ساحل خارجی - میزان چرخش المان های شبکه به بیشترین مقدار خود می رسد و از آن به بعد، چرخش روند نزولی دارد که این روند در انتهای قوس و با توجه به تأثیرگذاری مسیر مستقیم پایین دست در افزایش سرعت جریان در نزدیکی ساحل خارجی بیشتر مشهود است.

B	عرض کانال	خط سرعت حداکثر به سمت قوس خارجی سوق می‌یابد.
ds	عمق آبشستگی موضعی	- بیشترین مقدار آبشستگی و رسوبگذاری به ترتیب به میزان ۸/۵ و ۷ درصد عمق جریان (در ابتدای قوس) به ترتیب در موقعیت ۸۵ درجه‌ای (در نزدیکی ساحل خارجی) و ۵۵ درجه‌ای (در نزدیکی قوس داخلی) روی می‌دهد.
Y	عمق جریان در مسیر مستقیم بالادست	- در تعیین قدرت جریان ثانویه و به روش شکری از ابتدای قوس تا زاویه ۴۵ درجه قدرت جریان ثانویه افزایش می‌یابد. از زاویه ۴۵ درجه تا زاویه ۷۰ درجه قدرت جریان ثانویه روندی نزولی دارد و در مقاطع انتهایی قوس و با کاهش قدرت جریان ثانویه دوم که در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی است، قدرت جریان ثانویه اصلی افزایش می‌یابد.
X	طول در مختصات دکارتی	- میزان چرخش المان‌ها در ابتدای قوس تا زاویه ۲۰ درجه دارای چرخش زیادی نیست و در فاصله ۲۰ تا ۴۵ درجه‌ای با توجه به برخورد جریان به ساحل خارجی، میزان چرخش المان‌های شبکه به بیشترین مقدار خود می‌رسد و از آن به بعد، چرخش روند نزولی دارد که این روند در انتهای قوس بیشتر مشهود است.
Y	عرض در مختصات دکارتی	
Z	تراز بستر از کف	
S_{xy}	قدرت جریان ثانویه	
$K_{lateral}$	انرژی جنبشی جریان جانبی	
K_{main}	انرژی جنبشی جریان اصلی	
ϖ_z	چرخش	
u	سرعت در جهت طولی	
v	سرعت در جهت عرضی	
ω_{max}	حداکثر چرخش	
θ	موقعیت برداشت مقاطع عرضی در طول قوس	

۶- منابع

- دهقانی، ا.، قدسیان، م.، صالحی نیشابوری، ع.ا. و شفیعی فر، م.، (۱۳۸۶). "بررسی تغییرات بستر کانالهای آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه"، نشریه هیدرولیک ایران، ص. ۱-۱۶.
- فضلی، م.، قدسیان، م. و صالحی نیشابوری، ع.ا.، (۱۳۸۸). "تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه در شرایط مختلف جریان" مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۵، ص. ۱۲۳-۱۴۲.

Abad J.D. and Garcia M.H. (2005). "Hydrodynamics in kinoshita-generated meandering bends: importance for river planform evaluations", 4 th IAHR Symp. On River, Coastal Morphodynamics, USA.

Blanckaert K. and Walter H. Graf (2001). "Mean flow and turbulence in open-channel bend", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 10, pp. 833-874.

Blanckaert K. and Graf W.H. (2004). "Momentum transport in sharp open-channel bends", Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 130, No. 3, pp. 186-198.

۵- فهرست علائم

U	سرعت متوسط جریان در مسیر مستقیم بالادست
U_C	سرعت بحرانی جریان در مسیر مستقیم بالادست
σ_g	انحراف معیار ذرات رسوبی
R_i	شعاع داخلی قوس
R_o	شعاع خارجی قوس
R_c	شعاع مرکزی قوس
Q	دبی جریان
Fr	عدد فرود

- Rodi W., Michael A. Leschziner (1978). "Calculation of strongly curved open channel flow", Journal of Hydraulic Division, Vol. 105, No. HY10, pp. 1297-1314.
- Shukry, A. (1950). "Flow around bends in an open flume" Transactions, ASCE, Vol. 115.
- Shams M., Ahmadi G. and Smith D. H. (2002). "Computational modeling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers", Advances in Water Resources, Vol. 25, No. 6., pp. 689-699.
- Yang S. Q. (2005). "Interactions of boundary shear stress, secondary currents and velocity", Fluid Dynamics Research, Vol. 36, pp. 121-136.
- Zeng J., Constantinescu G., Blanckart K. and Weber L. (2008). "Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: Experiments and predictions", Water Resources Research, Vol. 44, No. 9, pp. Wo9401.1-Wo9401.22.
- Ippen A. T., and Drinker P. A. (1962). "Boundary shear stress in curved trapezoidal channels", Journal of Hydraulic Division, Vol. 88, No. HY5, pp. 143-179.
- Lien H. C., Hsied T.Y and Yang J. C. (1999). "Bend-flow simulation using 2d depth-averaged mode", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 10, pp. 1097-1103.
- Nouh M. A. and Townsend R. D. (1979). "Shear-stress distribution in stable channel bends". Journal of Hydraulic Division, Vol. 105, No. HY. 10, pp. 1233-1245.
- Roca, M., Vide, J.P.M., and Blanckart, K. (2007). Reduction of bend scour by an outer bank footing design and bed topography. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 2, pp. 139-147.