

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شعاع انحنای قوس ۹۰ درجه بر تغییرات توپوگرافی بستر

محمد واقفی^{۱*} و مسعود قدسیان^۲

*- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر vaghefi@pgu.ac.ir

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

تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۷

تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۳

چکیده

رودخانه‌ها اصلی‌ترین منبع تأمین آب می‌باشند بنابراین شناخت رفتار رودخانه‌ها و تغییرات آن‌ها خصوصاً در کانال‌های قوسی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله به اندازه‌گیری آزمایشگاهی الگوی آبستکی در قوس ۹۰ درجه و کانال مستقیم پایین دست آن تحت تأثیر تغییر پارامتر شعاع انحنای قوس پرداخته شده است. آزمایشات در یک کانال آزمایشگاهی با سه شعاع انحنای ملایم، متوسط و تند انجام گرفته است. تغییرات توپوگرافی بستر با استفاده از دستگاه برداشت پروفیل بستر لیزری اندازه‌گیری شده است. مقایسه بین مقاطع مختلف عرضی، طولی و توپوگرافی بستر انجام شده و الگوی آبستکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج بیانگر این است که با کاهش شعاع انحنای قوس، تغییرات توپوگرافی بستر و میزان آبستکی و رسوب‌گذاری بیشتر می‌شود. همچنین در مسیر مستقیم پایین دست، آبستکی در نزدیکی ساحل خارجی مشاهده می‌شود که در قوس تند مشهود تر است.

کلید واژه‌ها: الگوی آبستکی، قوس ۹۰ درجه، توپوگرافی بستر، شعاع انحنای

مقدمه

به سمت قوس داخلی حرکت دهد و نیروی ناشی از شتاب گریز از مرکز که تمایل به حرکت ذره به سمت قوس خارجی دارد. در سطح آب با توجه به غلبه نیروی ناشی از شتاب گریز از مرکز بر نیروی ناشی از گرادیان فشار، ذرات به سمت قوس خارجی رانده می‌شوند و با توجه به پیوستگی جریان و غلبه نیروی ناشی از گرادیان فشار نزدیک کف بر نیروی ناشی از شتاب گریز از مرکز، ذرات نزدیک کف به سمت قوس داخلی حرکت می‌نمایند و بنابراین یک جریان دو طرفه که در سطح به سمت قوس خارجی و در کف به سمت قوس داخلی است، ایجاد می‌گردد که به جریان ثانویه معروف است. در اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیر یکنواخت سرعت طولی، الگوی جریان خاصی بنام جریان

پیچان رودها را می‌توان به عنوان یکی از مواردی دانست که الگوی جریان بسیار پیچیده در آن‌ها برقرار است. با ورود جریان به قوس ذرات سیال تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه سرعت جریان در سطح آب بیشتر از کف می‌باشد، ذرات در سطح آب، تحت نیروی گریز از مرکز بیشتری قرار می‌گیرند. همچنین نیروی گریز از مرکز موجود در خم باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود که سطح آب را در قوس بیرونی بالا برده و در قوس داخلی باعث کاهش عمق می‌شود. این پدیده باعث گرادیان فشار جانبی در قوس خواهد شد. بنابراین در هر موقعیت از عمق، دو نیرو بر ذرات وارد می‌گردد. نیروی ناشی از گرادیان فشار که سعی دارد تا ذره را

حلزونی تشکیل می‌شود که باعث تغییرات زیادی در الگوی جریان در قوس می‌شود. این پدیده بر روی توپوگرافی بستر، آبشستگی و رسوب‌گذاری سواحل داخلی و خارجی تأثیر عمده‌ای دارد. در زمینه آبشستگی و الگوی جریان در مسیره‌های قوسی تحقیقات متعددی انجام گرفته است. ایپن و درینکر [۶] با تزریق ماده رنگی مشاهده نمودند که رشته‌های رنگی در بستر کانال به طرف قوس داخل می‌باشد در حالیکه مسیر رنگی ایجاد شده در سطح آب تمایل به ساحل خارجی دارد. یاماوکا و همکاران [۱۰] به بررسی محل شکل‌گیری چاله فرسایشی بر روی قوس نامنظم پرداختند و نتیجه گرفتند که چاله فرسایشی بعد از رأس قوس قرار دارد. آنان این پدیده را تأثیر مستقیم اصطکاک دیواره‌ها بر کل میدان جریان عنوان نمودند. یاماموتو [۱۱] الگوی جریان، رسوب و شکل حرکت توده‌های ماسه‌ای در آبراهه‌های پیچان رودی با زوایای مرکزی مختلف را نشان داد و مشاهده نمود که همواره تمرکز جریان به سمت قوس خارجی می‌باشد. داسیلوا و یالین [۴] به بررسی محل وقوع انباشت رسوبات و چاله فرسایشی برای دو قوس پیچان رودی ملایم و تند پرداختند. شمس و همکاران [۹] با استفاده از برنامه Fluent به آنالیز عددی انتقال رسوب در خم رودخانه‌ها و با سایز بندی مختلف دانه بندی بستر پرداختند. الگوی جریان در یک کانالی که با مقیاس ۱:۱۰۰ ساخته شده بود توسط ایشان اندازه‌گیری شد و با مدل عددی مقایسه گردید و نتیجه گرفتند که کمیت‌های متوسط جریان با مدل عددی شباهت دارد اما پارامترهای آشفتگی با مدل عددی متفاوت می‌باشد. Blanckaert [۳] با انجام آزمایشاتی بر روی یک فلوم قوسی ۱۲۰ درجه با بستر متحرک، محل حداکثر فرسایش بستر در قوس و همچنین الگوی جریان ثانویه را مورد بررسی قرار داد. نتایج ایشان شکل‌گیری دو چاله در قوس را نشان داد. یانگ [۱۲] به بررسی اندرکنش تنش برشی مرزی و توزیع سرعت و جریان‌های ثانویه در کانال‌های باز

پرداخت و توزیع سرعت و تنش برشی را در حالت جریان یکنواخت و ماندگار و همچنین متلاطم بکار برد و با در نظر گرفتن اثر سرعت عمود بر دیواره کانال به تبیین معادلات حاکم برای توزیع تنش برشی رینولدزی و تنش برشی مرزی پرداخت. معادلات بدست آمده از تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی که در گذشته بدست آمده است برخوردار بود. روکا و همکاران [۷] به بررسی آزمایشگاهی کاهش فرسایش و آبشستگی بستر به وسیله استقرار یک نمونه از پی‌سازی خاص در بستر پرداختند که کاهش ۴۰ درصدی آبشستگی را به همراه داشت. قدسیان و موسوی [۵] به مطالعه تغییرات بستر با توجه به فاکتورهای عمق جریان، سرعت جریان و خصوصیات مواد بستر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عمق ماکزیمم آبشستگی با عدد فرود در ارتباط است. زنگ و همکاران [۱۳] به بررسی جریان و انتقال رسوب در کانال‌های قوسی با شیب تند (معادل عرض کانال) پرداختند و برای این منظور دو حالت بستر تخت و تعادل یافته مربوط به دو فاز ابتدایی و انتهایی پروسه آبشستگی و رسوب‌گذاری را در نظر گرفته و نتیجه گرفتند که بهبود کیفی مدل‌های آشفتگی و مدل‌های انتقال رسوب باعث پیش‌بینی و سازگاری بهتر مدل‌های ترکیبی می‌گردد. دهقانی و همکاران [۱] به بررسی تغییرات بستر کانال‌های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه پرداختند و نتیجه گرفتند که در شرایط هیدرولیکی متفاوت انجام آزمایشات، در نیمه اول قوس یک تپه رسوبی در قوس داخلی و یک چاله فرسایشی 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 می‌باشد فضلی و همکاران [۲] 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

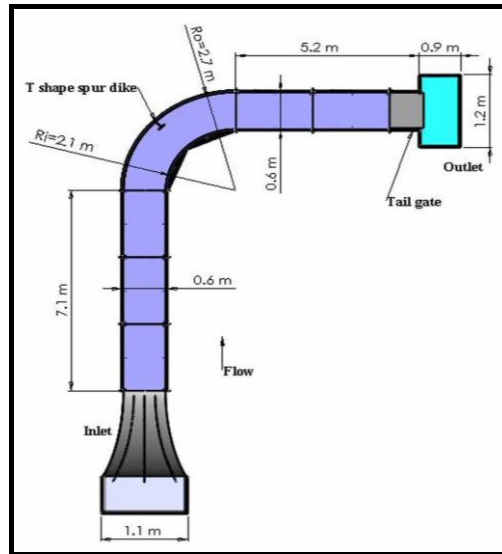
قاب‌های فولادی پایداری آن حفظ می‌گردند. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر سه مقدار ۴ (قوس ملایم)، ۳ (قوس متوسط) و ۲ (قوس تند) همچنین ارتفاع آن ۷۰ سانتی متر و عرض آن ۶۰ سانتی متر است. کف کانال از رسوباتی با قطر متوسط معادل ۱/۲۸ میلی متر و انحراف معیار ۱/۳ تا عمق ۳۵ سانتیمتری پوشیده شد. همچنین برای کنترل جریان از یک دریچه قطاعی که در انتهای کانال نصب گردیده استفاده شد. دبی جریان در کلیه آزمایشات ثابت و برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد. در تمام آزمایشات شرایط آب زلال (U/U_c) نزدیک به یک یعنی شرایط آستانه حرکت) حاکم بود. و زمان تعادل آزمایش ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است که مبنای آن انجام یک آزمایش زمان تعادل ۱۲۰ ساعته بوده است در پایان این آزمایش ۱۲۰ ساعته میزان آبشستگی در قوس ملایم در فاصله زمانی ۱۲ ساعت انتهایی ثابت بود. تحت این شرایط زمانی که ۹۰ درصد آبشستگی حداکثر انجام گرفته بود به عنوان زمان تعادل نسبی لحاظ گردید که این زمان تعادل ۲۴ ساعت محاسبه شد. مدت زمان اشباع کانال بین ۲۰ تا ۳۰ دقیقه می‌باشد. به منظور حفظ بستر در شروع آزمایش، آب توسط لوله از بالا دست و پایین دست کانال جاری می‌شد. در طی این مدت یک دریچه کشویی در جلو دریچه قطاعی کانال قرار می‌گرفت که وظیفه آن جلوگیری از خروج آب از کانال بود. پس از بالا آمدن سطح آب در کانال، به صورت تدریجی جریان به دبی مورد نظر افزایش یافت. سپس دریچه کشویی به صورت تدریجی از جلو مسیر جریان خارج می‌شد. مقدار جریان در طول آزمایش توسط ارفیس نصب شده در لوله ورودی در کنار کانال تنظیم می‌شد. در انتهای آزمایش نیز با خاموش کردن پمپ، جریان به صورت تدریجی از کانال خارج و زهکشی کانال در مدت زمان ۲ تا ۳ ساعت انجام می‌گرفت.

فرسایشی در جداره خارجی قوس تشکیل می‌شود. اما در حالت $U/U_c < 1$ فقط یک چاله فرسایشی در نزدیکی خروجی قوس به وجود می‌آید و در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ دو چاله فرسایشی در جداره خارجی به یکدیگر نزدیک یا در هم ادغام می‌شوند.

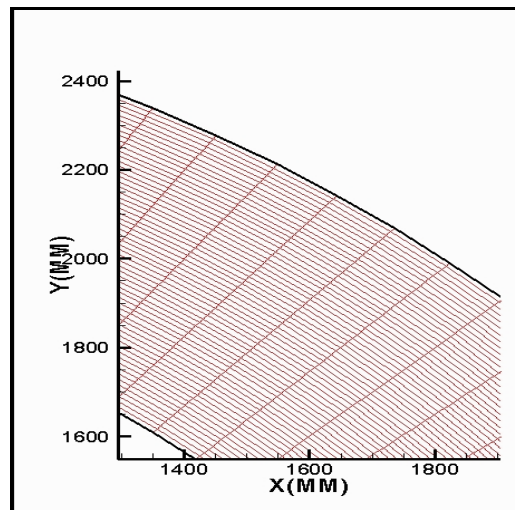
در این مقاله با متمرکز شدن بر قوس ۹۰ درجه، به تأثیر پارامتر شعاع انحنای قوس پرداخته شده است همچنین تأثیر تغییرات شعاع انحنای قوس بر توپوگرافی کانال مستقیم پایین دست نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از سه قوس ملایم (با نسبت شعاع انحنا به عرض کانال مساوی با ۴)، متوسط (با نسبت شعاع انحنا به عرض کانال مساوی با ۳) و تند (با نسبت شعاع انحنا به عرض کانال مساوی با ۲) استفاده شده است. بحث پیرامون تغییرات توپوگرافی بستر و محدوده تشکیل چاله‌های آبشستگی و پشته‌های رسوبی از نکات مطرح شده در این مقاله می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایشات مورد نظر در کانالی با قوس ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گرفت. شکل (۱) پلان و هندسه‌ی قوس مورد نظر را نشان می‌دهد. این کانال از یک قسمت مستقیم به طور ۷/۱ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۵/۲ متر در پایین دست تشکیل می‌شود که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای خارجی ۲/۴ متر (قوس ملایم با نسبت شعاع انحنا در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۴)، ۱/۸ متر (قوس متوسط با نسبت شعاع انحنا در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۳) و ۱/۲ متر (قوس تند با نسبت شعاع انحنا در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۲) به هم متصل گردیده است که در هر مرحله یکی از شعاع‌های انحنای ذکر شده مورد آزمایش قرار گرفته و سپس تعویض شده است. کانال از جنس شیشه ساخته شده است که توسط



شکل ۱- موقعیت و هندسه کانال در قوس ملایم



شکل ۲- قسمتی از شبکه برداشت توپوگرافی بستر

عرضی در قوس و بین ۱۰ تا ۲۰ مقطع عرضی در کانال مستقیم پایین دست و بر حسب تغییرات توپوگرافی بستر استفاده شده است. در هر مقطع عرضی نیز ۶۰ نقطه در عرض کانال برداشت شده است. شکل (۲) قسمتی از شبکه مذکور که بزرگنمایی شده است را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

جریان با ورود از مسیر مستقیم بالادست به مسیر قوسی، تحت اثر انحنای کانال و نیروی گریز از مرکز قرار گرفته و جریان ثانویه شکل می‌گیرد که

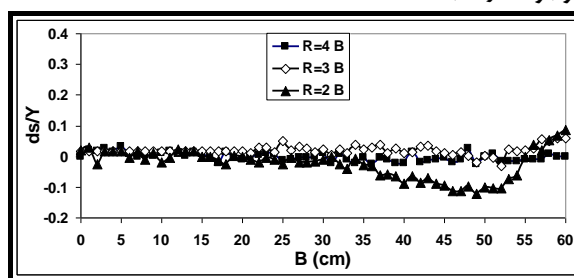
در برداشت توپوگرافی بستر از دستگاه برداشت پروفیل لیزری (Laser Bed Profiler) LBP استفاده شده است. این دستگاه قابلیت برداشت پروفیل بستر در مسیرهای قوسی و مستقیم را دارا است. دستگاه مذکور به صورت کاملاً خودکار، بر روی عرض کانال حرکت نموده و بدون هیچ‌گونه تماسی با بستر کانال و نیز با دقت 0.001 میلی‌متر، تراز رسوبات کف کانال را ثبت و به صورت مختصات سه بعدی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در برداشت پروفیل بستر از یک شبکه شامل ۴۵ مقطع

مرکز و گرادیان فشار عرضی است و راستای وارد شدن نیرو به سمت دیواره داخلی است، هم‌زمان با افزایش یافتن فاصله از دیواره خارجی، مؤلفه عرضی سرعت (V) نیز در راستای نیرو افزایش می‌یابد. به همین جهت شیب انحراف خطوط جریان افزایش می‌یابد. در قوس تند حداکثر سرعت در ورودی قوس همانند قوس ملایم در نزدیکی جداره داخلی قوس واقع است اما بر خلاف قوس ملایم تا نزدیکی خروجی قوس سرعت حداکثر در نیمه داخلی قوس قرار دارد که کمی به سمت محور کانال متمایل گردیده است، اما در خروجی قوس سرعت حداکثر به مجاورت جداره خارجی منتقل گردیده است. دلیل این پدیده به تفاوت الگوی جریان شرح داده شده در قوس ملایم و تند مرتبط می‌گردد. در مجموع مکانیزم آبشستگی در خم ملایم بدین صورت است که جریان پایین رونده حاصل از پیدایش جریان ثانویه باعث شسته شدن مصالح کف در مجاورت دیواره خارجی قوس می‌شود، خطوط جریان نزدیک بستر به حالت مورب، به طرف دیواره داخلی کانال منحرف شده و باعث انتقال مصالح کف به طرف دیواره داخلی خواهند شد و انتظار می‌رود، مسیر حرکت ذرات نزدیک بستر، در امتداد شعاع قوس نبوده و رسوب برداشت شده توسط جریان ثانویه در یک مقطع عرضی مشخص، در کنار دیواره داخلی مقاطع پایین دست، ترسیب شود. در حالیکه در خم تند مکانیزم آبشستگی بیشتر تحت تأثیر سرعت ماکزیمم و تنش برشی زیادتر قرار می‌گیرد چرا که از همان ورودی خم که سرعت و به تبع آن تنش برشی ماکزیمم در جداره داخلی واقع می‌شود آبشستگی نیز در همین ناحیه اتفاق می‌افتد و انتقال مصالح بستر نیز از محور کانال به سمت ساحل داخلی انجام می‌گیرد. مشاهده کیفی الگوی جریان با استفاده از تزریق مواد رنگی در لایه‌های مختلف جریان و در قسمت‌های مختلف قوس بیانگر این است که در ورودی قوس، سرعت حرکت ذرات جریان در قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی

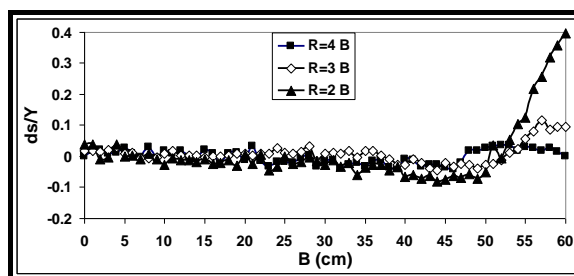
باعث حرکت رسوبات به سمت قوس داخلی شده و تشکیل پشته رسوبی می‌دهند. در قوس‌های با انحناء تند به محض ورود جریان به قوس، سرعت حداکثر به طرف قوس داخلی منتقل می‌شود. رودی (۱۹۷۸) این پدیده را که از فاصله‌ای بالاتر از ورودی قوس و در داخل مقطع مستقیم بالادست شروع می‌شود به تغییرات جانبی شدید گرادیان طولی فشار مرتبط دانسته است. تشکیل شیب عرضی، باعث ایجاد گرادیان منفی فشار همراه با افزایش شتاب در نزدیکی دیواره داخلی و گرادیان مثبت فشار همراه با کاهش شتاب در نزدیکی قوس بیرونی می‌باشد. این حالت (نحوه تغییرات عرضی گرادیان طولی فشار) در قوس‌های ملایم نیز وجود دارد ولی جابجایی انتقالی جریان با مومنتم زیاد از قوس داخلی به طرف قوس خارجی به واسطه جریان حلزونی مانع از هر گونه تأثیر گذاری گرادیان طولی فشار بر الگوی جریان می‌شود و در نتیجه پدیده انتقال جانبی مومنتم در این نوع از قوس‌ها بر گرادیان طولی فشار غالب شده و سرعت حداکثر به طرف قوس بیرونی منتقل می‌شود. با نزدیک شدن به خروجی قوس، محل وقوع سرعت حداکثر به طرف قوس بیرونی متمایل می‌شود [۸]. مشاهدات کیفی جریان در قوس ملایم نشان می‌دهد که در ورودی قوس سرعت ماکزیمم در مجاورت جداره داخلی قوس می‌باشد و با نزدیک شدن به رأس قوس، به محور کانال منتقل و با رسیدن به خروجی قوس و بعد از آن به جداره خارجی قوس انتقال می‌یابد. از سوی دیگر در اثر وجود جریان‌های حلزونی، تنش برشی در قوس نسبت به مسیر مستقیم افزایش می‌یابد. یعنی در قوس انحنای جریان و وجود جریان ثانویه باعث تشدید تنش برشی در کف بستر می‌شود و به همین دلیل حرکت رسوبات که متأثر از تنش برشی است، در قوس زودتر آغاز می‌گردد. دلیل این افزایش را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با توجه به اینکه عامل ایجاد جریان گردابه‌ای، اندرکنش میان نیروی گریز از

زمان و شکل‌گیری شیب عرضی پشته‌های رسوبی دو نیرو بر ذره رسوب وارد می‌شود. نیروی اول نیروی ناشی از جریان ثانویه است که تمایل به حرکت ذره به سمت قوس داخلی دارد و نیروی دوم ناشی از مؤلفه عرضی نیروی وزن ذره است که در اثر شکل‌گیری شیب عرضی بستر به وجود می‌آید و در برابر جریان ثانویه مقاومت می‌کند. با گذشت زمان و شکل‌گیری شیب عرضی بستر، مؤلفه نیروی وزن در راستای عرضی افزایش یافته و نیروی ناشی از جریان ثانویه که سعی در بالا بردن دانه رسوب از شیب ایجاد شده را دارد، توسط مؤلفه عرضی وزن خنثی می‌گردد. و تقریباً حالت تعادل پدیدار می‌گردد. همچنین این پدیده باعث کاهش قدرت جریان‌های حلزونی به سمت پایین دست قوس شده و حرکت طولی رسوبات نیز به تعادل می‌رسد. در شکل (۳) نمونه‌ای از تغییرات عرضی بدون بعد توپوگرافی بستر در نیمه اول قوس نشان داده شده است. در این شکل B عرض کانال، ds عمق آبستگگی موضعی، Y عمق جریان در ابتدای قوس و R شعاع انحنای مرکزی قوس می‌باشد.

می‌باشد و در انتهای قوس، سرعت حرکت ذرات جریان در قوس خارجی بیشتر از قوس داخلی می‌باشد. دلیل این امر نیز آنست که در ورودی قوس خصوصیات جریان شبیه جریان گردابه آزاد بوده که با افزایش فاصله از مرکز گردابه، سرعت جریان کاهش می‌یابد و بنابراین سرعت جریان نزدیک قوس داخلی از سرعت جریان نزدیک قوس خارجی بزرگ‌تر است. در خروجی قوس نیز با توجه به انتقال حداکثر سرعت به نزدیک قوس خارجی سرعت جریان نزدیک قوس خارجی نسبت به قوس داخلی بیشتر است. همچنین در ساعات اولیه آزمایش، میزان حجم رسوباتی که به پایین دست منتقل می‌شود بسیار زیاد بوده و با گذشت زمان این حجم رسوبات کمتر می‌شد. همچنین نرخ حرکت رسوبات نزدیک به قوس خارجی نسبت به قوس داخلی در قوس ملایم بیشتر است در صورتی که در قوس تند نرخ حرکت رسوبات نزدیک به قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی می‌باشد. علت این پدیده اندرکنش رسوب و جریان می‌باشد. در ابتدای آزمایش که سطح رسوبات صاف است این جریان ثانویه در سرتاسر مقطع عرضی جریان وجود دارد، با گذشت



(الف)

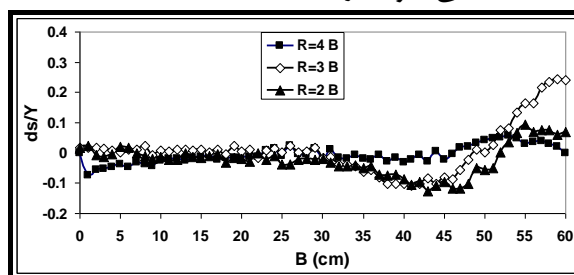


(ب)

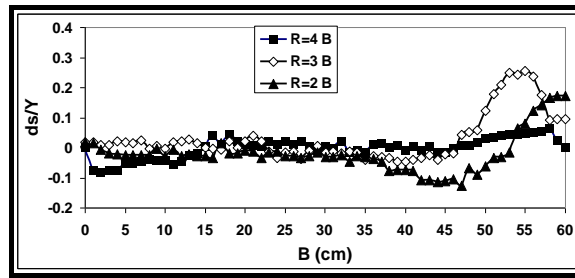
شکل (۳) نمونه‌ای از تغییرات عرضی بدون بعد توپوگرافی بستر در نیمه اول سه قوس تند، متوسط و ملایم (الف) ۲۰ و (ب) ۴۰ درجه

مقطع ۶۰ درجه و در شکل (۴-الف) و در دو قوس تند و متوسط آبشستگی در فاصله‌ای معادل ۳۰ درصد عرض کانال از محور کانال به سمت ساحل داخلی مشهود بوده و از آن فاصله تا ساحل داخلی رسوب‌گذاری مشاهده می‌شود که میزان رسوب‌گذاری قوس متوسط مشهود تر است. در واقع در این دو قوس آبشستگی به سمت وسط کانال گسترش یافته است. دلیل وجود آبشستگی در فاصله ذکر شده وجود جریان‌های عرضی قوی و افزایش قدرت جریان ثانویه در این محدوده است. همچنین افزایش رسوب‌گذاری در نزدیکی ساحل داخلی در قوس متوسط نیز به دلیل تمایل بیشتر حرکت رسوبات به سمت پایین دست نسبت به قوس تند می‌باشد. همچنین وجود آبشستگی در نزدیکی ساحل خارجی در قوس ملایم، دلالت بر نزدیک شدن موقعیت سرعت حداکثر به ساحل خارجی و در نتیجه افزایش تنش برشی بستر در این مقطع را دارد. این پدیده در قوس ملایم با حرکت به سمت پایین دست قوس (در مقطع ۷۵ درجه و در شکل ۴-ب) مشهود تر است. همچنین در این مقطع میزان آبشستگی و رسوب‌گذاری در دو قوس تند و متوسط مشابه مقطع ۶۰ درجه می‌باشد ضمن این که گسترش چاله آبشستگی در نزدیکی محور کانال به سمت ساحل داخلی در قوس تند به دلیل استقرار مکان هندسی سرعت حداکثر در محدوده بین محور کانال و نزدیک ساحل داخلی مشهود می‌باشد.

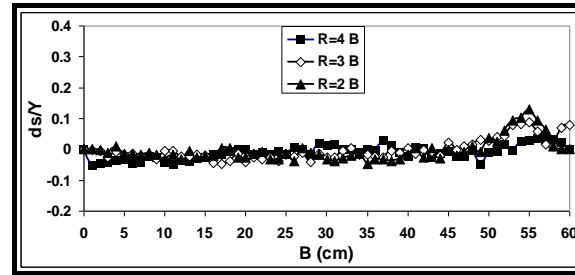
در مقطع ۲۰ درجه (شکل ۳-الف) از نزدیکی محور کانال تا نزدیکی ساحل داخلی در قوس تند آبشستگی مشاهده می‌گردد در حالی که در دو قوس دیگر تغییرات توپوگرافی بستر مشهود نمی‌باشد. دلیل این پدیده شکل گیری جریان ثانویه در مقاطع ابتدایی قوس تند و موقعیت سرعت حداکثر (در نزدیکی ساحل داخلی) و تأثیر آن در حرکت مورب رسوبات به سمت قوس داخلی و پایین دست می‌باشد. در مقطع ۴۰ درجه (شکل ۳-ب) شروع رسوب‌گذاری در نزدیکی قوس داخلی می‌باشد. که در مورد قوس تند مشهود تر می‌باشد. در قوس تند (R=2B) همان‌طور که مشاهده می‌شود در فاصله بین ۶۵ تا ۸۰ درصد عرض مقطع و از قوس خارجی آبشستگی و پس از آن و تا قوس داخلی رسوب‌گذاری واقع شده است. رسوبات ته نشین شده در این مقطع ناشی از آبشستگی در مقاطع پایین دست و در فاصله بین محور کانال تا فاصله ۳۰ درصد عرض کانال به سمت ساحل داخلی بوده که با حرکتی مورب ناشی از ترکیب جریان‌های ثانویه و طولی (جریان حلزونی) در نزدیکی ساحل داخلی ترسیب شده‌اند. که به دلیل قدرت بیشتر جریان ثانویه در قوس تند مشهود تر می‌باشد. ضمن این که در مقطع ۵۰ درجه، بیشترین ارتفاع رسوبات در قوس تند، به میزان ۴۰ درصد عمق جریان مشاهده می‌شود. در شکل (۴) نمونه‌ای از مقاطع عرضی بدون بعد توپوگرافی بستر در نیمه دوم قوس و مسیر مستقیم پایین دست مشاهده می‌شود. در



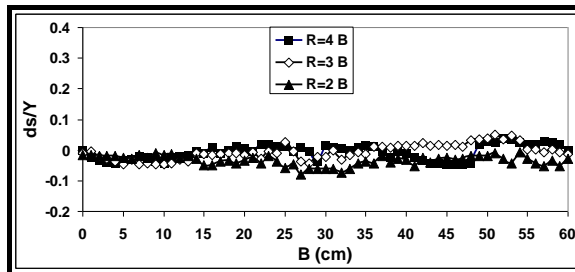
(الف)



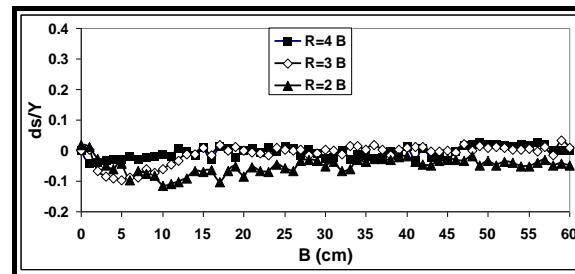
(ب)



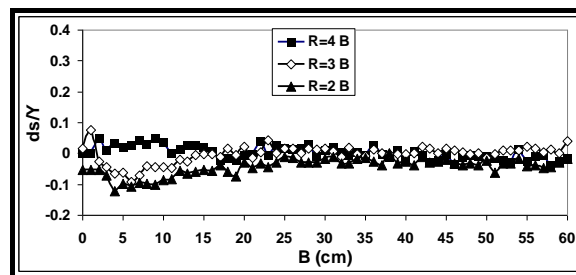
(ج)



(د)



(و)

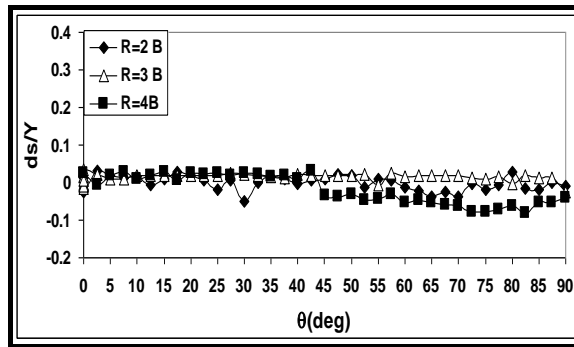


(ه)

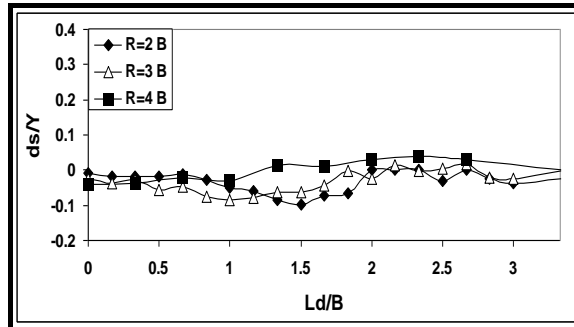
شکل (۴) نمونه‌ای از تغییرات عرضی بدون بعد توپوگرافی بستر در نیمه دوم سه قوس تند، متوسط و ملایم و مسیر مستقیم پایین دست (الف) ۶۰، (ب) ۷۵ و (ج) ۹۰ درجه و نیز (د) ۰/۳، (ه) ۱ و (و) ۱/۲ برابر عرض کانال در مسیر مستقیم پایین دست

مستقیم (شکل‌های ۴-د، ۴-ه و ۴-و) تغییرات آبشستگی و رسوب‌گذاری از میزان کمتری نسبت به ساحل سمت چپ برخوردار می‌باشد که دلیل آن کاهش سرعت جریان در خروجی قوس به دلیل افزایش سطح آب به خاطر از بین رفتن شیب عرضی جریان است. در شکل (۵) نمونه‌هایی از تغییرات طولی بدون بعد توپوگرافی بستر در نزدیکی ساحل خارجی در طول قوس و مسیر مستقیم پایین دست نشان داده شده است. در این شکل θ موقعیت مقاطع مختلف برداشت تراز بستر در طول کانال و Ld طول مسیر مستقیم را بیان می‌کند. در فاصله‌ای معادل ۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی (شکل ۵-الف) شروع آبشستگی در قوس ملایم و از نیمه دوم قوس تا انتهای قوس مشاهده می‌گردد که دلیل آن تغییر موقعیت سرعت حداکثر به سمت ساحل خارجی در نیمه دوم قوس ملایم می‌باشد. ضمن این که در موقعیت و در مسیر مستقیم پایین دست (شکل ۵-ب) در فاصله حدود ۰/۵ تا ۱/۷ برابر عرض کانال و در دو قوس تند و متوسط بنا به دلایل ذکر شده مشهود می‌باشد. در مقطع به فاصله ۱۰ درصد عرض کانال از ساحل خارجی و در طول کانال (شکل ۵-ج) روند تغییرات مانند مقطع قبلی بوده و در این فاصله در مسیر مستقیم پایین دست نیز (شکل ۵-د) گسترش عرضی و طولی (تا فاصله حدود ۲ برابر عرض کانال به سمت پایین دست) مشاهده می‌گردد. این روند در مقطع طولی به فاصله ۲۰ درصد عرض کانال از ساحل خارجی در طول قوس (شکل ۵-ه) نیز وجود دارد ضمن این که این مقطع طولی بیشترین میزان گسترش چاله آبشستگی در عرض کانال و در مورد قوس ملایم می‌باشد. در مسیر مستقیم پایین دست نیز (شکل ۵-و) گسترش چاله آبشستگی در عرض کانال و در قوس تند مشهود می‌باشد.

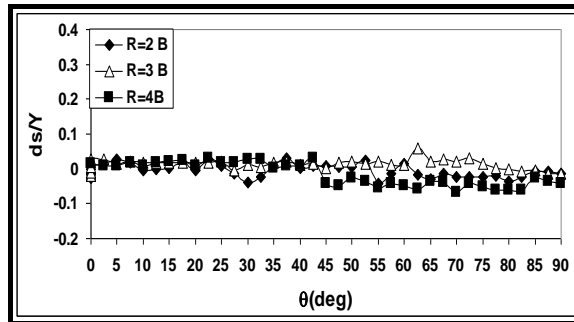
در مقطع ۹۰ درجه (شکل ۴-ج) و در انتهای قوس میزان آبشستگی و رسوب‌گذاری با کاهش چشمگیری همراه می‌باشد که دلیل آن تأثیر جریان در مسیر مستقیم پایین دست قوس بر حرکت یکنواخت رسوبات می‌باشد. این روند در مقطع به فاصله معادل ۰/۳ عرض کانال از انتهای قوس (شکل ۴-د) نیز مشاهده می‌شود. عدم تغییرات محسوس در توپوگرافی بستر قوس از مشخصه این مقطع بوده که دلیل آن کاهش چشمگیر قدرت جریان عرضی در مسیر مستقیم پایین دست نسبت به مقدار این پارامتر در طول قوس و حرکت متقارن تر رسوبات ناشی از یکنواخت شدن سرعت جریان (به دلیل از بین رفتن شیب عرضی سطح آب) می‌باشد. در مقطع به فاصله یک برابر عرض کانال از انتهای قوس (شکل ۴-ه) آبشستگی در فاصله معادل ۳۰ درصد عرض کانال از ساحل سمت چپ مشاهده می‌شود که با کاهش شعاع انحنای قوس عمق آبشستگی و گسترش آن به سمت محور کانال مشهودتر می‌باشد که دلیل آن افزایش میزان سرعت جریان در نزدیکی ساحل خارجی و در ابتدای مسیر مستقیم پایین دست به دلیل کاهش سطح آب و کاهش شیب عرضی جریان می‌باشد. این پدیده در مورد قوس تند با افزایش سرعت بیشتری برخوردار بوده و در نتیجه تأثیر آن بر توپوگرافی بستر بیشتر است. ضمن این که محل آبشستگی در ابتدای آزمایش در خروجی قوس بوده و در طی زمان تعادل با حرکت به سمت پایین دست، به فاصله حدود یک برابر عرض کانال از انتهای قوس می‌رسد. این روند در مقطعی به فاصله ۱/۷ برابر عرض کانال از انتهای قوس و برای دو قوس تند و متوسط مشاهده می‌گردد. در صورتی در قوس ملایم به دلیل افزایش کمتر سرعت جریان در خروجی قوس و مستهلک شدن میزان افزایش سرعت در این فاصله، آبشستگی مشهود نمی‌باشد. همچنین در نزدیکی ساحل سمت راست و در مقاطع ذکر شده در مسیر



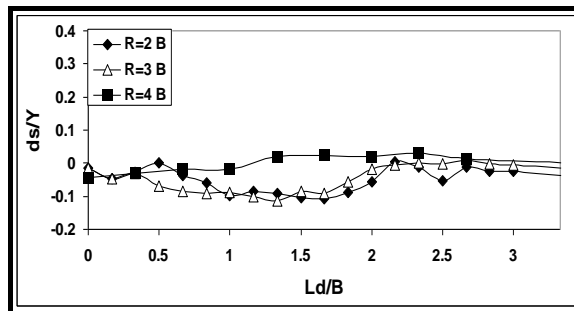
(الف)



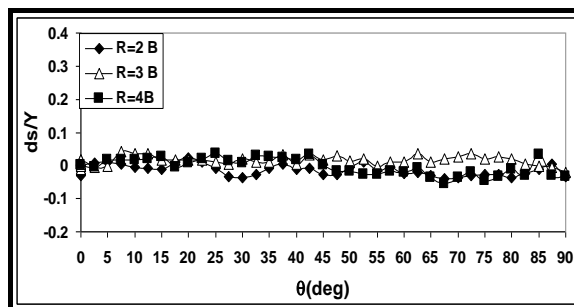
(ب)



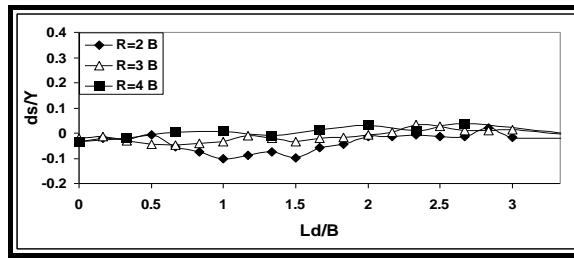
(ج)



(د)

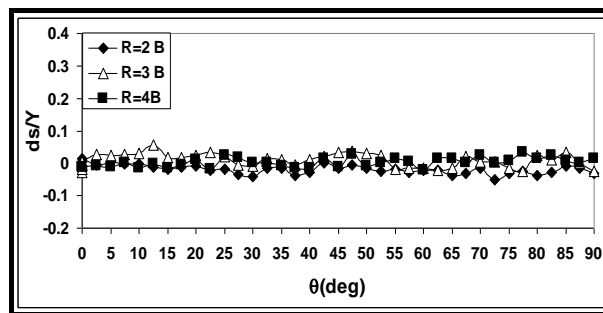


(ه)

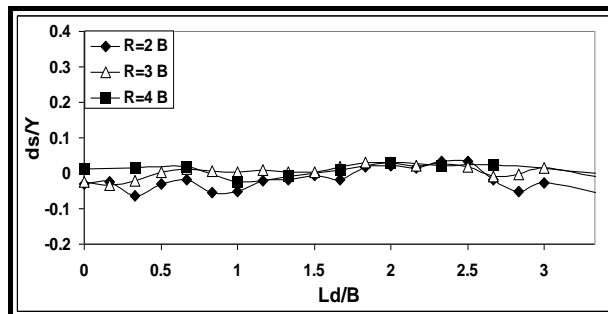


(و)

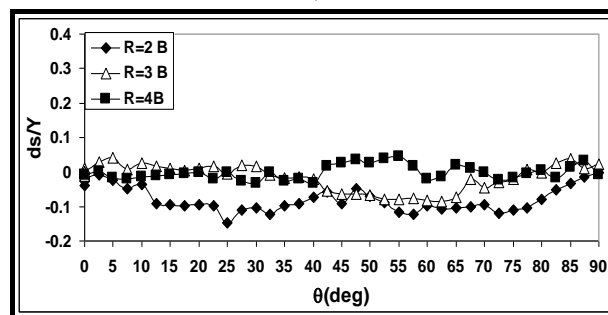
شکل (ه) نمونه‌ای از تغییرات طولی بدون بعد توپوگرافی بستر در نزدیکی ساحل خارجی سه قوس تند، متوسط و ملایم و مسیر مستقیم پایین دست (الف)، (ج) و (ر) در طول قوس (ب)، (د) و (ز) در مسیر مستقیم پایین دست و برای فاصله از ساحل خارجی (الف) و (ب) ۵، (ج) و (د) ۱۰ و (ه) و (و) ۲۰ درصد عرض کانال



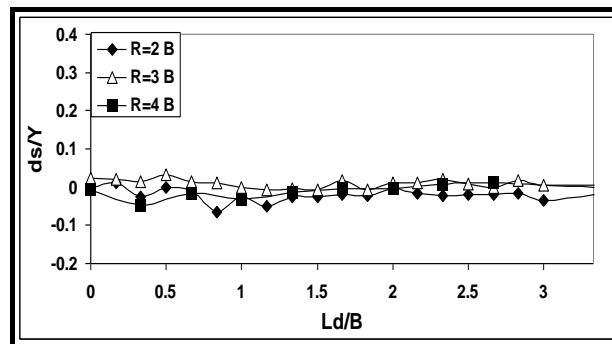
(الف)



(ب)



(ج)

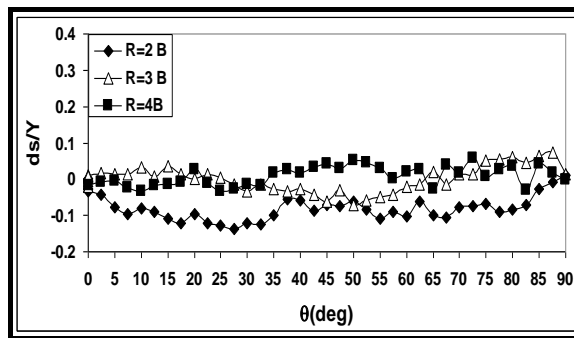


(د)

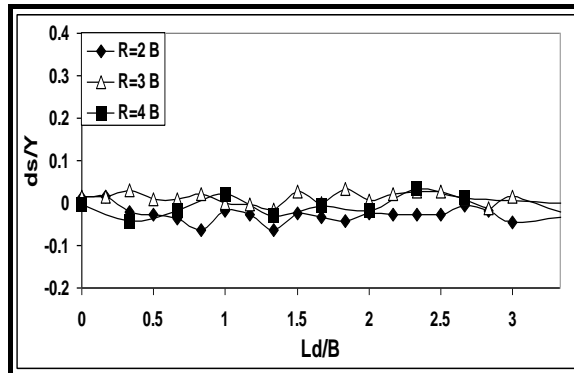
شکل (۶) نمونه‌ای از تغییرات طولی بدون بعد توپوگرافی بستر در نزدیکی محور کانال قوس تند، متوسط و ملایم و مسیر مستقیم پایین دست (الف) و (ج) در طول قوس (ب) و (د) در مسیر مستقیم پایین دست و برای فاصله از ساحل خارجی (الف) و (ب) ۳۰ و (ج) و (د) ۷۵ درصد عرض کانال

مقطع طولی به فاصله ۷۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی تأثیر شکل گیری جریان‌های ثانویه و موقعیت سرعت حداکثر در دو قوس تند و متوسط (شکل ۶-ج) مشهود می‌باشد که میزان بیشتر آبشستگی در قوس تند دلالت بر نزدیکی موقعیت سرعت حداکثر در نیمه دوم قوس به ساحل داخلی دارد. در این مقطع آبشستگی در قوس تند و در محدوده ۱۵ تا ۸۵ درجه مشاهده می‌شود. ضمن اینکه در این مقطع طولی و در مسیر مستقیم پایین دست (شکل ۶-د) به دلیل تضعیف جریان ثانویه و یکنواخت شدن سرعت طولی جریان تغییرات توپوگرافی بستر محسوس نیست.

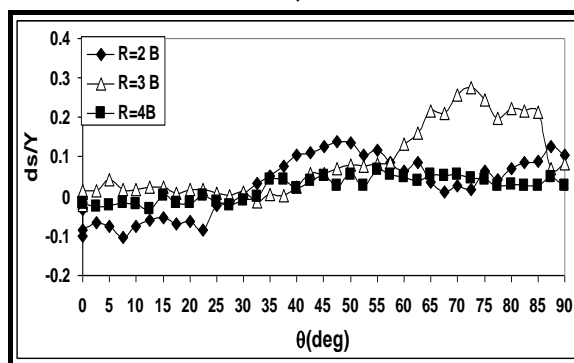
در مقطع طولی گذرنده از محور کانال و در طول قوس (شکل ۶-الف) به دلیل تأثیر گذاری کمتر خط سرعت حداکثر مقادیر آبشستگی و رسوب‌گذاری مشهود نمی‌باشد. در این مقطع طولی و در مسیر مستقیم پایین دست (شکل ۶-ب) گسترش چاله آبشستگی قوس تند و متوسط با مقادیر کمتر نسبت به مقادیر قبل مشاهده می‌شود که دلیل آن کاهش اختلاف، نزدیکی سرعت در این مقطع در مسیر مستقیم پایین دست با سرعت در این مقطع طولی و در محدوده انتهایی قوس می‌باشد. در طول‌های بیشتر از ۲/۵ برابر عرض کانال نیز آبشستگی در قوس متوسط مشاهده می‌گردد. در



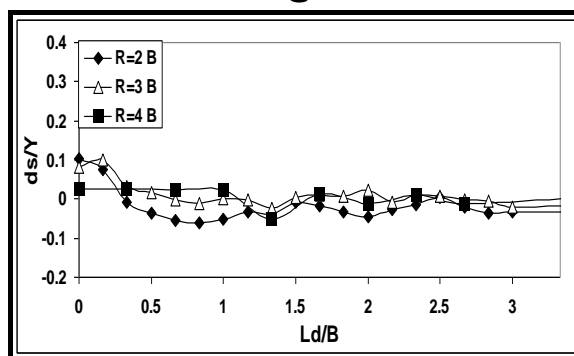
(الف)



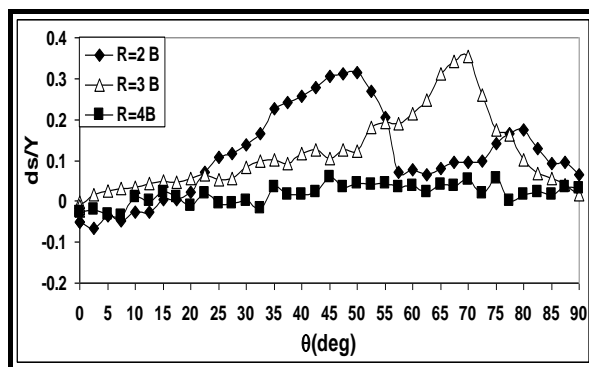
(ب)



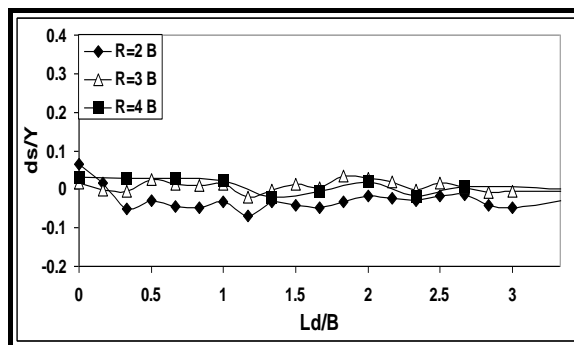
(ج)



(د)



(و)



(ه)

شکل (۷) نمونه‌ای از تغییرات طولی بدون بعد توپوگرافی بستر در نزدیکی ساحل داخلی سه قوس تند، متوسط و ملایم و مسیر مستقیم پایین دست (الف)، (ج) و (ر) در طول قوس (ب)، (د) و (ز) در مسیر مستقیم پایین دست و برای فاصله از ساحل داخلی (الف) و (ب) ۲۰، (ج) و (د) ۱۰ و (ه) و (و) ۵ درصد عرض کانال

مستقیم بالادست به محدوده ۴۰ تا ۴۵ درجه از ساحل خارجی برخورد می‌کند و به دلیل انحنای شدید قوس جریان‌های عرضی قوی‌تر تولید می‌کند. این جریان‌های عرضی در برخورد با جریان‌های طولی باعث انحراف بیشتر آن‌ها به سمت ساحل داخلی و افزایش زاویه حرکت رسوبات با افق و به سمت پایین دست شده و در نتیجه ترسیب رسوبات در فاصله نزدیک‌تری نسبت به ابتدای قوس در مقایسه با قوس متوسط (با جریان‌های عرضی ضعیف‌تر ناشی از شعاع انحنای بیشتر) انجام می‌گیرد. همچنین فاصله بیشتر ترسیب رسوبات از ساحل داخلی در قوس متوسط نسبت به قوس تند به دلیل تغییر موقعیت سرعت حداکثر به سمت محور کانال در نیمه دوم قوس متوسط می‌باشد. در قوس ملایم نیز رسوب‌گذاری در نزدیکی ساحل

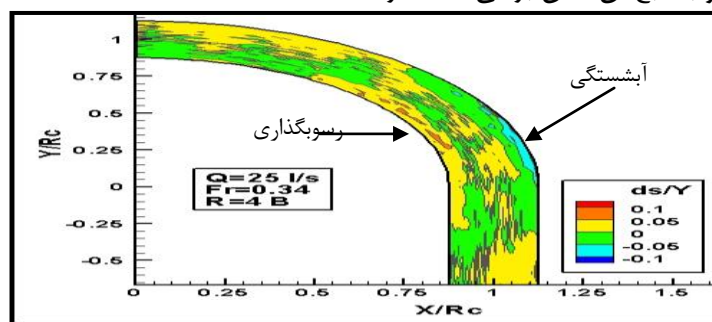
در شکل (۷) نمونه‌هایی از تغییرات طولی بدون بعد توپوگرافی بستر در نزدیکی ساحل داخلی در طول قوس و مسیر مستقیم پایین دست نشان داده شده است. در فاصله ۲۰ درصد عرض کانال از ساحل داخلی (شکل ۷-الف)، گسترش چاله آبستگي در قوس تند مشهود است. رسوبات جدا شده در این محدوده تحت تأثیر جریان ثانویه و ترکیب آن با جریان طولی قرار گرفته و به صورت مورب به سمت ساحل داخلی حرکت کرده و در نیمه دوم قوس در نزدیکی ساحل داخلی انباشته می‌شوند (شکل‌های ۷-ج و ۷-ه). همچنین تأخر فاز مشاهده شده در مکان انباشته شدن رسوبات در قوس متوسط (شکل ۷-ه) نسبت به قوس تند به دلیل کاهش در زاویه حرکت رسوبات نسبت به افق در این قوس می‌باشد. در قوس تند جریان از مسیر

در جداره داخلی واقع شده و آبشستگی نیز در همین ناحیه اتفاق می‌افتد.

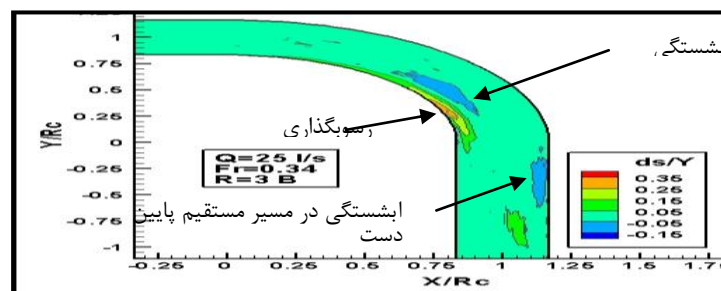
مقدار آبشستگی حداکثر در قوس تند و متوسط به ترتیب ۱۵ و ۱۳ درصد عمق جریان در ابتدای قوس و در موقعیت‌های ۳۰ و ۵۵ درجه و در فاصله بین محور کانال و ساحل داخلی اتفاق می‌افتد در حالیکه بیشترین مقدار رسوب‌گذاری با اختلاف فاز حدود ۱۵ تا ۲۰ درجه در بالادست محل آبشستگی حداکثر (در موقعیت ۵۰ و ۷۰ درجه) در نزدیکی ساحل داخلی و به میزان ۳۹ و ۳۴ درصد عمق جریان در ابتدای قوس به وقوع می‌پیوندد. در قوس ملایم بیشترین مقدار آبشستگی و رسوب‌گذاری به ترتیب به میزان ۸/۵ و ۷ درصد عمق جریان در ابتدای قوس به ترتیب در موقعیت ۸۵ درجه (در نزدیکی ساحل خارجی) و ۵۵ درجه (در نزدیکی قوس داخلی) حادث می‌شود. از نکات جالب دیگر وجود آبشستگی در مسیر مستقیم پایین دست قوس خارجی در هر سه قوس می‌باشد که در قوس تند (شکل ۸-ج) محسوس‌تر است.

داخلی با مقادیر کمتر از دو قوس تند و متوسط و به دلیل کاهش قدرت جریان ثانویه مشاهده می‌شود. در مقاطع نزدیک ساحل داخلی و در مسیر مستقیم پایین دست (شکل‌های ۷-ب، ۷-د و ۷-و) نیز تغییرات توپوگرافی بستر بنا به دلایل ذکر شده قبلی مشهود نمی‌باشد.

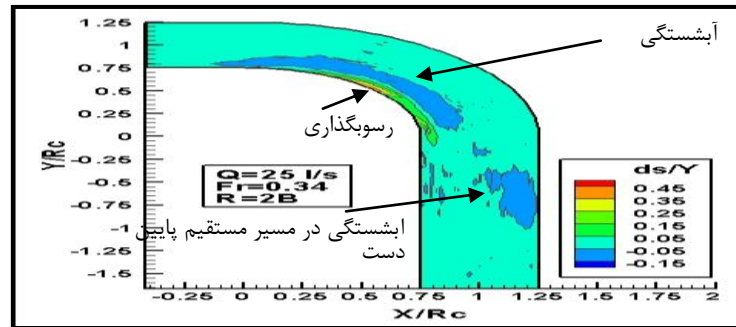
در شکل (۸) توپوگرافی بستر در سه قوس تند، متوسط و ملایم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رسوب‌گذاری در نزدیکی ساحل داخلی در هر سه قوس ایجاد می‌گردد که این رسوبات در قوس ملایم (شکل ۸-الف) ناشی از آبشستگی در وسط کانال و حرکت مورب رسوبات به سمت قوس داخلی می‌باشد. در قوس تند نیز به دلیل آبشستگی ایجاد شده در نزدیکی محور کانال متمایل به قوس داخلی و ناشی از وجود سرعت حداکثر در این ناحیه، رسوب‌گذاری در قوس داخلی از مقدار عددی بیشتری نسبت به قوس ملایم برخوردار است. در واقع در قوس تند مکانیزم آبشستگی بیشتر تحت تأثیر غلبه گرادیان فشار بر نیروی گریز از مرکز اتفاق می‌افتد چرا که از همان ورودی خم سرعت و به تبع آن تنش برشی حداکثر



(الف)



(ب)



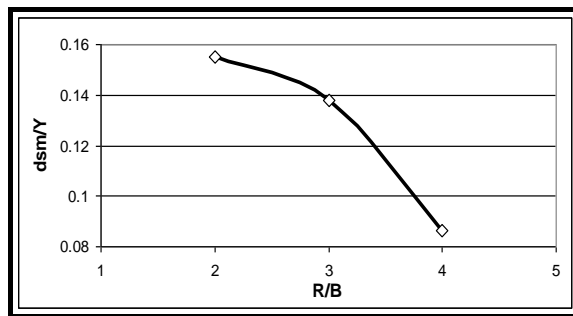
(ج)

شکل (۸) تغییرات بدون بعد توپوگرافی بستر در سه قوس (الف) ملایم، (ب) متوسط و (ج) تند

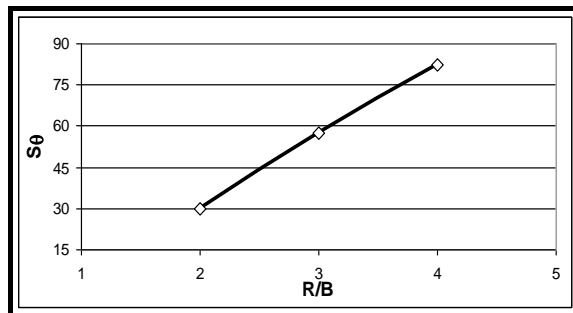
و تبدیل قوس تند به ملایم به دلیل تغییر در الگوی جریان ثانویه، گسترش جریان ثانویه و تغییر موقعیت خط سرعت حداکثر نزدیک بستر به سمت ساحل خارجی از میزان آبشستگی حداکثر کاسته می‌شود. محدوده تغییرات آبشستگی حداکثر در آزمایشات انجام شده بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۵ برابر عمق جریان در بالا دست می‌باشد. همچنین با افزایش شعاع انحنای قوس، همان‌طور که در شکل (۹-ب) مشاهده می‌شود محل آبشستگی حداکثر به سمت انتهای قوس سوق می‌یابد که دلیل آن افزایش سرعت جریان و در نتیجه آن تنش برشی لایه‌های نزدیک بستر در قوس ملایم و از مقطع ۷۰ درجه به بعد می‌باشد.

دلیل آن این است که با خروج جریان از قوس و ورود به مسیر مستقیم پایین دست، سطح آب در قوس خارجی کاهش می‌یابد و به همین دلیل گرادیان طولی فشار در خروجی کانال قوسی منفی می‌شود این امر باعث افزایش تنش برشی، حرکت رسوبات و در نتیجه ایجاد آبشستگی می‌گردد که در شکل‌های (۸-ب) و (۸-ج) مشاهده می‌شود.

شکل (۹) مقدار آبشستگی حداکثر بی بعد شده با عمق جریان در بالادست و فاصله محل آبشستگی حداکثر از شروع قوس را نشان می‌دهد. در این شکل dsm بیانگر اندازه آبشستگی حداکثر و S_0 فاصله محل آبشستگی حداکثر از شروع قوس ب ر حسب درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود با افزایش شعاع انحنای قوس

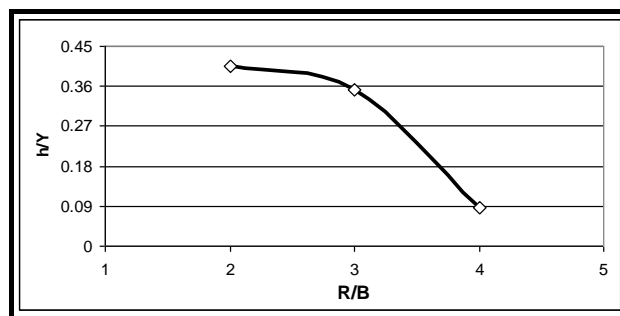


(الف)

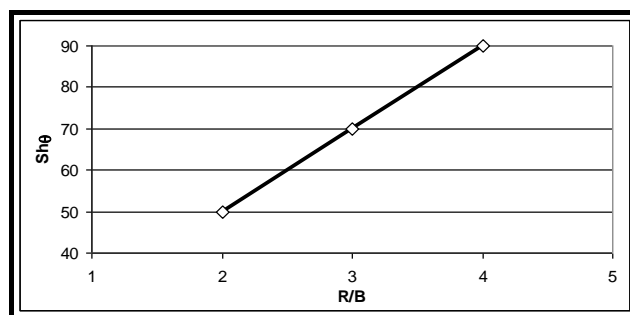


(ب)

شکل (۹) مقدار (الف) آبستگی حداکثر و (ب) فاصله محل آبستگی حداکثر از شروع قوس و بی بعد شده با عمق جریان در بالادست در برابر نسبت بدون بعد شعاع انحنا



(الف)



(ب)

شکل (۱۰) مقدار (الف) ارتفاع حداکثر رسوبات و (ب) فاصله محل ارتفاع حداکثر رسوبات از شروع قوس و بی بعد شده با عمق جریان در بالادست در برابر نسبت بدون بعد شعاع انحنا

- در مقطع ۶۰ درجه و در دو قوس تند و متوسط آبشستگی در فاصله‌ای معادل ۳۰ درصد عرض کانال از محور کانال به سمت ساحل داخلی مشهود بوده و از آن فاصله تا ساحل داخلی رسوب‌گذاری مشاهده می‌شود که میزان رسوب‌گذاری در مورد قوس متوسط مشهود تر است.

- وجود آبشستگی در نزدیکی ساحل خارجی در فاصله بین مقطع ۶۰ تا ۹۰ درجه در قوس ملایم، دلالت بر نزدیک شدن مکان هندسی سرعت حداکثر به ساحل خارجی و در نتیجه افزایش تنش برشی بستر در این مقطع را دارد.

- در مقاطع به فاصله یک برابر عرض کانال از انتهای قوس آبشستگی در فاصله معادل ۳۰ درصد عرض کانال از ساحل خارجی مشاهده می‌شود که با کاهش شعاع انحنای قوس عمق آبشستگی و گسترش آن به سمت محور کانال مشهودتر می‌باشد.

- در فاصله‌ای معادل ۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی شروع آبشستگی در قوس ملایم و از نیمه دوم قوس تا انتهای قوس مشاهده می‌گردد. ضمن این که در این مقطع و در مسیر مستقیم پایین دست در فاصله حدود ۰/۵ تا ۱/۷ برابر عرض کانال و در دو قوس تند و متوسط آبشستگی مشهود می‌باشد. در مقطع به فاصله ۱۰ درصد عرض کانال از ساحل خارجی تا فاصله حدود ۲ برابر عرض کانال به سمت پایین دست آبشستگی گسترش یافته است.

- مقدار آبشستگی حداکثر در قوس تند و متوسط به ترتیب ۱۵ و ۱۳ درصد عمق جریان از ابتدای قوس و در موقعیت‌های ۳۰ و ۵۵ درجه و در فاصله بین محور کانال و ساحل داخلی اتفاق می‌افتد در حالیکه بیشترین مقدار رسوب‌گذاری با اختلاف فاز حدود ۱۵ تا ۲۰ درجه در بالادست محل آبشستگی حداکثر (در موقعیت ۵۰ و ۷۰ درجه) در نزدیکی ساحل داخلی و به میزان ۳۹ و ۳۴ درصد عمق جریان در ابتدای قوس به وقوع می‌پیوندد.

شکل (۱۰) مقدار ارتفاع رسوبات حداکثر بی بعد شده با عمق جریان در بالادست و فاصله محل رسوبات حداکثر از شروع قوس بر حسب درجه رانشان می‌دهد. در این شکل h بیانگر ارتفاع رسوبات حداکثر و $Sh\theta$ فاصله محل رسوبات حداکثر از شروع قوس می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می‌شود با افزایش شعاع انحنای قوس ارتفاع رسوبات حداکثر کاهش می‌یابد که دلیل آن مقدار کم آبشستگی و رسوبات منتقل شده از محدوده فرسایش یافته می‌باشد. محدوده تغییرات ارتفاع رسوبات بین ۰/۰۹ تا ۰/۴۱ برابر عمق جریان بالادست می‌باشد. شکل (۱۰-ب) نیز بیانگر افزایش فاصله رسوبات حداکثر از ابتدای قوس در مقابل افزایش شعاع انحنای کانال می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر پارامتر شعاع انحنای قوس بر تغییرات توپوگرافی بستر قوس و مسیر مستقیم پایین دست پرداخته شده است که اهم نتایج به شرح زیر است:

- در مقطع ۲۰ درجه از نزدیکی محور کانال تا نزدیکی ساحل داخلی در قوس تند آبشستگی مشاهده می‌گردد در حالی که در دو قوس دیگر تغییرات توپوگرافی بستر مشهود نمی‌باشد.

- در مقطع ۴۰ درجه شروع رسوب‌گذاری در نزدیکی قوس داخلی می‌باشد. در حالی که در قوس تند مشهود تر می‌باشد. در قوس تند ($R=2B$) در فاصله بین ۶۵ تا ۸۰ درصد عرض مقطع و از قوس خارجی آبشستگی و پس از آن و تا قوس داخلی رسوب‌گذاری واقع شده است.

- در مقطع ۵۰ درجه، بیشترین ارتفاع رسوبات در قوس تند، به میزان ۴۰ درصد عمق جریان مشاهده می‌شود.

شعاع انحنای قوس، محل آبستتگی حداکثر به سمت انتهای قوس سوق می‌یابد
 - با افزایش شعاع انحنای قوس ارتفاع رسوبات حداکثر کاهش می‌یابد محدوده تغییرات ارتفاع رسوبات بین ۰/۰۹ تا ۰/۴۱ برابر عمق جریان بالادست می‌باشد. همچنین افزایش فاصله رسوبات حداکثر از ابتدای قوس در مقابل افزایش شعاع انحنای کانال مشاهده می‌شود.

- در قوس ملایم بیشترین مقدار آبستتگی و رسوب‌گذاری به ترتیب به میزان ۸/۵ و ۷ درصد عمق جریان از ابتدای قوس به ترتیب در موقعیت ۸۵ درجه (در نزدیکی ساحل خارجی) و ۵۵ درجه (در نزدیکی قوس داخلی) حادث می‌شود.
 - با افزایش شعاع انحنای قوس و تبدیل قوس تند به ملایم از میزان آبستتگی حداکثر کاسته می‌شود. محدوده تغییرات آبستتگی حداکثر در آزمایشات انجام شده بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۵ برابر عمق جریان در بالا دست می‌باشد. همچنین با افزایش

مراجع

۱. دهقانی، ا. قدسیان، م. صالحی نیشابوری، ع.ا. شفیی فر، م. ۱۳۸۶ "بررسی تغییرات بستر کانال‌های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه" نشریه هیدرولیک ایران، شماره اول، ۱-۱۶
۲. فضل، م. قدسیان، م. صالحی نیشابوری، ع.ا. ۱۳۸۷ "تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه در شرایط مختلف جریان" شماره ۱۰.
3. Blanckaert, K. 2002. Modeling of Secondary Flow Structure in River Bends, River Flow 2002, Bousmar & Zech (eds.), pp. 127-133.
4. Da Silva, A. M. F. and Yalin, M. S. 1997. Laboratory Measurements in Sine-Generated Meandering Channels. International Journal of Sediment Research. Vol. 12, No. 1, pp. 16-28.
5. Ghodsian, M. and Mousavi, S. K., 2006, Experimental Study on Bed Scour in a 90° Channel Bend, International Journal of Sediment Research, Vol. 21, No.4, pp: 321-328.
6. Ippen, A. T., and Drinker, P. A., 1962. Boundary Shear Stress in Curved Trapezoidal Channels. Journal of Hydraulic Division, 1962, Vol. 88, No. HY5.
7. Roca, M., Vide, J.P.M., and Blanckaert, K., 2007. Reduction of Bend Scour by an Outer Bank Footing Design and Bed Topography. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 133, No.1.
8. Rodi, W., Leschziner A. 1978. Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow. Journal of the Hydraulic Division, 105(HY10).
9. Shams, M. and Ahmadi, G. and Smith, D. H. 2002. Computational Modeling of Flow and Sediment Transport and Deposition in Meandering Rivers", Advanced in Water Resources, Pp. 689-699.
10. Yamaoka, I. And Hasigawa, H. 1983. Effects of Bends and Alternating Bars on Meander Evolution . River Meandering, pp. 783-790.

11. Yamamoto, K. 1989. General Description on Features of Alluvial River. Public Works Research Institute, Ministry of Construction of Japan.
12. Yang, S. Q., 2005. Interactions of Boundary Shear Stress, Secondary Currents and Velocity. Fluid Dynamics Research, Vol.36, 121-136.
13. Zeng J., Constantinescu G., Blanckart K. and Weber L. "Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: Experiments and predictions", 2008, Water Resources Research, Vol. 44, No. 9