

# بررسی تغییرات بستر کانالهای آبرفتی در قوس 180 درجه

امیر احمد دهقانی<sup>1</sup>، مسعود قدسیان<sup>2\*</sup>، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری<sup>3</sup>، مهدی شفیعی فر<sup>4</sup>

1- استادیار هیدرولیک، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

2- استاد هیدرولیک، دانشکده فنی مهندسی و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

3- دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

4- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

\* تهران، صندوق پستی 143 - 14115

ghods@modares.ac.ir

**چکیده-** در این تحقیق، تغییرات بستر در کانال قوسی مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایشهایی در شرایط مختلف هیدرولیکی در کانال مستطیلی با قوس 180 درجه و انحنای نسبی  $(\frac{r_c}{B} = 4/33)$  و با بستر متحرک از جنس ماسه یکنواخت انجام و در هر آزمایش، تراز بستر در مقاطع مختلف کانال اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد که در تمامی آزمایشها 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 گرفت که محل چاله‌های فرسایشی، تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان بوده و با افزایش عدد فرود، به سمت رأس قوس منتقل می‌شود. مقایسه نتایج پروفیل عرضی بستر در شرایط مختلف هیدرولیکی نیز نشان داد که با افزایش عدد فرود، شیب عرضی جریان در محل حداکثر رسوبگذاری و فرسایش افزایش می‌یابد. در این تحقیق رابطه‌ای برای تخمین پروفیل عرضی بستر ارائه شده است. توزیع سرعت در مقطع عرضی در محل حداکثر رسوبگذاری نیز نشان دهنده وجود جریان ثانویه، فقط در قسمتی از مقطع عرضی است که علت آن تعادل مؤلفه عرضی نیروی وزن ناشی از وجود بار رسوبی با نیروی بالابرنده ناشی از جریان ثانویه است. رفتار موجی بستر در نیمه دوم قوس، نیز نشان دهنده رفتار نوسانی مؤلفه عرضی سرعت در این نواحی است.

**کلید واژگان:** کانال قوسی، جریان ثانویه، تغییرات بستر، چاله فرسایشی، بستر متحرک.

## 1- مقدمه

تراز سطح آب در قوس خارجی، به وجود می‌آید. به بیان دیگر به علت اینکه سرعت جریان در لایه‌های سطحی نسبت به لایه‌های تحتانی بیشتر است، لذا شتاب جانب مرکز موجب می‌شود که ذرات جریان در قسمتهای فوقانی به سمت ساحل خارجی رانده شوند. با توجه به ارضای قانون پیوستگی، لازم است ذرات جریان در لایه‌های پایینی به سمت قوس داخلی حرکت کرده و

مکانیزم جریان در قوس رودخانه‌ها نسبت به مسیرهای مستقیم پیچیدگی فراوانی دارد. از جمله مشخصات بارز جریان در قوسها وجود جریانهای حلزونی است که از اندرکنش جریان ثانویه و اینرسی جریان به وجود می‌آید. جریان ثانویه نیز به نوبه خود از عدم تعادل موضعی بین نیروی گریز از مرکز و نیروی فشاری ناشی از بالا افتادگی

Allen (1970) اثر غیریکنواختی مصالح بر پشته رسوبی را با توجه به نیروهای وارد بر ذرات رسوب بستر بررسی کرد.

Koch and Flokstra (1981) با انجام آزمایشهایی بر روی کانال 180 درجه با دانه‌بندی یکنواخت، تغییرات بستر در کانال را بررسی کردند.

Odgaard (1982) با توجه به مفهوم تنش برشی بحرانی و تعادل نیروها بین مؤلفه عرضی تنش برشی و مؤلفه عرضی وزن، توزیع اندازه دانه‌ها در عرض کانال قوسی را تعیین کرد. Ikeda et al. (1987) پدیده مرتب شدن عرضی مصالح بستر را مطالعه کرده و بیان کردند که این پدیده می‌تواند تا 40 درصد حداکثر عمق آبستگي را در منطقه توسعه یافته کاهش دهد. Yen and Lin (1990) با انجام آزمایشهایی بر روی رسوباتی با نسبتهای مختلف اندازه ذرات، نشان دادند که این پارامتر نقش بسزایی در تغییرات زمانی بستر دارد.

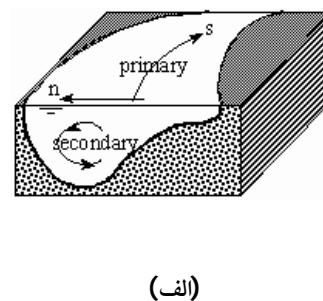
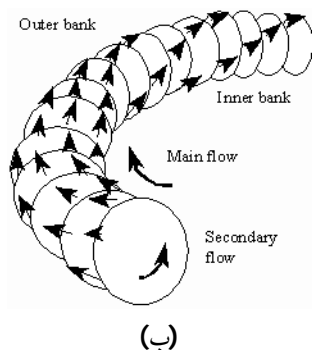
Odgaard and Bergs (1988) با انجام آزمایشهایی بر روی کانال 180 درجه با مقطع دوزنقه‌ای شکل، تغییرات بستر و اندرکنش آن را با میدان سرعت مطالعه کردند و علت نوسانی بودن بستر واقع در منطقه توسعه یافته (نیمة دوم قوس) را ناشی از الگوی نوسانی بردار عرضی سرعت در امتداد طولی کانال معرفی نمودند.

ذرات رسوب در کف بستر را به سمت قوس داخلی منتقل کند. بنابراین با قرارگیری ذرات جریان در مسیر قوسی، یک جریان عرضی شکل می‌گیرد که در بستر به سمت قوس داخلی و در سطح به سمت قوس خارجی است. از ترکیب این جریان عرضی با جریان طولی، جریان حلزونی مانند به وجود می‌آید. این جریان حلزونی نقش بسیار مؤثری در شکل‌دهی عرضی بستر - که وابسته به تنش برشی کف در راستای عرضی است - ایفا می‌کند. شکل 1 جریان ثانویه و حلزونی را در مسیر قوسی شکل نشان می‌دهد.

از آنجا که اغلب رودخانه‌ها در بیشتر قسمت‌ها انحنا دارند و همچنین به دلیل کاربرد فراوان خمهای رودخانه‌ها برای آبرگیری و برداشت رسوبات، کانالهای انحنادار تاکنون مورد توجه بسیاری از محققان بوده است.

Rozovskii (1961) و Yen (1965) مشخصات جریان و توزیع تنش برشی را در قوس با بستر ثابت مطالعه کردند. Yen (1967) همچنین مشخصات جریان و اندرکنش آن با تغییرات بستر را مطالعه کرد.

Engelund (1974)، Kikkawa et al. (1976) و Falcon and Kennedy (1983) شرح دقیقتری از جریان و شکل تغییرات بستر را در رودخانه‌های قوسی با جریان دائم ارائه کردند.



شکل 1 نمایی از جریان ثانویه و جریان حلزونی؛ الف - جریان ثانویه، ب - جریان حلزونی (Koch and Flokstra, 1981)

تحقیقات افرادی مانند (Koch and Rozovskii (1961) و (Yen and Lee (1995)، (Flokstra (1981)، (Odgaard (1982) بر روی کانالهایی با قوس 180 درجه متمرکز است. بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه کانالهایی با قوس 180 درجه، مبتنی بر مشخصات جریان و تغییرات بسترکانال برای شرایط خاصی از جریان است.

در تحقیق حاضر تغییرات بستر در کانالی با قوس 180 درجه با بستر متحرک و تحت تأثیر شرایط مختلف هیدرولیکی بررسی شده است. هدف از این آزمایشها بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی بر تغییرات بستر و تأثیر پروفیل بستر بر شرایط هیدرولیکی و مقاطع عرضی در مناطقی با حداکثر فرسایش و رسوبگذاری است.

## 2- تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایشات

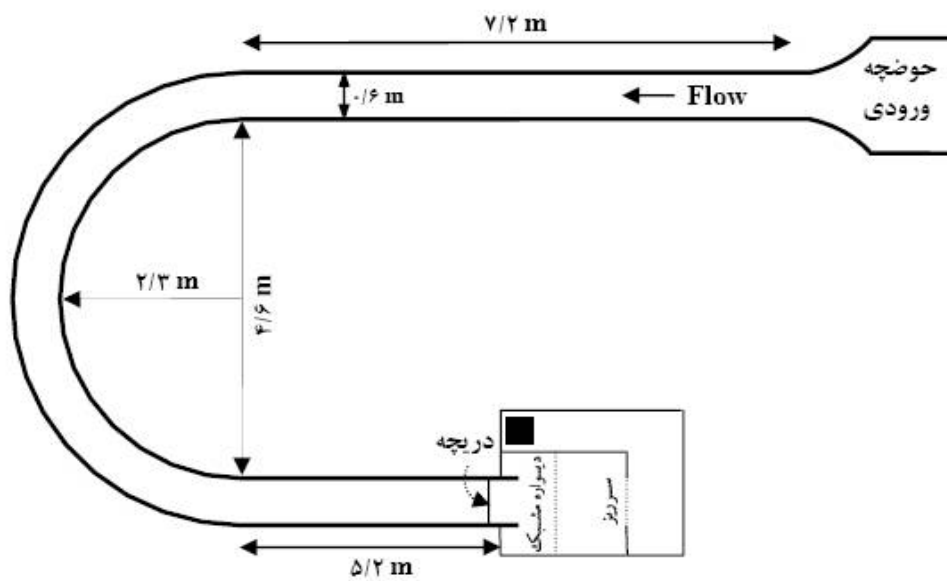
آزمایشها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در کانالی مستطیلی با زاویه مرکزی 180 درجه، شعاع متوسط 2/6 متر و عرض 0/6 متر انجام شد. انحنای نسبی پیچ برابر  $\frac{r_c}{B} = 4/33$  است؛ لذا پیچ در رده پیچهای ملایم قرار دارد. لازم است ذکر شود که شعاع انحنای کانال موجود با شعاع انحنای متوسط پیچهای رودخانه کارون تطابق دارد. طرحواره کانال آزمایشگاهی در شکل 2 مشاهده می شود.

با توجه به شکل مشخص است که خم توسط دو بازه مستقیم در بالادست و پایین دست به ترتیب برابر 7/2 و 5/2 متر به حوضچه ورودی و حوضچه انتهایی متصل می شود. عمق آب درون کانال توسط دریچه ای در انتهای کانال به نحوی تنظیم می شود که جریان نسبتاً یکنواختی در کانال بالادست ایجاد شود. لایه ای از ماسه به ضخامت حدود 20 سانتیمتر با قطر متوسط 1/28 میلیمتر و ضریب انحراف استاندارد  $\sigma = 1/3$  قبل از شروع هر آزمایش بر روی کف کانال گسترده می شود.

(Yen and Lee (1995) به بررسی اثر غیردائمی بودن جریان بر تغییرات بستر و پدیده مرتب شدن عرضی دانه ها در قوس 180 درجه پرداختند و نشان دادند که مشخصات هیدروگراف جریان ورودی اثر قابل توجهی بر تغییرات بستر و مرتب شدن عرضی دانه ها دارد و هیدروگرافهایی با نقطه اوج بیشتر و شیب تندتر، به تشکیل بار رسوبی بزرگتر و چاله های فرسایشی عمیقتری منجر می شوند.

(Yamaoka et al. (1983 تأثیر تغییر دبی و هندسه (شعاع خم) بر توپوگرافی بستر و الگوی جریان را در کانالهای مئاندري مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش دبی به میزان دو برابر، چاله فرسایشی توسعه بسیار بیشتری پیدا کرده، عمق آن نیز بیشتر می شود و موقعیت چاله نیز به سمت پایین منتقل می شود. همچنین با افزایش شعاع خم به میزان 60 درصد، چاله فرسایشی به پایین دست منتقل می شود. ایشان در ادامه تحقیقات خود به مطالعه بر روی مئاندري نامنظم با اندازه گیری الگوی سرعت و محل شکل گیری چاله فرسایشی، پرداخته و نشان دادند که چاله فرسایشی، بعد از رأس قوس شکل می گیرد. (Yamamoto (1989 نیز بررسیهایی را در زمینه الگوی جریان، رسوب و شکل گیری توده های ماسه ای در قوسهای مختلف با زوایای مرکزی قوس متفاوت انجام و نشان داد که همواره تمرکز جریان به سمت قوس خارجی است و دامنه تأثیر یا گستردگی چاله فرسایشی، با افزایش این زاویه، به بالادست رأس قوس توسعه می یابد.

(da Silva and Yalin (1997 به بررسی محل وقوع نواحی انباشت تله ماسه ای و نیز چاله فرسایشی در دو نوع قوس مئاندر ملایم و بسیار تند پرداختند و نشان دادند که محل شکل گیری چاله های فرسایشی در قوس تند از محدوده رأس شروع شده و بعد از آن نیز توسعه می یابد.



شکل 2 طرحواره کانال آزمایشگاهی و تجهیزات

بستر به شرایط تعادل نسبی می‌رسد. شرایط تعادل نسبی شرایطی است که پس از آن، تغییرات زمانی بستر در مناطق حداکثر عمق فرسایش و رسوبگذاری ناچیز بوده و ابعاد و سرعت حرکت فرمهای شکل گرفته در بستر نیز تقریباً ثابت است. در این زمان و به منظور محاسبه ارتفاع آب در کانال در مقاطع عرضی مختلفی از کانال تراز سطح آب توسط ترازسنج ثبت می‌شود. همچنین پروفیل سرعت در مقطع با حداکثر رسوبگذاری واقع در نیمه اول قوس، در زمان تعادل، با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج دو بعدی PEMS اندازه‌گیری می‌شود. اساس کار این دستگاه بر اختلاف الکترومغناطیسی بین دو الکتروود در سیال جاری استوار است. در خلال آزمایش با استفاده از تزریق مواد رنگی، حرکت ذرات در قسمتهای مختلف قوس نیز مطالعه می‌شود. پس از برداشت تراز سطح آب و پروفیل سرعت، آزمایش متوقف شده و آب موجود کم‌کم و بطور آهسته از کانال زهکشی شده و پس از تخلیه کامل آب، توپوگرافی بستر توسط ترازسنج اندازه‌گیری می‌شود.

کانال توسط دو ریل تجهیز شده تا اراهه‌ای بتواند بر روی آن حرکت کند. یک صفحه فلزی در زیر اراهه نصب شده که با حرکت اراهه در طول کانال، سطح رسوبات را به دقت صاف می‌کند. قبل از راه‌اندازی پمپ آب، دریچه انتهایی به اندازه کافی بالا آورده شده و آب به آرامی به درون کانال هدایت می‌شود. پس از بالا آمدن آب در کانال، پمپ با دبی کم راه‌اندازی و به تدریج توسط شیر فلکه اصلی بر روی پمپ، دبی به میزان مورد نظر رسانده می‌شود؛ سپس دریچه به آرامی پایین آورده می‌شود و این کار تا آنجا ادامه می‌یابد که در مسیر مستقیم بالادست، حرکت رسوبات به صورت باربستر مشاهده شود. پس از اینکه ارتفاع آب برای ایجاد باربستر توسط دریچه انتهایی تنظیم شد، عمق آب در نقاط مختلف توسط عمق‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. دبی جریان نیز توسط فلومتر و همچنین توسط سرریز اندازه‌گیری می‌شود. لازم است ذکر شود که این آزمایشها تا رسیدن به شرایط تعادل ادامه می‌یابد. منظور از شرایط تعادل شرایطی است که پس از آن، تغییرات زمانی ارتفاع رسوبگذاری و فرسایش در کلیه قسمتهای کانال، ناچیز باشد. این زمان برای انجام هر آزمایش تقریباً 48 ساعت بدست آمد که پس از این زمان،

### 3- طراحی کلی آزمایشات

هدف از این تحقیق، انجام مطالعات پایه در خصوص تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر تغییرات بستر است. از میان پارامترهای مؤثر بر تغییرات بستر می‌توان به دبی جریان، ارتفاع آب و عدد فرود جریان اشاره کرد. جدول 1 محدوده مقادیر پارامترهای مورد نظر را نشان می‌دهد.

### 4- مشاهدات آزمایشگاهی

در تمامی آزمایشها مشاهده شد که با پایین آوردن دریچه، اولین قسمتهایی که در آنجا دانه‌های رسوب شروع به حرکت می‌کنند، نزدیک به قوس خارجی و در محل خروج قوس است. یعنی در لحظاتی که دریچه تنظیم می‌شود، در موقعیتهایی از بازشدگی دریچه، حرکت بار بستر در قوس شروع می‌شود و میزان آن در خروجی قوس نسبت به جاهای دیگر بیشتر است؛ البته در مسیر مستقیم بالادست، حرکت رسوب مشاهده نمی‌شود یا در حد لرزشهایی بسیار ضعیف است. به علت اینکه در این آزمایشها، بستر، متحرک در نظر گرفته می‌شود، حرکت بار بستر باید از مسیر مستقیم بالادست آغاز شود و به همین منظور، دریچه به تدریج باز می‌شد تا ارتفاع جریان کمتر شود. این مشاهده دلالت بر این موضوع دارد که در مسیرهای منحنی، اولاً تنش برشی کف نسبت به مسیرهای مستقیم بیشتر است و ثانیاً در قوس خارجی و نزدیک به انتهای خم - که در آن گرادیان منفی فشار وجود دارد - نسبت به قسمتهای دیگر قوس، تنش برشی بیشتر است. همچنین یکی از نکات جالب در ساعات اولیه، نحوه حرکت رسوبات در کف است که از حدود زاویه 20-25 درجه، رسوبات در کف به قوس داخلی هدایت می‌شود و

در سطح آب، حرکت ذرات جریان به سمت قوس خارجی است. دلیل این پدیده وجود جریان ثانویه و شکل‌گیری آن در ناحیه در حال توسعه خم است. هرچه قدرت جریان ثانویه در منطقه در حال توسعه بیشتر باشد، رسوبات زودتر به طرف قوس داخلی حرکت می‌کنند.

همچنین با استفاده از تزریق مواد رنگی در سطح آب در قسمتهای مختلف قوس، ممتنم حرکتی ذرات در سطح آب به صورت کیفی بررسی شد. منظور از ممتنم حرکتی ذرات، نیروهایی است که موجب حرکت ذرات می‌شوند. در ورودی قوس، ممتنم حرکتی ذرات در قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی است و در انتهای قوس، ممتنم حرکتی ذرات در قوس خارجی بیشتر از قوس داخلی است. دلیل این پدیده آن است که در ورودی قوس، عمق جریان در قوس خارجی نسبت به مسیر مستقیم قبل از قوس بیشتر شده و در نتیجه سرعت کاهش می‌یابد و بعکس در قوس داخلی، عمق جریان آب نسبت به مسیر مستقیم قبل از قوس کمتر شده و در نتیجه سرعت افزایش یافته و ذرات در سطح آب نسبت به قوس خارجی سریعتر حرکت می‌کنند.

نکته مورد توجه دیگر در این آزمایشها، شکل بستر است که معمولاً ابعاد ناهمواریهای بستر در قوس داخلی کوچکتر و در قوس خارجی بزرگتر است. همچنین جهت حرکت رسوبات در کف کانال به این صورت است که زاویه تمایل تاج ناهمواریهای شکل گرفته در قوس خارجی در راستای جریان و در قوس داخلی متمایل به سمت جدار داخلی است. علت این پدیده، اثر جریان حلزونی است.

جدول 1 مشخصات هیدرولیکی جریان

ارتفاع آب در کانال بالادست خم $h_0$ (m)	دبی جریان $Q$ (l/s)	سرعت متوسط $U$ (m/s)	عدد فرود در کانال بالادست $Fr$
0/0801-0/194	17/7-50	0/36-0/44	0/31-0/41

بودن بستر کف کانال، نوسانی بودن سرعت جریان در راستای عمود بر جریان یا در جهت شعاعی است.

## 5- تحلیل نتایج

### 5-1- توزیع سرعت

با توجه به مشاهدات به عمل آمده در خلال آزمایشها، ابتدا نواحی واقع در قوس خارجی بویژه در نیمه دوم کانال

- یعنی در منطقه‌ای که جریان ثانویه گسترش یافته - تحت فرسایش قرار گرفته و با گذشت زمان و در هنگامی که رسوبگذاری ناشی از جریان ثانویه در قوس داخلی به تعادل نسبی می‌رسد، نواحی روبروی این مناطق رسوبگذاری در قوس خارجی شروع به فرسایش می‌کند. علت این پدیده را می‌توان اندرکنش رسوب و جریان دانست. در ابتدای آزمایش که سطح رسوبات صاف است جریان ثانویه‌ای از حدود زاویه 25-20 درجه مشاهده می‌شود و این جریان ثانویه در سرتاسر مقطع عرضی جریان وجود دارد؛ یعنی هیچ نیروی عکس‌العملی برای خنثی کردن این نیرو وجود ندارد. اما با گذشت زمان و شکل‌گیری شیب عرضی مؤلفه نیروی وزن در راستای عرضی افزایش یافته و نیروی ناشی از جریان ثانویه - که سعی در بالابردن دانه رسوب از شیب ایجاد شده را دارد - توسط مؤلفه عرضی وزن خنثی می‌شود. بدین منظور، توزیع سرعت دوبعدی در مقطع عرضی جریان در نیمه اول قوس یعنی در ناحیه در حال گسترش جریان، توسط دستگاه سرعت سنج دو بعدی PEMS اندازه‌گیری شده و نتایج در شکل 3 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 3 نمایان است، جریان ثانویه اصلی در قسمتی از مقطع عرضی شکل گرفته و نزدیک به قوس داخلی، بردارهای سرعت در کف و سطح آب به سمت قوس خارجی است.

یک جریان چرخشی کوچکتر نیز در گوشه سمت چپ تشکیل شده که علت تشکیل آن، ناهمگنی تنشهای

در تمامی آزمایشها در ساعات اولیه، در بیشتر نواحی نزدیک قوس خارجی و بویژه در انتهای قوس و در محل خروجی خم، فرسایش کف مشاهده می‌شود و به همین دلیل در این قسمتها، ناهمواریهای بستر به سمت پایاب حرکت کرده و موجب می‌شود که در ساعات اولیه، چند ناحیه فرسایش یافته در نیمه دوم قوس خارجی بویژه در خروجی خم مشاهده شوند.

در قوس داخلی، جریان حلزونی رسوبات را به این قسمت آورده و انباشته کرده و موجب می‌شود که در قوس داخلی رسوبگذاری مشاهده شود. نکته قابل توجه دیگر در ساعات اولیه آزمایش، حجم رسوباتی است که به پایاب می‌رسد؛ این مقدار در ساعات اولیه بسیار زیاد است و با گذشت زمان، حجم رسوبات کمتر می‌شود. همچنین نرخ حرکت رسوبات در نزدیکی قوس خارجی نسبت به قوس داخلی بیشتر است. با گذشت زمان، فرسایش در منطقه در حال توسعه یا نیمه اول قوس نیز شروع و موجب می‌شود که رسوبگذاری و فرسایش مضاعفی در این قسمتها ملاحظه شود. نکته قابل توجه در این رابطه آن است که در دبی‌های کم، گاهی رسوبگذاری در نیمه اول قوس داخلی آنقدر زیاد می‌شود که تپه رسوبات به سطح آب می‌رسد.

با انجام رسوبگذاری در نیمه اول قوس داخلی در موقعیت 40 تا 50 درجه، شیب عرضی بستر افزایش یافته و موجب می‌شود که اولاً عرض مفید جریان کمتر شده و سرعت طولی جریان افزایش یابد و ثانیاً شیب عرضی به حدی زیاد شود که اندرکنش جریان ثانویه و نیروی اینرسی نتواند دانه رسوب را به بالای تپه رسوبات منتقل نماید. به همین دلیل در قسمتی نزدیک به جدار داخلی، جریان در سطح و کف بستر به سمت قوس خارجی می‌باشد و در قسمتی از عرض کانال شاهد سیکل بسته جریان می‌باشیم که ناشی از وجود جریان ثانویه است. از نکات قابل توجه دیگر در این آزمایشها، اثر موجی تغییرات توپوگرافی در طول کانال است. عامل نوسانی

شده در عمق در محور کانال و در مقطع با حداکثر رسوبگذاری را نشان می‌دهد. وجود جریان ثانویه موجب می‌شود که جریان در قسمتی از عمق و نزدیک به کف به سمت قوس داخلی و در سطح به سمت قوس خارجی باشد.

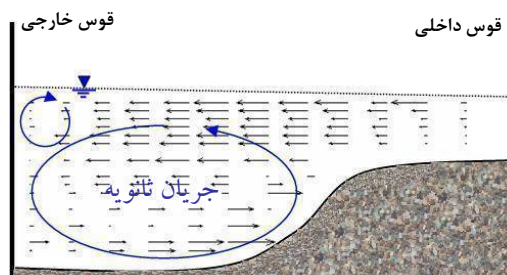
### 3-5- تغییرات بستر

#### 1-3-5- توپوگرافی بستر

شکل‌های 5 تا 9 خطوط همتراز بستر برای شرایط مختلف هیدرولیکی را نشان می‌دهد. خطوط همتراز نشان‌دهنده نقاطی با  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  یکسان است که  $\Delta Z$  تغییرات بستر نسبت به تراز بستر اولیه و  $h_0$  عمق اولیه جریان در کانال بالادست است.

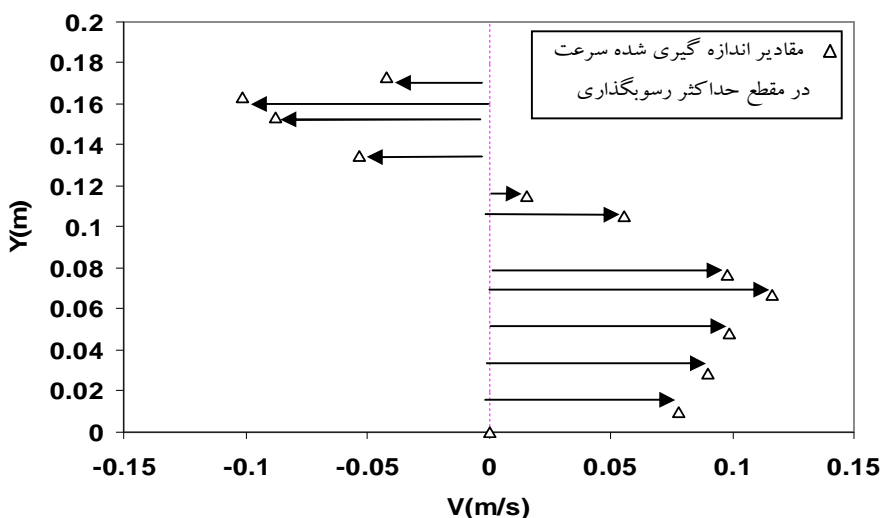
در ذیل هر یک از شکلها، مشخصات جریان اعم از دبی جریان ( $Q$ )، عدد فرود ( $Fr$ ) و نسبت سرعت جریان ( $U$ ) به سرعت بحرانی ( $U_c$ ) آورده شده است. سرعت بحرانی ( $U_c$ )، سرعتی متوسط جریانی است که به ازای آن دانه‌های رسوب در آستانه حرکت قرار می‌گیرند. به منظور محاسبه سرعت بحرانی از منحنیهای نیل (Niel) استفاده شده است (U. S. Dept. of Transp., 2003)

آشفستگی در این ناحیه است. جریان چرخشی کوچکتر را محققان قبلی نیز در پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مسیرهای دارای انحنا گزارش کرده‌اند (Blankart and Graf, 1981).

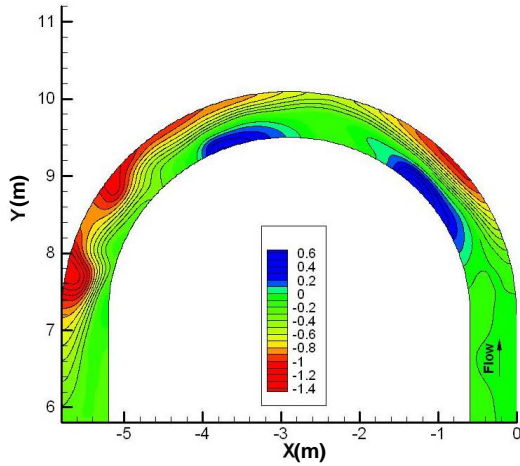


شکل 3 نمودار سرعت اندازه‌گیری شده در مقطع با حداکثر رسوبگذاری همراه با جریانهای ثانویه تشکیل شده در مقطع

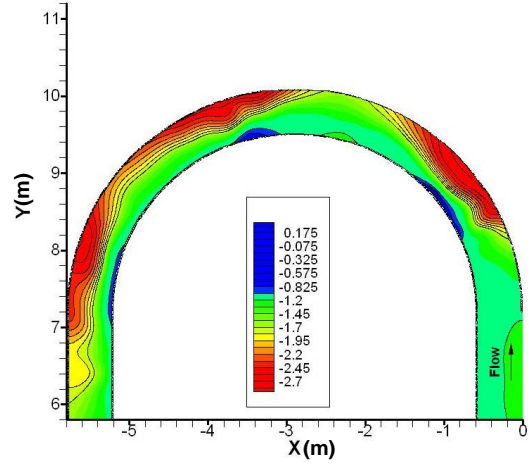
یکی از دلایل تشدید فرسایش در قوس خارجی می‌تواند این باشد که با شکل‌گیری عرضی بستر، عرض موجود برای جریان کاهش یافته و سرعت در این ناحیه افزایش می‌یابد. همچنین اگر در نمودار سرعت دقت شود، مشخص می‌شود که حداکثر سرعت جریان عرضی، درست موازی با کف «بستر شکل گرفته» در قوس داخلی است. این پدیده ناشی از اثر جریان عرضی است که در کف و سطح آب به سمت قوس خارجی در این ناحیه وجود دارد. شکل 4 نمونه‌ای از مقادیر سرعت اندازه‌گیری



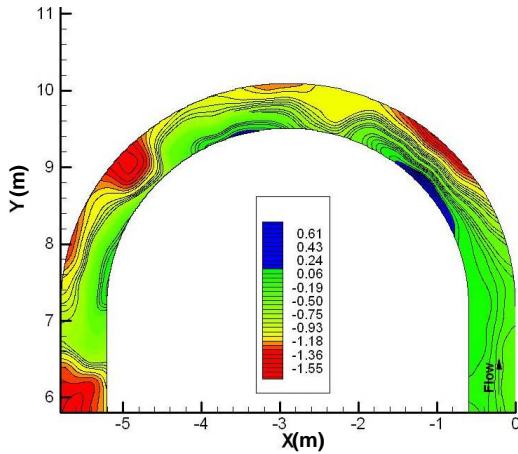
شکل 4 توزیع عمقی سرعت در محور کانال و در مقطع با حداکثر رسوبگذاری



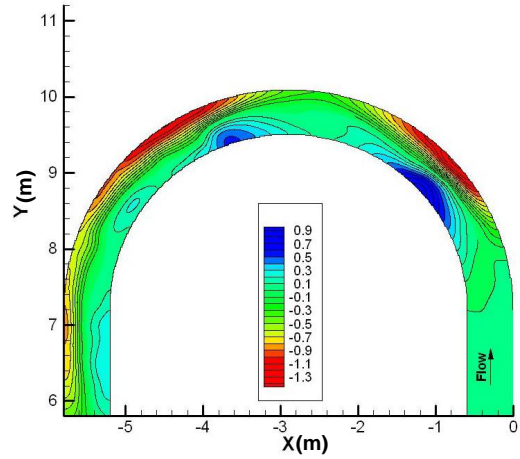
شکل 8 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  در کانال آزمایشگاهی  
( $Q=42$  l/s,  $Fr=0.35$ ,  $U/U_c = 1.10$ )



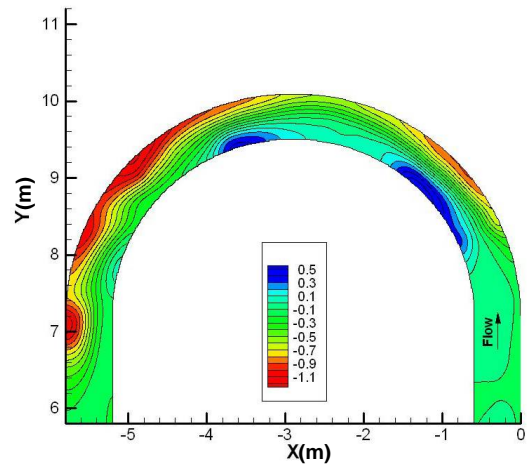
شکل 5 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  در کانال آزمایشگاهی  
( $Q=17.7$  l/s,  $Fr=0.42$ ,  $U/U_c = 1.17$ )



شکل 9 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  در کانال آزمایشگاهی  
( $Q=50$  l/s,  $Fr=0.31$ ,  $U/U_c = 1.05$ )



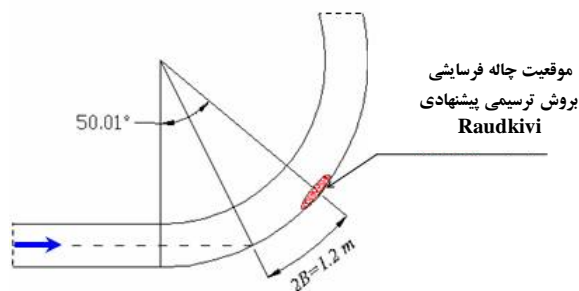
شکل 6 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  در کانال آزمایشگاهی  
( $Q=22$  l/s,  $Fr=0.39$ ,  $U/U_c = 1.13$ )



شکل 7 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  در کانال آزمایشگاهی  
( $Q=37$  l/s,  $Fr=0.35$ ,  $U/U_c = 1.10$ )

این منحنیها با استفاده از منحنی شیلدز و با انتخاب دانه‌بندیهایی با اندازه‌های مختلف به دست آمده است. اگر در این شکلها دقت شود می‌توان دریافت که در حالت کلی در تمامی آزمایشها، قوس خارجی در معرض فرسایش و قوس داخلی در معرض رسوبگذاری قرار دارد که این ناشی از جریان ثانویه است که مقدار حداکثر سرعت را در سطح آب به قوس خارجی منتقل و رسوبات را در کف به سمت قوس داخلی هدایت می‌کند. همچنین در تمامی آزمایشها، یک منطقه رسوبگذاری





شکل 10 روش پیشنهادی رادکیوی برای یافتن موقعیت چاله فرسایشی

همچنین محل چاله‌های فرسایشی شکل گرفته در نیمه دوم، با تغییر شرایط هیدرولیکی جریان تغییر کرده و به نظر می‌رسد که با افزایش عدد فرود، محل چاله‌های فرسایشی به سمت بالادست حرکت کرده‌اند (جدول 2). دلیل این پدیده می‌تواند این باشد که با افزایش عدد فرود جریان و با توجه به اینکه شیب عرضی بستر افزایش می‌یابد، خطوط جریان در کف نسبت به جریان‌هایی با اعداد فرود کمتر، بیشتر به سمت قوس خارجی متمایل شده و محل چاله فرسایشی به سمت بالادست حرکت می‌کند.

در شکل‌های 5 تا 9 نیز نوسانی بودن توپوگرافی بستر مشخص است. اگر در این شکلها دقت شود در تمامی این آزمایشها در قوس خارجی ابتدا در حوالی زاویه 45 تا 50 درجه حداکثر فرسایش روی می‌دهد و سپس با نزدیک شدن به رأس قوس، میزان این فرسایش کمتر و دوباره در نیمه دوم این فرسایش زیاد می‌شود، به نحوی که حداکثر آن در محل چاله اول است و دوباره این فرسایش کمتر شده و به سمت خروجی قوس، بار دیگر یک فرسایش زیاد مشاهده می‌شود. این رفتار نشانگر نوسانی بودن پروفیل بستر است. در نتایج Odgaard and Bergs (1988) نیز دو چاله فرسایشی در نیمه دوم مشاهده شده که چاله اول در زاویه 120 درجه و چاله بعدی که چاله عمیقتری است در زاویه 165 درجه تشکیل شده است. ایشان نیز به حالت نوسانی پروفیل بستر اشاره کرده‌اند.

(Point Bar) در نیمه اول قوس داخلی و یک منطقه فرسایشی (Pool) در روبروی این قسمت مشاهده می‌شود که علت آن، اختلاف شرایط جریان در بالادست و در محل خم است. جریان با ورود از مسیر مستقیم بالادست به مسیر قوسی، تحت اثر انحنای کانال قرار گرفته و شرایط هیدرودینامیکی آن تغییر یافته و جریان ثانویه شکل می‌گیرد که موجب ایجاد حرکت رسوبات و تغییر پروفیل کف می‌شود. علت ایجاد ناحیه فرسایش روبروی منطقه رسوبگذاری در قسمت قبل بیان شد.

نواحی Pool و Point Bar در نیمه اول در نتایج محققان قبلی از جمله Odgaard and Bergs (1988) و Koch and Flokstra (1981) نیز مشاهده شده است. البته تحقیقات فوق فقط برای شرایط هیدرولیکی مشخص و بیشتر به منظور یافتن الگوی جریان در خم و توزیع تک تک مؤلفه‌های معادله ممتم در قوس انجام شده و اثر پارامترهای هیدرولیکی بر تغییرات بستر تاکنون بررسی نشده است.

(Raudkivi (1993 مطابق شکل 10 محل ایجاد فرسایش در مجاری دارای انحنا را چنین تعریف کرد: اگر خطی از محور کانال بالادست (مسیر مستقیم) ترسیم و نقطه تلاقی این خط با جدار کانال مشخص شود، موقعیت چاله فرسایشی به اندازه دو برابر عرض کانال، از این نقطه جلوتر خواهد بود. چنانچه این روش در کانال آزمایشگاهی مورد نظر به کار گرفته شود، ناحیه حداکثر فرسایش در زاویه 50 درجه قرار خواهد گرفت که با نتایج حاصل از آزمایش - که در آن موقعیت چاله فرسایشی در نیمه اول بین 45 تا 50 درجه بود، همخوانی دارد (شکل‌های 5 تا 9). همچنین با توجه به توپوگرافی بستر می‌توان مشاهده کرد که در نیمه دوم قوس نیز رسوبگذاری و چاله‌های فرسایش وجود دارد. نکته قابل ذکر در این جا آن است که از روی مکان رسوبگذارپهای حداکثر در قوس، می‌توان به الگوی جریان در بستر پی برد.

شکلهای 14 تا 16 نمایانگر عمق جریان در مقاطع عرضی در تمامی طول خم است. اعداد مشخص شده بر روی هر نمودار معرف زاویه‌ای است که مقطع کانال اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با ورود به قوس و با توجه به وجود جریان ثانویه و در نتیجه رسوبگذاری و فرسایش، عمق جریان در قوس داخلی نسبت به قوس خارجی کمتر شده و با نزدیک شدن به رأس قوس، اختلاف این عمق کمتر شده و این اختلاف بار دیگر در نیمه دوم قوس زیاد می‌شود. علت این پدیده اثر نوسانی مؤلفه سرعت در جهت عرضی است (Odgaard and Bergs, 1988).

#### 5-3-4- شیب عرضی بستر

شکل 17 پروفیل عرضی بستر در مقطع چاله فرسایشی واقع در نیمه اول قوس را نشان می‌دهد. این ناحیه از نظر عملی برای مهندسان طراح بسیار حائز اهمیت است؛ به این دلیل که رسوبگذاری حداکثر در این ناحیه روی می‌دهد.

نکته قابل توجه، تغییرات شیب عرضی بستر با دبی و عدد فرود است. با توجه به این شکل می‌توان استنتاج کرد که شیب عرضی جریان با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. این افزایش تا محدوده عدد فرود 0/35 کمتر بوده و با افزایش عدد فرود، این تغییرات بیشتر خواهد شد.

تفاوت آزمایشهای (Odgaard and Bergs, 1988) با تحقیق حاضر در آن است که اولاً ایشان فقط در یک حالت و با مشخصات هیدرولیکی معینی آزمایش را انجام داده‌اند و ثانیاً آزمایشها در کانالی با مقطع دوزنقه‌ای و نسبت شعاع انحنا به عرض برابر 9/10 انجام شده است. بنابراین به نظر می‌رسد که محل چاله فرسایشی تابعی از مشخصات هندسی و نسبت شعاع انحنا به عرض کانال نیز باشد.

#### 5-3-2- پروفیل طولی بستر

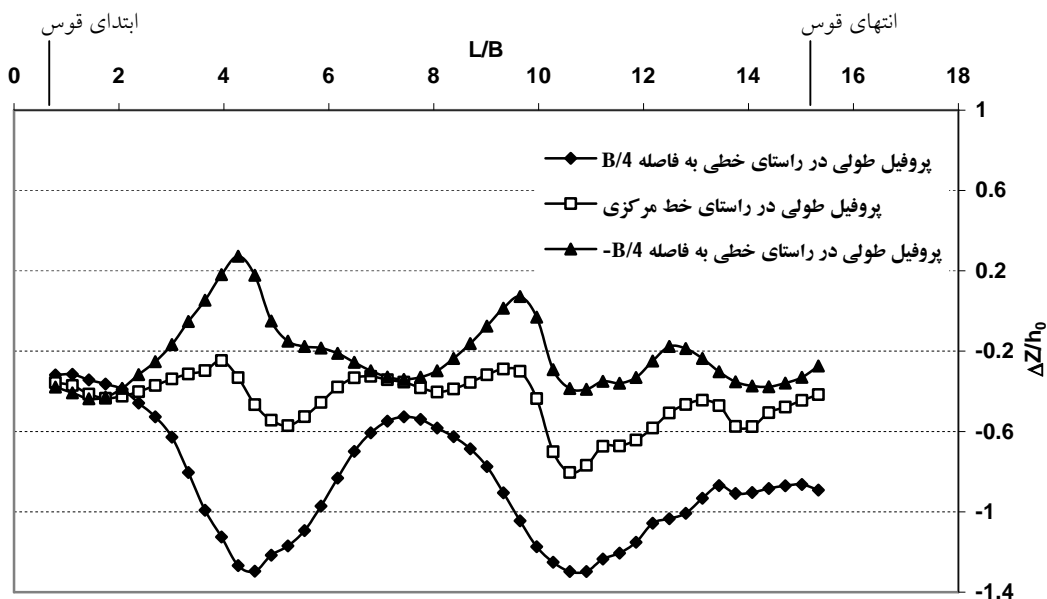
در شکلهای 11 تا 13 پروفیل‌های طولی اندازه‌گیری شده در سه مقطع نزدیک جدار خارجی، مرکز و نزدیک جدار داخلی ترسیم شده است. محور افقی این نمودارها معرف  $L/B$  است که  $L$  فاصله از ابتدای قوس و  $B$  عرض کانال است. در این شکلهای حالت نوسانی اشاره شده بخوبی نمایان است. از مقایسه شکلهای می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد فرود، فرسایش بیشتری روی می‌دهد و دبی حمل رسوب بیشتر می‌شود. در این شکلهای محل‌های حداکثر رسوبگذاری و حداکثر فرسایش نیز نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که حداکثر رسوبگذاری عمدتاً در نیمه اول قوس داخلی و حداکثر فرسایش در نیمه دوم قوس خارجی پدید می‌آید.

#### 5-3-3- عمق جریان در مقاطع عرضی

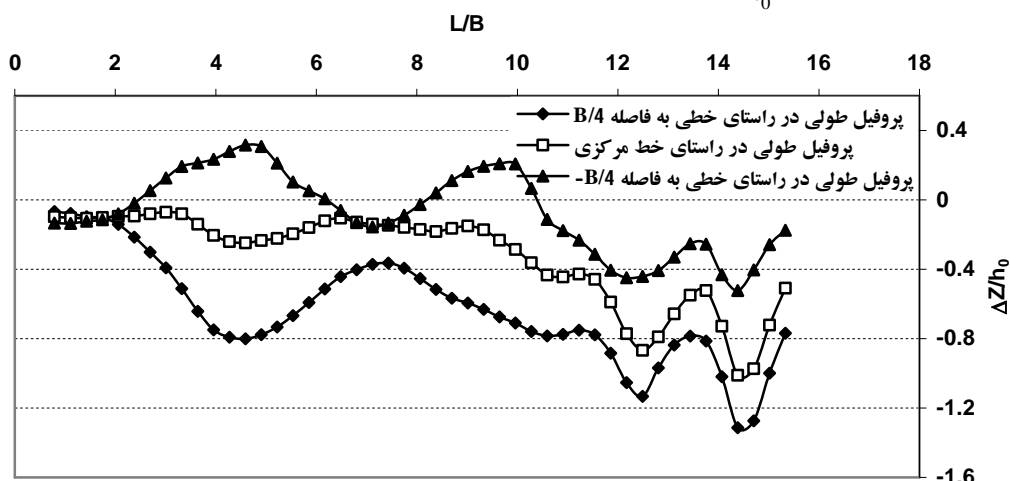
با توجه به اندازه‌گیریهای پروفیل سطح آب و پروفیل بستر، می‌توان عمق جریان را در مقاطع مختلف قوس در زمان تعادل به دست آورد.

جدول 2 تغییرات محل چاله فرسایشی نسبت به عدد فرود

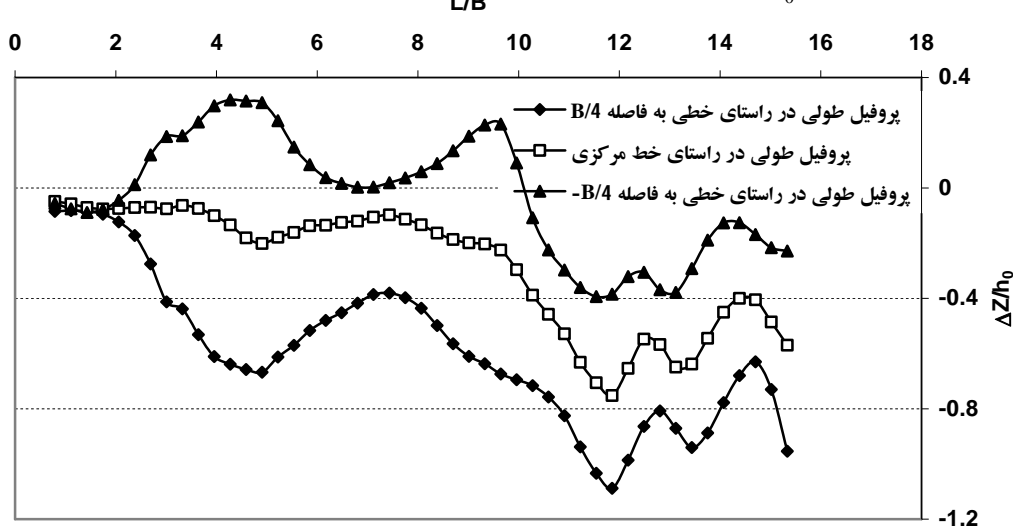
Fr	0/31	0/35	0/35	0/39	0/42
محل چاله فرسایشی (درجه)	138	135	135	120	110



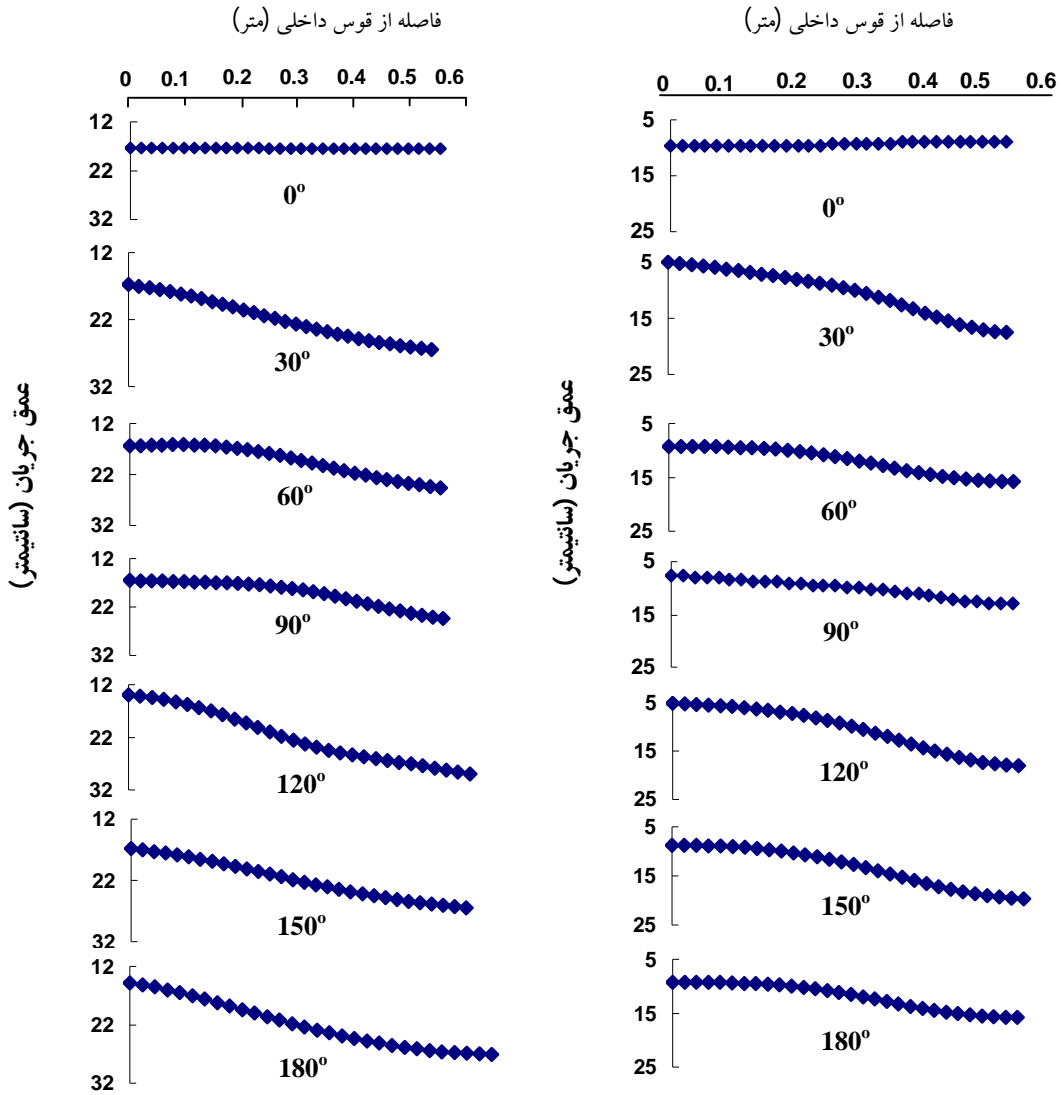
شکل 11 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  نسبت به  $L/B$  در کانال آزمایشگاهی برای  $Q=22 \text{ l/s}$ ,  $Fr=0.39$ ,  $U/U_c=1.13$



شکل 12 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  نسبت به  $L/B$  در کانال آزمایشگاهی برای  $Q=37 \text{ l/s}$ ,  $Fr=0.35$ ,  $U/U_c=1.06$

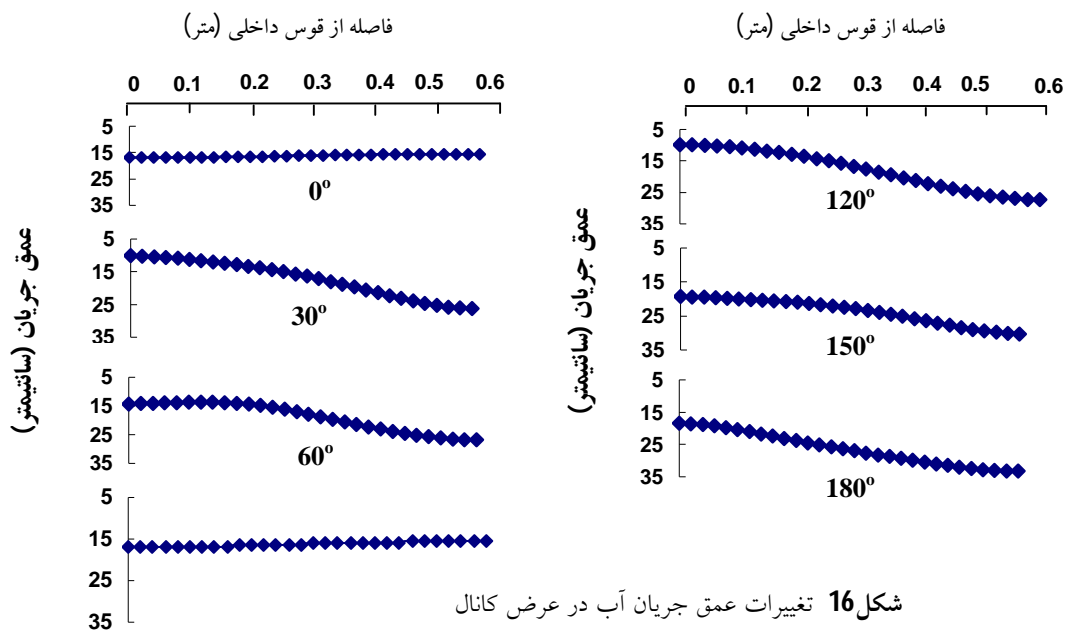


شکل 13 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  نسبت به  $L/B$  در کانال آزمایشگاهی برای  $Q=50 \text{ l/s}$ ,  $Fr=0.31$ ,  $U/U_c=1.05$

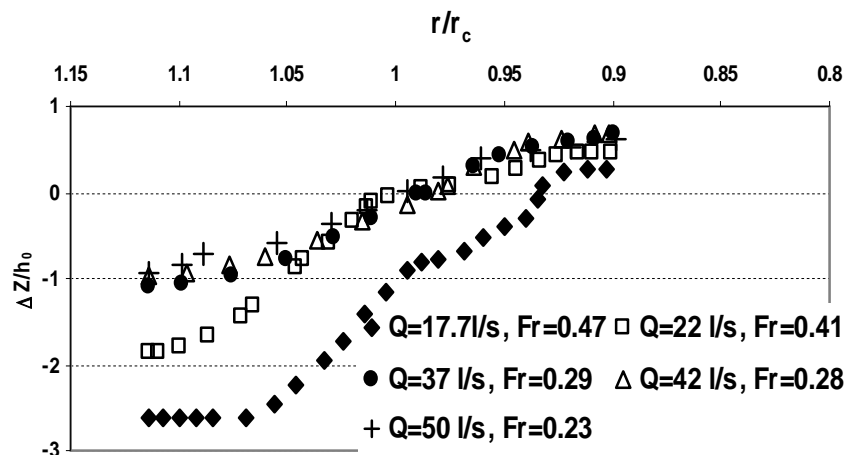


شکل 15 تغییرات عمق جریان آب در عرض کانال  
( $Q=17.7 \text{ l/s}$ ,  $Fr=0.42$ ,  $U/U_c=1.17$ )

شکل 14 تغییرات عمق جریان آب در عرض کانال  
( $Q=22 \text{ l/s}$ ,  $Fr=0.39$ ,  $U/U_c=1.13$ )



شکل 16 تغییرات عمق جریان آب در عرض کانال  
( $Q=37 \text{ l/s}$ ,  $Fr=0.35$ ,  $U/U_c=1.10$ )



شکل 17 تغییرات  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  نسبت به  $\frac{r}{r_c}$  در کانال آزمایشگاهی برای تمام شرایط هیدرولیکی

### 5-3-5- پروفیل عرضی بستر

با توجه به این نکته که شیب عرضی بستر تابعی از عدد فرود جریان است، بنابراین سعی شد تا در این قسمت، معادله پروفیل عرضی بستر در مقطع با حداکثر رسوبگذاری تعیین شود. به همین منظور و با توجه به شکل و نوع تغییرات پروفیل بستر، تابع تانژانت هیپربولیک به صورت رابطه (1) انتخاب شد.

$$\frac{\Delta Z}{h_0} = -a \tanh \left[ 10 \left( \frac{r}{r_c} - b \right) \right] \quad (1)$$

با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  و با استفاده از Solver نرم افزار Excel ضرایب  $a$  و  $b$  به صورت زیر به دست می آید:

$$a = 1.0676 + \frac{145.376}{1 + \exp[-51.36169(Fr - 0.503)]}$$

$$b = -0.485Fr + 1.15$$

در رابطه فوق  $\frac{\Delta Z}{h_0}$  نسبت تغییرات بستر به عمق اولیه جریان در کانال بالادست و  $\frac{r}{r_c}$  نسبت شعاع انحنای نقطه مفروض به شعاع انحنای مرکزی است. ضریب  $a$  شکل کلی بستر را تعیین می کند و ضریب  $b$ ، نقطه ای از مقطع عرضی است که  $\frac{\Delta Z}{h_0} = 0$  است.

Turne (1970) به منظور تعیین میزان عمق آبستگي در

قوس رابطه زیر را ارائه کرده است (Hoffman, 1997):

$$\frac{\Delta Z}{h_0} = 1.07 - \log \left( \frac{r}{B} - 2 \right) \text{ for } (2 < \frac{r}{B} < 22) \quad (2)$$

در رابطه فوق  $B$  عرض کانال می باشد.

Yen and Lee (1995) نیز رابطه زیر را برای تعیین عمق

آبستگي قوس در جریان غیر دائم ارائه کردند که اگر در

رابطه آنها به جای پارامتر معرف غیردائمی بودن جریان،

صفر قرار گیرد، رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\Delta Z}{h_0} = -0.814 \tanh \left[ 10 \left( \frac{r}{r_c} - 0.16 \right) \right] - 0.0135 \quad (3)$$

در جدول 3 مقادیر پیش بینی شده برای عمق حداکثر

توسط سه رابطه فوق برای آزمایشهای این تحقیق، آورده

شده است. چنانچه مقادیر  $\Delta Z_{(calculated)} / \Delta Z_{(measured)}$

برای هر سه رابطه محاسبه و سپس میانگین و انحراف

معیار داده ها برای هر رابطه محاسبه شود، مطابق جدول 4

می توان نتیجه گرفت که دقت مقادیر پیش بینی شده از

رابطه (1) از رابطه Yen and Lee (1995) بیشتر و دقت

رابطه Yen and Lee (1995) از رابطه Turne (1970)

بیشتر است. همچنین با افزایش عدد فرود مقادیر حاصل

از رابطه (1) با مقادیر حاصل از روابط محققان فوق

اختلاف زیادی خواهد داشت. بنابراین عدد فرود جریان،

پارامتری مؤثر در برآورد پروفیل عرضی بستر است.

جدول 3 مقادیر پیش بینی شده عمق حداکثر آبخستگی توسط روابط مختلف برای شرایط هیدرولیکی آزمایشهای تحقیق حاضر

$Fr$	مقادیر اندازه گیری شده $\Delta Z_{max}$ (متر)	مقادیر $\Delta Z_{max}$ محاسبه شده از رابطه (1) (متر)	مقادیر $\Delta Z_{max}$ محاسبه شده از رابطه تورنه (متر)	مقادیر $\Delta Z_{max}$ محاسبه شده از رابطه ین و لی (متر)
0/42	-0/211	-0/196	-0/056	-0/067
0/39	-0/177	-0/138	-0/067	-0/079
0/35	-0/161	-0/143	-0/103	-0/122
0/35	-0/154	-0/157	-0/112	-0/131
0/31	-0/178	-0/170	-0/136	-0/160

جدول 4 مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر  $\Delta Z_{(calculated)}/\Delta Z_{(measured)}$  برای رابطه مختلف

	رابطه (1)	Turne (1970)	Yen and Lee (1995)
میانگین	0/914	0/555	0/654

## 6- نتیجه گیری

مؤلفه نیروی وزن در راستای حرکت، با نیروی ثانویه به تعادل رسیده و از این به بعد جریان ثانویه فقط در قسمتی از مقطع عرضی وجود خواهد داشت.

4- در نیمه دوم قوس در ساحل خارجی نیز چاله‌های فرسایشی شکل می‌گیرد که با افزایش عدد فرود جریان، محل این چاله‌ها به سمت بالادست قوس منتقل خواهد شد.

5- با ثبت تراز سطح آب و پروفیل کف و به دست آوردن عمق جریان در مقاطع عرضی، این نتیجه به دست می‌آید که با ورود به قوس اختلاف عمق جریان در ساحل خارجی و داخلی به علت انحنای خطوط جریان زیاد بوده و با نزدیک شدن به رأس قوس این اختلاف کمتر شده و بار دیگر در نیمه دوم قوس، اختلاف عمق جریانها در دو ساحل داخلی و خارجی افزایش می‌یابد.

6- از مقایسه پروفیل‌های طولی بستر در قوس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد فرود میزان فرسایش بیشتری روی داده و دبی حمل رسوب بیشتر خواهد شد. شیب عرضی بستر نیز با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. این افزایش شیب عرضی تا محدوده عدد فرود 0/35 کمتر بوده و با افزایش عدد فرود، این تغییرات بیشتر

1- نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی که در کانالی مستطیلی با قوس 180 درجه و انحنای نسبی  $(\frac{r_c}{B} = 4/33)$  و با بستر متحرک از جنس ماسه یکنواخت انجام شد، نشان می‌دهد که الگوی توپوگرافی بستر در نیمه اول قوس که در منطقه در حال توسعه جریان قرار دارد، مشابه بوده اما شیب عرضی و تغییرات عرضی بستر متناسب با شرایط هیدرولیکی جریان با یکدیگر تفاوت دارند.

2- در نیمه دوم قوس یعنی در جایی که جریان کاملاً توسعه یافته است، الگوی نوسانی بستر مشاهده می‌شود که ناشی از نوسانی بودن مؤلفه سرعت در جهت عرضی است.

3- ثبت پروفیل سرعت در مقطع با حداکثر رسوبگذاری نشان دهنده آن است که اندرکنش دو نیروی وزن در راستای عرضی و نیروی ثانویه، موجب شکل‌گیری پروفیل عرضی بستر می‌شود. بدین معنی که در ابتدای شروع جریان، نیروی ثانویه موجب ایجاد تنش برشی در جهت عرضی شده و رسوبات را در کف به قوس داخل هدایت می‌کند و با گذشت زمان و شکل‌گیری پروفیل عرضی،

[7] Ikeda, S., Yamasaka, M., and Chiyoda, M. (1987). "Bed topography and sorting in bends." *J. Hydraulic Engrg.*, 113(2), 190-206.

[8] Kikkawa, H., Ikeda, S., and Kitagawa, A., (1976). "Flow and bed topography in curved open channel." *J. Hydraulic Engrg.*, 102 (9), 1327-1342.

[9] Koch, F. G. and Flukstra, C. (1981). "Bed level computations for curved alluvial channels." *Proc. XIXth congress of the Int. Assoc. for Hydr. Res.*, New Delhi, India, 2, 357.

[10] Odgaard, A. J., (1982). "Bed characteristics in alluvial channel bends." *J. Hydraulic Engrg.*, 108 (11), 1268-1281.

[11] Odgaard, A. J., and Bergs, M. A. (1988). "Flow processes in a curved alluvial channel." *Water Resour. Res.*, 24(1), 45-56.

[12] Raudkivi, A. J. (1993). *Sedimentation*. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.

[13] Rozovskii, I. L., (1961). "Flow of water in bends of open channels." No. OTS60-51133, Y. Prushansky, translation, Office of Technical Services, U. S. Dept. of Commerce, Washington, D. C.

[14] da Silva, A. M. F. and Yalin, M. S. (1997). "Laboratory measurements in sine-generated meandering channels." *International Journal of Sediment Research.*, 12(1), 16-28.

[15] U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, (1988). "Design of roadside channels with flexible linings." *Hydraulic Engineering Circular No. 15*. Publication No. FHWA-IP-87-7.

[16] U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, (2003). "Bottomless culvert scour study." *Hydraulic Engineering Circular*. Publication No. FHWA-RD-02-078.

[17] Yamamoto, K., (1989). "General description on features of alluvial river." Public Works Research Institute, Ministry of Construction of Japan.

[18] Yamaoka, I. M., and Hasegawa, K., (1983). "Effects of bends and alternating bars

خواهد شد، یعنی شیب عرضی بستر تابعی از عدد فرود جریان است.

## 7- فهرست علائم

$a$	ضریب رابطه (1)
$b$	ضریب رابطه (1)
$B$	عرض کانال
$\Delta Z$	تغییرات بستر نسبت به تراز اولیه
$Fr$	عدد فرود جریان در کانال بالادست
$h_0$	عمق جریان در کانال بالادست
$L$	فاصله از ابتدای قوس
$Q$	دبی جریان
$r$	شعاع نقطه مورد نظر
$r_c$	شعاع مرکزی کانال
$\sigma$	ضریب یکنواختی رسوب
$U$	سرعت متوسط جریان در کانال بالادست
$U_c$	سرعت بحرانی

## 8- منابع

[1] صالحی، س.ع.ا، و اقبالزاده، ا. (1381). "بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس." *ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز*, 567-574.

[2] Allen, J. R. L., (1970). "A quantitative model of grain size and sedimentary structures in lateral deposits." *Geological J.*, 7, 129-146.

[3] Blankart, K., and Graf, W. H., (2001). "Mean flow And turbulence in open channel bend." *J. Hydraulic Engrg.*, 127(10), 835-846.

[4] Engelund, F., (1974). "Flow and bed topography in channel bends." *J. Hydraulic Engrg.*, 100 (11), 1631-1648.

[5] Falcon, M. A., and Kennedy, J. F., (1983). "Flow in alluvial river curves." *J. Fluid Mech.*, 133, 1-16.

[6] Hoffmans, G. J. (1997). *Scour manual*. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

[21] Yen, C. L., and Lee, K. T, (1995). "Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow." J. Hydraulic Engrg., 121(8), 591-599.

[22] Yen, C. L., and Lin, Y. L, (1990). "Bed material and bed topography in channel bend." Proc.7th Asian and Pacific Div. Congress, IAHR, 213-218.

on meander evolution." River Meandering., 783-790.

[19] Yen, B. C., and Lee, K. T, (1965). "Characteristics of subcritical flow in meandering channel." Iowa Inst. of Hyd. Res, Iowa.

[20] Yen, C. L., (1967). "Bed configuration and characteristics of subcritical flow in meandering channel sorting in channel bend with unsteady flow." PhD thesis, University of Iowa, Iowa.