

## مقدمه

قوس های رودخانه به دلیل اثر نیروهای گریز از مرکز و تشکیل جریان ثانویه باعث تغییر الگوی جریان شده به گونه ای که بیشینه ی سرعت جریان به تدریج از قوس درونی در ابتدای خم به قوس خارجی منتقل می شود. در اثر وجود جریان های ثانویه تغییرات عرضی سرعت نیز تغییر می کند به گونه ای که در خم، جریان سطحی به سوی قوس بیرونی و جریان های عمقی به سوی قوس درونی حرکت کرده جریان حلزونی شکلی را به وجود می آورند. در اثر این تغییر الگوی جریان، حرکت رسوب از قوس بیرونی به سمت قوس درونی است. در نتیجه ی تداوم این انتقال آبستگي در محل پاشنه ی قوس بیرونی و رسوب گذاری در قوس درونی رخ می دهد. بیشینه ی میزان آبستگي نیز در محلی که قدرت جریان های ثانویه و حلزونی زیاد است مشاهده می شود. چاله ی تشکیل شده باعث ناپایداری ساحل و فرسایش شدید می گردد. روش های متفاوتی برای حفاظت ساحل در قوس ها متداول است که معمولاً به دو دسته روش های مستقیم یا روش های پوششی و روش های غیر مستقیم یا غیر پوششی تقسیم می شوند، در روش های غیر مستقیم با اصلاح یا تغییر الگوی جریان تلاش می شود تا میزان آبستگي کاهش و یا کنترل گردد. در حالی که در روش های مستقیم با استفاده از مصالح مقاوم فرسایش سواحل کنترل می گردد. دیوار حائل بتنی، سنگ و سیمان و یا شمع و پانل، از جمله روش های مستقیم می باشد که به ویژه در مناطق شهری و یا صنعتی و یا محل ایستگاههای پمپاژ استفاده می شود. هزینه های عمده این روش بستگی به عمق کارگذاری پی دارد که خود تابعی از بیشینه ی عمق آبستگي در قوس بیرونی است و در صورتی که بتوان از میزان آن کاست صرفه جویی زیادی در احداث دیواره ی حائل خواهد شد. یکی از روش هایی که می تواند مورد استفاده قرار گیرد کارگذاری تیغه ی افقی در دیواره ی قوس خارجی است. عملکرد تیغه ی افقی در این جا شبیه عملکرد طوقه در محل پایه های پل است. (بروسرزو رادکیوی [۵])، سینگ و همکاران [۱۱]) به گونه ای که با نصب آن می توان باعث تغییر جهت جریان های ثانویه ی روبه پایین گردید و از برخورد مستقیم آن به محل پایه ی پل جلوگیری و در نتیجه میزان عمق آبستگي را کاهش داد. زراتی و همکاران [۱۴] با قرار دادن طوقه ای اطراف پایه ی پل مستطیلی شکل که دارای لبه های گرد شده بود، به این نتیجه رسیدند که افزایش عرض طوقه و همچنین کاهش عمق کارگذاری باعث کاهش آبستگي اطراف پایه ی پل می شود. به دلیل پیچیدگی های

## بررسی آزمایشگاهی اثر تیغه ی افقی بر توپوگرافی بستر در خم ۹۰ درجه

علیرضا رضانی<sup>۱</sup>، محمود شفاعی بجنستان<sup>۲</sup> و سیدمحمود کاشفی پور<sup>۳</sup>  
تاریخ دریافت: ۸۷/۱۲/۴ تاریخ پذیرش: ۸۸/۳/۲۰

## چکیده

ساحل خارجی خم رودخانه ها به دلیل نحوه شکل گیری الگوی جریان به ویژه جریان های ثانویه در خم، در معرض فرسایش شدید می باشد. از این رو ضروری است تا حفاظت گردد. روش های حفاظتی باید با در نظر گرفتن بیشینه ی عمق فرسایش طراحی و اجرا شوند. روش های کاهش عمق آبستگي باعث کاهش هزینه های روش های حفاظتی می گردد. در این مقاله کاربرد تیغه ی افقی به منظور بررسی میزان تاثیر آن در کاهش عمق آبستگي مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور خم ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک ساخته شد و اثر تیغه ی افقی را که در طول قوس خارجی در برابر جریان جلو آمده بر کاهش فرسایش و توپوگرافی بستر در آبراهه های روباز بررسی گردید. نتایج آزمایش ها نشان داد که این روش در کاهش آبستگي و یکنواخت نمودن توپوگرافی بستر کاملاً موثر است. آزمایش ها برای تیغه به عرض ۷۵ میلیمتر در چهار عمق کارگذاری ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد، بیشینه ی عمق آبستگي برای حالت بدون تیغه انجام شد و نتیجه گیری شد که قرار گیری تیغه در ۴۰ درصد بیشینه ی عمق آبستگي حالت بهینه را دارا بوده و باعث ۴۴/۵ درصد کاهش در بیشینه ی عمق آبستگي نسبت به حالت بدون کارگذاری تیغه می شود.

واژه های کلیدی: قوس، چاله ی فرسایش، تیغه ی افقی، رقوم بستر و حفاظت ساحل

۱ نویسنده ی مسئول و دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز a.r.rezania@gmail.com

۲ استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳ دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۱۵ درجه تا حدود زاویه‌ی ۹۰ درجه از نزدیکی جداره‌ی داخلی به مجاور جداره‌ی خارجی منتقل می‌شود و پس از آن تا انتهای قوس در همین بخش باقی می‌ماند. همچنین مقدار آن به سمت انتهای قوس افزایش می‌یابد که در نیمه‌ی دوم قوس به علت تغییرات سرعت طولی، مقدار فرسایش کاهش و سپس افزایش می‌یابد و بیشینه‌ی آن در نزدیکی انتهای قوس رخ می‌دهد. دهقانی و همکاران [۱] تغییرات بستر در آبراهه‌های آبرفتی را در قوس ۱۸۰ درجه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به دست آمده از آزمایش نشان داد که در تمامی موارد آزمایش در نیمه‌ی نخست قوس، یک تپه‌ی رسوبی در قوس داخلی و یک چاله‌ی فرسایشی روبروی این تپه‌ی رسوبی شکل می‌گیرد. همچنین در نیمه‌ی دوم قوس تپه‌ی رسوبی در قوس داخلی و چندین ناحیه‌ی فرسایشی در قوس خارجی به وجود می‌آید که محل چاله‌های فرسایشی تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان بوده و با افزایش عدد فرود، به سمت راس قوس جابه‌جا می‌شوند.

روکا و همکاران [۱۰] با انجام آزمایش‌هایی در یک قوس ۱۸۶ درجه نشان دادند که قرار دادن تیغه‌ی افقی در طول دیواره‌ی قوس خارجی می‌تواند عمق آبشستگی را کاهش دهد. نتایج آنها نشان داد که عمق کارگذاری تیغه‌ی افقی می‌تواند بسیار موثر باشد. با توجه به مطالب بالا و با این فرضیه که تیغه‌ی افقی می‌تواند در کاهش عمق چاله‌ی فرسایشی موثر باشد، این بررسی انجام شده است. هدف اصلی از این پژوهش شناخت میزان تاثیر عمق کارگذاری تیغه بر میزان کاهش عمق چاله‌ی فرسایشی در یک خم تند ۹۰ درجه می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مدل فیزیکی

جهت انجام این پژوهش فلومی با قوس تند ۹۰ درجه و با نسبت شعاع به عرض برابر دو ( $R/B=2$ )، با الگوبرداری از یکی از قوس‌های تند رودخانه‌ی کارون در محدوده‌ی اهواز، در آزمایشگاه



شکل ۱ - دستگاه bed profiler و نحوه قرارگیری بر فلوم آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری توپوگرافی بستر

مکانیزم جریان در قوس رودخانه‌ها نسبت به مسیرهای مستقیم، مطالعه‌ی آبشستگی در آبراهه‌های انحنا دار تا کنون مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. یومائوکا و همکاران [۱۲] تاثیر تغییر دبی و هندسه (شعاع خم) را بر توپوگرافی بستر و الگوی جریان در کانال‌های پیچانرودی مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش دبی به میزان دو برابر، چاله‌ی فرسایشی توسعه‌ای بیشتر می‌یابد و عمق آن نیز بیشتر می‌شود همچنین با افزایش شعاع تا ۶۰ درصد، چاله‌ی فرسایشی به پایین دست منتقل می‌شود. آنها در ادامه به مطالعه‌ی پیچانرود نامنظم به همراه تحلیل الگوی سرعت و محل شکل‌گیری چاله‌ی فرسایشی پرداخته و نشان دادند که چاله‌ی فرسایشی پس از راس قوس شکل می‌گیرد. ادگارد و برگز [۹] با انجام آزمایش بر روی کانال ۱۸۰ درجه با مقطع دوزنقه‌ای شکل به بررسی تغییرات بستر و اندرکنش آن با میدان سرعت پرداختند و علت نوسانی بودن بستر واقع در منطقه‌ی توسعه یافته (نیمه دوم قوس) را ناشی از الگوی نوسانی بردار عرضی سرعت در امتداد طولی کانال یا همان جریان حلزونی شکل معرفی کردند. برگز [۳] با مطالعه‌ی آزمایشگاهی یک کانال قوسی ۱۸۰ درجه با مقطع دوزنقه‌ای و بستر متحرک، به بررسی الگوی جریان و تغییرات توپوگرافی بستر پرداخت و به این نتیجه رسید که در نیمه‌ی نخست قوس چاله‌ی آبشستگی عمیق‌تری در محدوده‌ی مقاطع ۳۰ تا ۸۰ درجه و در نیمه‌ی دوم قوس با عمق کمتری در محدوده‌ی مقاطع ۱۶۰ تا ۱۷۸ درجه اتفاق می‌افتد. داسیلوا [۶] محل‌های فرسایش و رسوب گذاری در رودخانه‌های پیچانرودی را برای دو انحنای تند و ملایم ارائه کرد. داسیلوا و یالین [۷] الگوی جریان در مماندرهای سینوسی با جریان آشفته، پایدار و زبر را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ی این مطالعات نشان می‌دهد محل فرسایش و رسوبگذاری در پیچانرودها متفاوت بوده و به زاویه‌ی انحنای قوس بستگی دارد. بلانگرت و گراف [۴] با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک فلوم قوسی ۱۲۰ درجه با بستر متحرک محل بیش‌ترین فرسایش بستر در امتداد قوس و همچنین الگوی جریان ثانویه تشکیل شده در رأس قوس را مورد بررسی قرار دادند. جریان ثانویه تشکیل شده در مقطع عرضی قوس شامل دو نوع جریان چرخشی بوده، جریان چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت و به سوی قوس داخلی است (سلول ناحیه مرکزی) و سلول چرخشی که سلول کناره‌ی خارجی نامیده شده و جهتی خلاف جهت عقربه‌های ساعت دارد، در کناره‌ی خارجی قوس و نزدیک سطح آب تشکیل می‌گردد. این پژوهشگران عامل ایجاد دو مین سلول ثانویه در نواحی خارجی قوس را ناهمگنی تنش‌های قائم رینولدز داخل مقطع بیان کرده و دو مین سلول ثانویه‌ی ایجاد شده در نواحی خارجی قوس را عاملی برای جلوگیری از فرسایش دیواره‌ی خارجی قوس عنوان کرده‌اند. صالحی نیشابوری و اقبال‌زاده [۲] اثر جریان را بر توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده از پژوهش‌های آنان نشان داد که محل بیش‌ترین فرسایش از زاویه‌ی

مانومتري که بالادست سرریز مثلی و به فاصله ی استاندارد قرار گرفته بود، استفاده شد.

### آنالیز آبعادی

با توجه به فیزیک مسئله ی مورد پژوهش، پارامترهای مهم و دخیل در بررسی این پدیده به صورت زیر می باشند:

$$f(\underbrace{\rho, \nu, \rho_s, \sigma, d_{50}}_1, \underbrace{h_a, u_*}, \underbrace{V, R_c, B, \theta_b, Z_f, e_{max}}_5) = 0 \quad (1)$$

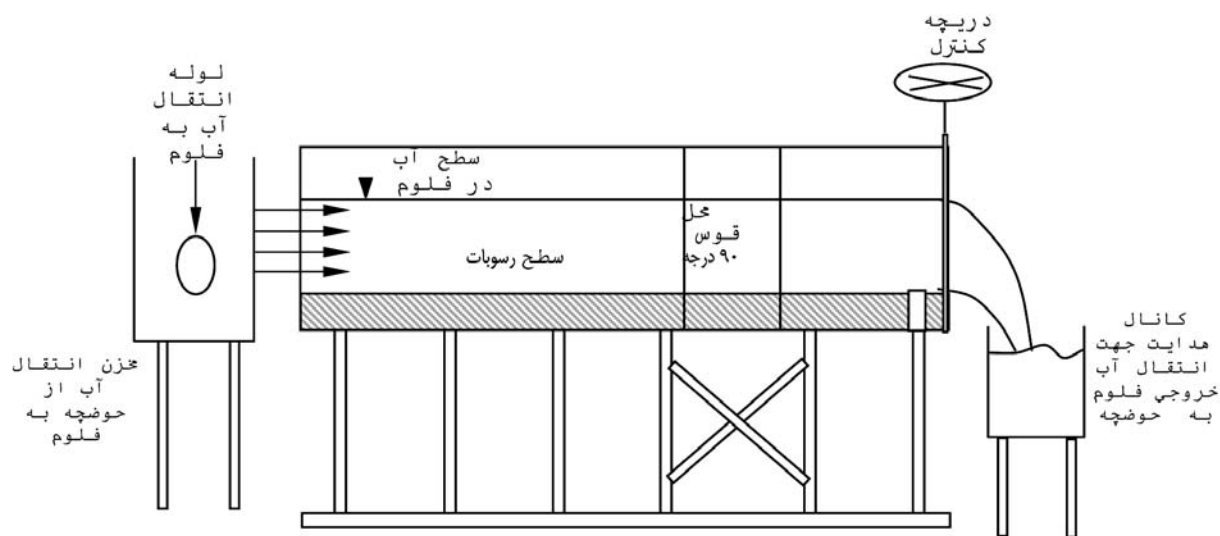
در رابطه ی (۱) بخش نخست مربوط به پارامترها و ویژگی های سیال، بخش دوم مربوط به پارامترها و ویژگی های رسوب، بخش سوم مربوط به پارامترها و ویژگی های جریان، بخش چهارم مربوط به پارامترها و ویژگی های قوس و بخش پنجم مربوط به پارامترها و ویژگی های تیغه افقی است که در این رابطه  $\rho$ ، دانسیته جریان،  $\nu$ ، لزجت جریان،  $\rho_s$ ، دانسیته رسوب (ویژگی های رسوبی)،  $\sigma$ ، انحراف استاندارد هندسی ذرات،  $d_{50}$ ، اندازه ی ذره ای از رسوبات که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک تر است،  $h_a$ ، عمق معادل جریان یکنواخت مستقیم که در یک آبراهه ی مستطیل شکل مستقیم با شیب انرژی  $S$ ، عرض  $B$ ، اندازه ی ذرات بستر  $d_{50}$  و  $\sigma$  انحراف معیار ذرات و دبی  $Q$  مشابه قوس بدست می آید،  $U^*$  سرعت برشی که در حقیقت مقدار  $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$  و یا  $\sqrt{g \cdot h_a \cdot S}$  می باشد،  $V$  سرعت جریان عبوری بالادست قوس،  $R_c$  شعاع انحنای قوس مرکزی،  $B$  عرض فلوم،  $\theta_b$  زاویه ی قوس،  $Z_f$  رقوم قرارگیری تیغه ی افقی و  $e_{max}$  بیشینه ی عمق آبشستگی است. بر اساس پارامترهای بالا روابط بدون بعد زیر با استفاده از تئوری باکینگهام به دست آمد.

$$f\left(\frac{u_* \cdot d_{50}}{\nu}, \frac{v}{\sqrt{g \cdot h_a}}, \theta_b, \frac{R_c}{B}, \frac{Z_f}{h_a}, \frac{d_{50}}{h_a}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{e_{max}}{h_a}\right) = 1 \quad (2)$$

هیدرولیک دانشکده ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران ساخته شد. ساخت فلوم با دیواره های پلکسی گلاس و اسکلت فلزی انجام شد. همان گونه که در شکل (۲) ملاحظه می شود، جهت تامین جریان یکنواخت، مخزنی در ابتدای فلوم تعبیه شده و برای جلوگیری از انتقال موج سطحی مخزن به فلوم از یک سری صفحات مشبک در ابتدای فلوم استفاده گردید. جهت موازی نمودن خطوط جریان در ابتدای قوس، طول فلوم در بالادست تا حد امکان، بلند طراحی شد (۴ متر).

زاویه ی قوس ۹۰ درجه و شعاع انحنای محور مرکزی ۸۰ سانتی متر است. ارتفاع فلوم ۷۰ سانتی متر و ارتفاع رسوب در کف فلوم ۳۶ سانتی متر می باشد که از مصالح دانه بندی شده از جنس طبیعی به اندازه ی متوسط ( $d_{50}$ ) برابر ۱/۶۲ میلی متر با ضریب یکنواختی ۱/۳ استفاده شد. طول پایاب فلوم ۲ متر است که در انتهای آن یک تنظیم کننده ی سطح (دریچه ی کشویی) نصب شده است. جهت سنجش دبی یک سرریز مثلی لبه ی تیز با زاویه ی راس ۹۰ درجه در مخزن انتهایی فلوم نصب شد. برداشت پروفیل سه بعدی بستر در انتهای هر آزمایش (پس از به تعادل رسیدن جریان و رسوب)، به وسیله ی دستگاه Bed profiler با دقت ۱ میلی متر طولی، ۱ میلی متر عرضی، ۰/۴ میلی متر عمقی انجام شد. جهت جابه جایی دستگاه در امتداد مسیر فلوم، با استفاده از لوله های بدون درز، دو ریل موازی در بالای فلوم نصب و دستگاه بر روی آنها مستقر گردید. شکل (۲) موقعیت دستگاه را نشان می دهد.

در تمامی آزمایش ها جهت جلوگیری از آبشستگی در زمان شروع آزمایش ابتدا دریچه ی انتهایی کاملاً بسته می شد و با دبی بسیار کمی عمق آب در فلوم افزایش می یافت و عمق مورد نیاز جریان (۲۰ سانتی متر) با باز کردن دریچه ی انتهایی تنظیم می گردید. برای تعیین دبی از سرریز مثلی و جهت تعیین ارتفاع آب عبوری از سرریز، از



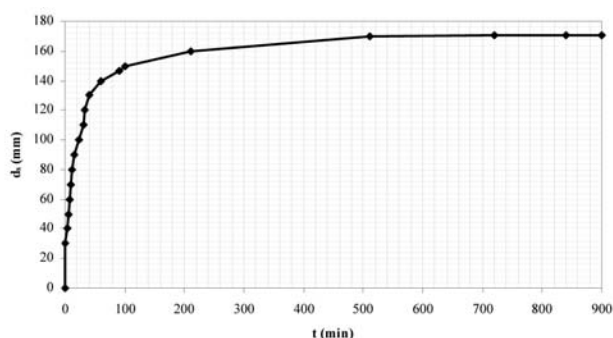
شکل ۲ - مقطع و پلان شماتیک فلوم آزمایشگاهی و قوس ۹۰ درجه

زمان تعادل نسبی ۱۴ ساعته در زاویه‌های ۸۰ تا ۹۰ درجه‌ی دیواره‌ی خارجی قوس که بیش‌ترین فرسایش در آنجا رخ داده است، مشاهده می‌گردد. در این شکل محور عمودی عمق فرسایش بر حسب میلی‌متر و محور افقی زمان بر حسب دقیقه می‌باشد.

جدول ۱- تعیین دبی بحرانی جهت ایجاد بیشینه‌ی پتانسیل قابل فرسایش

شرایط جریان ورودی	دبی Lit/S	
	میانگین سرعت ورودی	Fr
۰/۲۲۴۶	۰/۳۱۴۵	۲۵
۰/۲۶۷۹	۰/۳۷۵	۳۰
۰/۳۱۲۵	۰/۴۳۷۵	۳۵
۰/۳۵۷۱	۰/۵	۴۰
۰/۴۰۱۸	۰/۵۶۲۵	۴۵

شکل ۳- زمان تعادل نسبی برای زاویه‌های ۸۰-۹۰ درجه دیواره‌ی خارجی قوس



بر اساس شکل (۳) میزان فرسایش در زمان تعادل نسبی، بیشینه و برابر ۱۷۱ میلی‌متر که در زمان ۹۰ دقیقه برابر ۱۴۴ میلی‌متر است، این امر نشانگر آن است که ۸۴٪ فرسایش در طی ۹۰ دقیقه‌ی ابتدای آزمایش می‌باشد، بنابراین آزمایش‌ها برای زمان ۹۰ دقیقه برنامه‌ریزی شد. جدول (۱) حالت‌های گوناگون مورد آزمایش جهت تعیین دبی بیشینه به لحاظ ایجاد بیشینه‌ی پتانسیل قابل فرسایش با توجه به عمق اولیه رسوب را نمایش می‌دهد.

عمق آب در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، تا پدیده‌ی آبشستگی نسبت به تغییرات عمق کارگذاری آن بررسی شود. با توجه به هدف این پژوهش متغیرها شامل عمق کارگذاری صفحه‌ی افقی در صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد، بیشینه‌ی عمق آبشستگی در زمان تعادل به ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد.

زاویه‌ی قرارگیری صفحه‌ی افقی نسبت به دیواره‌ی فلوم آزمایشگاهی ۹۰ درجه و همچنین طول صفحه‌ی افقی از ابتدای

در رابطه‌ی بالا پارامتر نخست عدد رینولدز بوده که در تمامی آزمایش‌ها مقدار آن در محدوده‌ی جریان متلاطم (بستر زیر) می‌باشد، پارامتر دوم عدد فرود جریان بوده که در تمامی آزمایش‌ها بدون تیغه مقدار آن ثابت نگه داشته شد، پارامتر سوم زاویه‌ی قوس، پارامتر چهارم نسبت شعاع مرکزی قوس به عرض فلوم، پارامتر پنجم عمق کارگذاری تیغه نسبت به ارتفاع آب در فلوم، پارامتر ششم نسبت میانگین اندازه‌ی ذرات به عمق آب در فلوم، پارامتر هفتم نسبت جرم حجمی ذرات به جرم حجمی آب و پارامتر هشتم نسبت بیشینه‌ی عمق آبشستگی به ارتفاع آب در فلوم می‌باشد. در رابطه‌ی بالا با ثابت در نظر گرفتن شرایط هیدرولیکی ثابت در آزمایش‌های گوناگون عدد فرود ثابت در نظر گرفته شد و همچنین پارامترهای  $\frac{R_c}{B}=2$ ،  $\frac{R_c}{h_a}=2$  و  $\frac{d_{50}}{h_a}=0.0081$  ثابت بوده و در رابطه‌ی نهایی بدون بعد ارائه نشده‌اند، ولی بررسی تاثیر  $\frac{Z_f}{h_a}$  در مقابل  $\frac{e_{max}}{h_a}$  برای تمام آزمایش‌ها با تیغه و بدون تیغه‌ی افقی در بخش بحث و نتایج آمده است، بنابراین رابطه‌ی نهایی بدون بعد با در نظر گرفتن عدد فرود ثابت برای تمامی آزمایش‌ها به صورت زیر تغییر یافت.

$$\frac{e_{max}}{h_a} = f(\theta_b, \frac{Z_f}{h_a}) \quad (3)$$

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا آزمایش‌های اولیه جهت یافتن آستانه حرکت در فلوم دارای قوس ۹۰ درجه با عرض یکنواخت ورودی و خروجی ۴۰ سانتی‌متر انجام گرفت، به گونه‌ای که دبی ۲۵/۱۶ لیتر بر ثانیه و عمق ثابت جریان ۲۰ سانتی‌متر آستانه‌ی حرکت ذرات،  $\frac{V_c}{V}=0.95$  که در آن VC و V به ترتیب سرعت جریان در آستانه‌ی حرکت و میانگین سرعت جریان می‌باشند، برآورد شد. پس از انجام آزمایش‌های مقدماتی و مقایسه‌ی نتایج، مکان وقوع بیشینه‌ی عمق آبشستگی در دیواره‌ی قوس خارجی در زوایای ۸۰ تا ۹۰ درجه مشاهده شد. جهت بررسی میزان آبشستگی و همچنین بررسی الگوی جریان در محل دیواره‌ی قوس ۹۰ درجه آزمایش‌ها برای دبی‌های ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق ثابت جریان ۲۰ سانتی‌متر، در فلوم آزمایشگاهی (بدون تیغه‌ی افقی) برنامه‌ریزی و انجام شد. توضیح این‌که به منظور جلوگیری از حرکت مصالح رسوبی از مسیر مستقیم بالا دست، رسوبات سطحی این مسیر با چسب اسپری تثبیت شدند و یا به بیان دیگر در طول آزمایش‌ها هیچ انتقال رسوبی از بالا دست مشاهده نشد. این بدان معنی است که هرچند دبی جریان بیش از شرایط آستانه حرکت بوده است، ولی می‌توان گفت که شرایط آب زلال در همه‌ی آزمایش‌ها حاکم بوده است. جهت تعیین زمان نسبی به تعادل رسیدن چاله‌ی فرسایشی آزمایش طولانی با دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه (بحرانی‌ترین حالت) انجام شد، در طول این آزمایش ۱۴ ساعته، عمق آبشستگی در دیواره‌ی قوس خارجی و زوایای گوناگون قوس به وسیله‌ی Point Gage اندازه‌گیری و یادداشت برداری شد که در شکل (۳) نتایج آزمایش

اندازه‌گیری پروفیل بستر به گونه‌ای عمل گردید، که در مسیر مستقیم ورودی، برداشت توپوگرافی بستر از فاصله ۸۰ سانتی متر قبل از زاویه صفر درجه قوس، در مسیر قوس ۹۰ درجه از ابتدای مسیر قوس (زاویه صفر درجه) تا انتهای مسیر قوس (زاویه ۹۰ درجه)، در مقاطع عرضی (عمود بر دیواره‌ها) و در طول (موازی دیواره‌ها) به فاصله‌ی هر ۲/۵ درجه و در مسیر مستقیم خروجی از انتهای مسیر قوس (زاویه ۹۰ درجه)، برداشت توپوگرافی بستر، تا انتهای فلوم (پیش از دریچه‌ی کشویی)، به فاصله‌ی هر ۱۰ سانتی متر انجام گردید.

### نتایج و بحث حالت بدون تیغه

همان گونه که در بخش‌های گذشته نیز توضیح داده، این پژوهش در راستای بررسی اثر تیغه‌ی افقی در کاهش فرسایش بستر در قوس خارجی برنامه‌ریزی شد و پارامترهای بدون بعد مهم و موثر این پدیده استخراج گردید. نخستین سری آزمایش‌ها که بدون حضور تیغه‌ی افقی انجام گرفت به عنوان آزمایش‌های شاهد، در نظر گرفته شد و هدف از این آزمایش‌ها برآورد شرایط فرسایش بود. این آزمایش‌ها با ۴ دبی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه با توجه به ایجاد بستر کاملاً متحرک به عنوان دبی پایه برای آزمایش‌های با تیغه در نظر گرفته شد. مجموعه شکل (۶) نتایج آزمایش‌های شاهد را در دبی‌های یاد شده در قوس‌های داخلی و خارجی از زاویه‌ی صفر تا ۹۰ درجه را نشان می‌دهد.

همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود رسوب گذاری در دیواره‌ی داخلی در طول قوس افزایش می‌یابد که این موضوع به دلیل افزایش قدرت جریان ثانویه در انتهای قوس بوده و باعث انتقال مصالح رسوبی از قوس خارجی به سمت قوس داخلی می‌گردد. از شکل‌ها و نمودارهای (۶) استنباط می‌شود که میزان آبشستگی در دیواره خارجی قوس بسیار شدید و رسوبگذاری و فرسایش در دیواره داخلی نیز به همین نحو از مقطع زاویه‌ی صفر درجه تا مقطع زاویه‌ی ۹۰ درجه به گونه‌ی غیر خطی در حال افزایش است. به طور کلی بیش‌ترین آبشستگی در نزدیک زاویه‌ی ۸۰ تا ۹۰ درجه‌ی دیواره‌ی خارجی رخ می‌دهد.

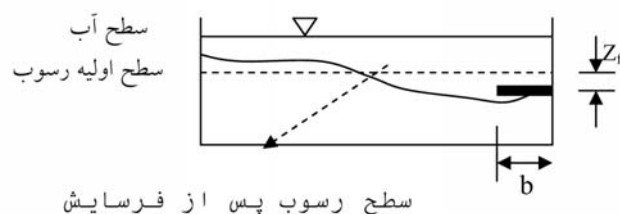
در این پژوهش با توجه به نتایج بدست آمده از فرسایش در حالت بدون تیغه که در نمودارهای بالا در محل قوس‌ها تغییرات پروفیل بستر ترسیم شد، به مقایسه‌ی برخی از فرمول‌های موجود جهت برآورد بیشینه‌ی عمق آبشستگی اقدام گردید، در این راستا از نتایج دهقانی و همکاران [۱]، ین و لی [۱۳] و هافمن [۸] که برای قوس

قوس ( $\theta_b = 0^\circ$ ) تا انتهای قوس ( $\theta_b = 90^\circ$ ) در نظر گرفته شد. با محاسباتی که براساس شکل (۱) بدست آمد، میزان بیش‌ترین فرسایش در زمان انجام آزمایش (۹۰ دقیقه) برابر ۱۴۴ میلی‌متر می‌باشد و بر همین اساس اعماق کارگذاری صفحه‌ی افقی در ۴ سطح کارگذاری نسبت به سطح رسوبات مطابق جدول (۲) محاسبه و برنامه‌ریزی شد.

مقادیر جدول (۲) سطح بالایی صفحه‌ی افقی را نسبت به سطح بستر رسوبات نشان می‌دهند، به گونه‌ای که برای مقدار صفر درصد سطح صفحه هم سطح با بستر رسوبات و برای مقدار ۴۰ درصد سطح صفحه ۵۶/۶ میلی‌متر پایین‌تر از سطح بستر رسوبات قرار داده شده است. شکل (۴) شمای کلی قرارگیری تیغه‌ی افقی را نمایش می‌دهد.



شکل ۴- شمای کلی قرارگیری تیغه افقی در قوس



شکل ۵- مقطع قرارگیری تیغه افقی در قوس خارجی

شکل (۴) نحوه‌ی قرارگیری تیغه‌ی افقی در قوس و شکل (۵) مقطع کارگذاری تیغه‌ی افقی را نمایش می‌دهد. برای بررسی اثر تیغه‌ی افقی به طور کلی تیغه در چهار عمق مورد آزمایش قرار گرفت و تاثیر آن بر کاهش فرسایش با برداشت توپوگرافی بستر با استفاده از دستگاه bed profiler مورد آزمون قرار گرفت. جهت

جدول ۲- موقعیت کارگذاری صفحه افقی بر حسب درصد بیشینه‌ی عمق آبشستگی

۸۶/۴	۵۶/۶	۲۸/۸	صفر	عمق کارگذاری نسبت به سطح رسوبات mm
۶۰	۴۰	۲۰	صفر	درصد عمق کارگذاری نسبت به بیشینه‌ی عمق فرسایش

۱۸۰ درجه فرمول‌های تجربی ارائه نموده‌اند، استفاده شد. در زیر فرمول‌های مورد استفاده آمده است:

$$\frac{e_{\max}}{h_a} = 1.07 - \text{Log}\left(\frac{r}{B} - 2\right) \text{ for } (2 < \frac{r}{B} < 22) \quad (۴)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e_{\max}}{h_a} = -a \tanh(10 \times (\frac{r}{R_c} - b)) \\ a = 1.0676 + \frac{145.376}{1 + \exp(-51.36169 \times (Fr - 0.503))} \\ b = -0.485Fr + 1.15 \end{array} \right. \quad (۵)$$

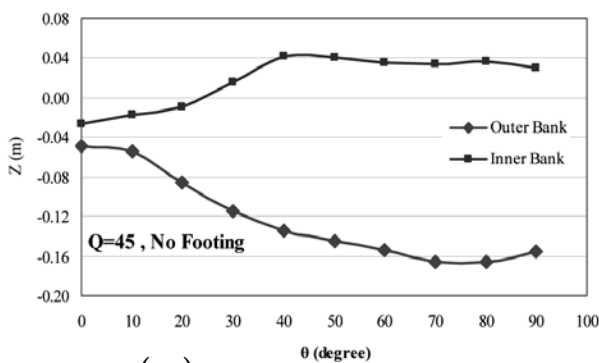
$$\frac{e_{\max}}{h_a} = -0.814 \tanh(10 \times (\frac{r}{R_c} - 0.16)) - 0.0135 \quad (۶)$$

در رابطه‌های بالا  $r$  شعاع محل بیش‌ترین آبستنگی بوده و سایر پارامترها در بخش‌های گذشته تعریف شده‌اند. در جدول (۳) مقایسه‌ی بین بیش‌ترین آبستنگی محاسباتی از فرمول‌های بالا و همچنین اندازه‌گیری شده در این پژوهش انجام شده است. در جدول زیر مشاهده می‌شود که مقایره اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسباتی از فرمول‌های بالا تطابق چندانی نداشته که مهم‌ترین دلیل آن منطبق بودن آن روابط برای قوس ۱۸۰ درجه بوده و این در حالی

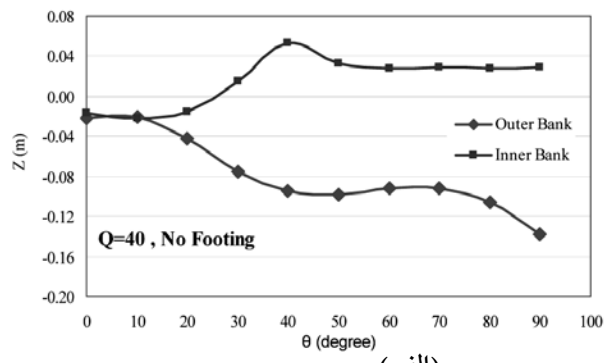
است که در این پژوهش قوس مورد مطالعه ۹۰ درجه است. از سوی دیگر در این مطالعه نسبت  $r/B$  تقریباً ثابت و در حدود ۲ است که قوس تندی بوده و نشانگر اختلاف بیش‌تر برای رابطه‌ی (۴) نسبت به سایر روابط می‌باشد. همچنین در این پژوهش میزان عمق آب بالادست همواره ثابت و معادل ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و تغییرات عدد فرود در حالت بدون تیغه با تغییرات دبی انجام و عمق آب همواره ثابت در نظر گرفته شد که خود می‌تواند عاملی برای عدم تطابق روابط ارائه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده باشد.

### حالت با تیغه

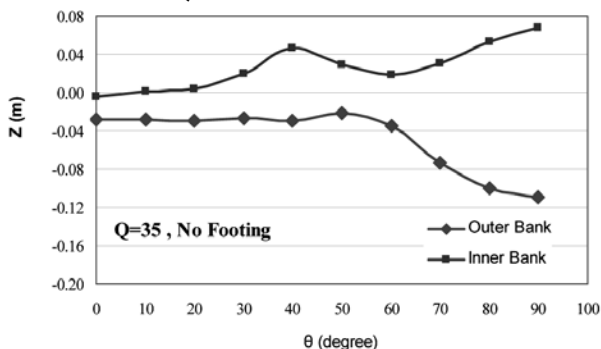
با توجه به آزمایش‌ها شاهد برای ایجاد بستر متحرک، دریچه‌ی انتهایی فلوم وظیفه تنظیم و کنترل دبی و سطح آب را دارا بود، لذا بر این اساس با باز کردن تدریجی دریچه‌ی انتهایی، دبی مورد نظر به میزان ۴۵ لیتر بر ثانیه برای آزمایش‌ها با تیغه‌ی افقی تنظیم می‌شد و سطح آب در تراز ۲۰ سانتی‌متر بالای سطح رسوب کنترل می‌گردید. تقریباً در تمامی آزمایش‌ها مشاهده گردید. نخستین بخش‌هایی که دانه‌ی رسوب شروع به حرکت می‌کند نزدیک به قوس خارجی بوده و در ساعت‌های اولیه‌ی آزمایش‌ها حرکت رسوبات از حدود زاویه‌ی ۱۵ تا ۲۰ درجه شروع و به قوس داخلی هدایت می‌شد. بدیهی است که هرچه قدرت جریان ثانویه در منطقه در حال توسعه بیش‌تر باشد، حرکت ذرات به سمت قوس داخلی زودتر انجام می‌گیرد. لازم به توضیح است که در آزمایش‌های بدون



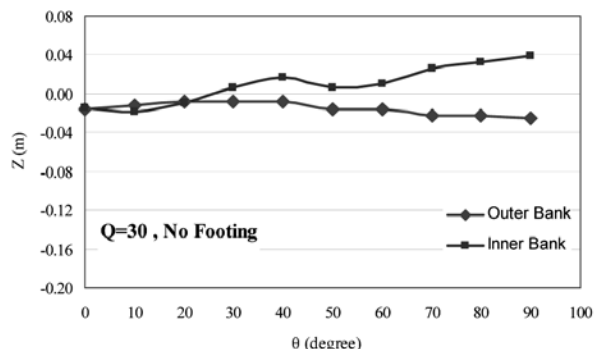
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

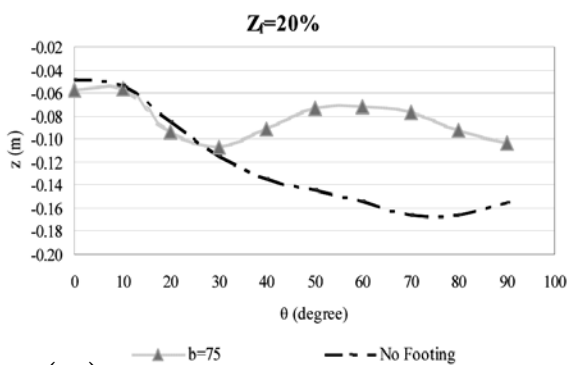
شکل ۶- نتایج آزمایش‌ها فرسایش بستر در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی در حالت بدون تیغه (الف) دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه (ب) دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه (ج) دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه (د) دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه

جدول ۳- مقادیر محاسباتی و اندازه گیری شده بیشینه ی عمق آبستنگی بدون تیغه ی افقی

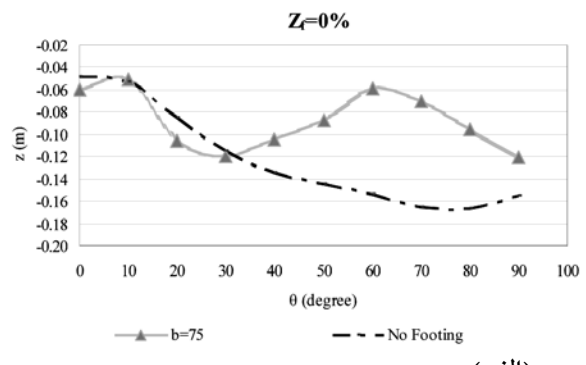
Q L/s	r/Rc	Fr	مقادیر emax محاسبه شده از رابطه ی (۴) m	مقادیر emax محاسبه شده از رابطه ی (۵) m	مقادیر emax محاسبه شده از رابطه (۶) m	مقادیر emax اندازه گیری شده m
۳۰/۰۰	۰/۹۶	۰/۲۷	-----	-۰/۱۱	-۰/۱۷	-۰/۰۳۵
۳۵/۰۰	۱/۰۳	۰/۳۱	-۰/۴۶	-۰/۰۶	-۰/۱۷	-۰/۰۶۵
۴۰/۰۰	۱/۱۷	۰/۳۶	-۰/۳۱	-۰/۲۲	-۰/۱۷	-۰/۱۳۵
۴۵/۰۰	۱/۲۴	۰/۴۰	-۰/۲۸	-۰/۳۷	-۰/۱۷	-۰/۱۷۱

میلیمتر یعنی برای  $\frac{b}{h_a}$  برابر با ۰/۳۷۵ در اعماق صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد، بیشینه ی عمق آبستنگی بررسی گردید. نتایج بدست آمده از تاثیر عمق تیغه ی افقی در تمامی آزمایش ها در شکل (۷) آمده است. در این شکل ها هر نمودار نمایانگر میزان فرسایش دیواره ی قوس خارجی در مجاورت تیغه ی افقی و فرسایش در حالت بدون حضور تیغه ی افقی است، از سوی دیگر شکل ها میزان فرسایش را برای عمق های گوناگون کارگذاری تیغه ی افقی نمایش می دهند.

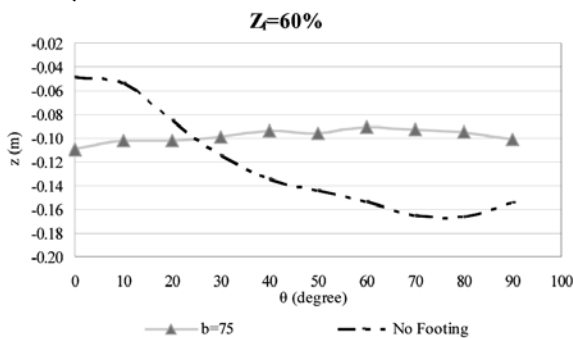
تیغه ی افقی پستی و بلندی های بستر در قوس داخلی کم تر و در قوس خارجی بیش تر بود، ولی با قرار دادن تیغه این حالت متعادل تر می شد. از سوی دیگر بیش ترین فرسایش به صورت میانگین در تمامی آزمایش های بدون تیغه در فاصله های ۶۵ تا ۸۵ درجه ی قوس خارجی روی داد و این در حالی بود که برای حالت با تیغه، بیش ترین فرسایش در زاویه های کمتر و بین ۲۰ تا ۴۵ درجه رخ می داد. آزمایش های بعدی مربوط به اثر تیغه ی افقی به عرض ۷۵



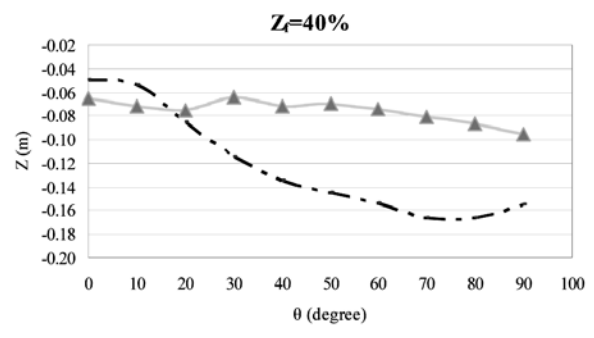
(ب)



(الف)

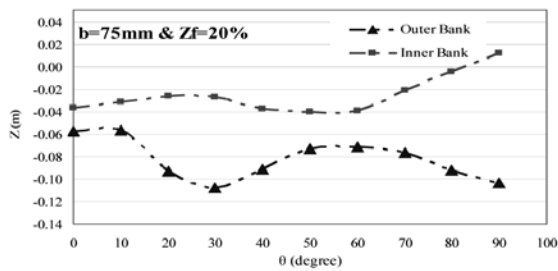


(د)

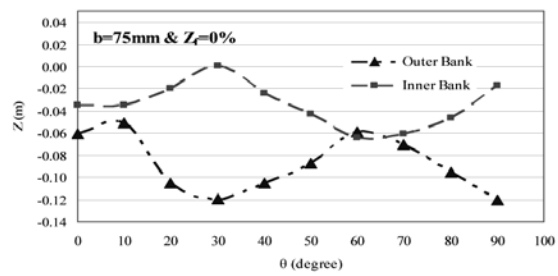


(ج)

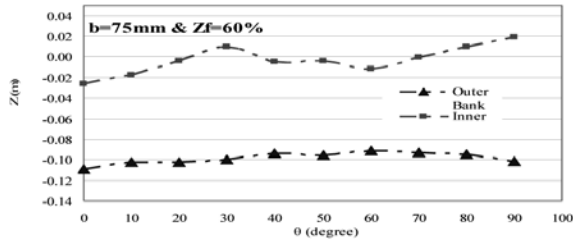
شکل ۷- میزان فرسایش در مجاورت دیواره ی قوس خارجی در حالت بدون تیغه و با تیغه ی افقی به عرض ۷۵ میلیمتر  
 (الف) با عمق کارگذاری ۰ درصد  
 (ب) با عمق کارگذاری ۲۰ درصد  
 (ج) با عمق کارگذاری ۴۰ درصد  
 (د) با عمق کارگذاری ۶۰ درصد



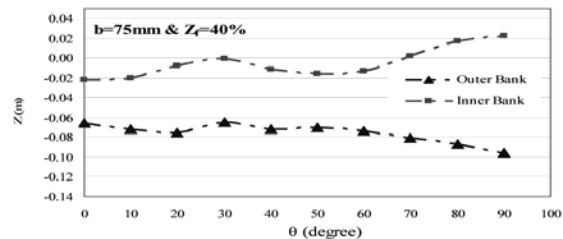
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸- فرسایش و رسوب گذاری بستر در مجاورت دیواره ی قوس خارجی و داخلی تیغه ی ۷۵ میلیمتری

دیواره ی قوس خارجی و داخلی در شکل (۸) ارائه شده است که محور عمودی سطح توپوگرافی بستر بر حسب میلی متر، محور افقی زوایای مقاطع عرضی قوس بر حسب درجه، خط چین بالایی، میزان فرسایش دیواره ی خارجی و خط چین پایینی، میزان فرسایش و رسوبگذاری دیواره ی داخلی را نشان می دهد. با مقایسه ی شکل (۶) و شکل (۸) می توان دریافت که تاثیر احداث تیغه ی افقی در یکنواخت نمودن توپوگرافی بستر و کاهش فرسایش معنی دار است. در این پژوهش جهت بررسی دقیق تر تاثیر تیغه ی افقی بر توپوگرافی بستر، داده های آزمایشگاهی برداشت شده با استفاده از نرم افزار surfer در حالت بدون تیغه و با تیغه، با عرض ۷۵ میلیمتر و عمق کارگذاری متفاوت به صورت خطوط تراز ترسیم شده اند که در شکل (۹) برای تیغه ای به عرض ۷۵ میلیمتر برای عمق های کارگذاری متفاوت ترسیم شده است.

همان طوری که در شکل (۹) مشاهده می شود در حالت بدون تیغه افقی بیشینه ی عمق آبستگي (emax) در کنار دیواره و چسبیده به آن

نتایج گوناگون به دست آمده از فرسایش در حالت بدون تیغه و با تیغه ی افقی که در شکل (۷) آمده، نشان می دهد که با افزایش عمق کارگذاری تیغه، تاثیر تیغه ی افقی در یکنواخت کردن توپوگرافی بیش تر است، ولی به طور کلی تاثیر تیغه ی افقی بر کاهش موضعی فرسایش کاملاً معنی دار است.

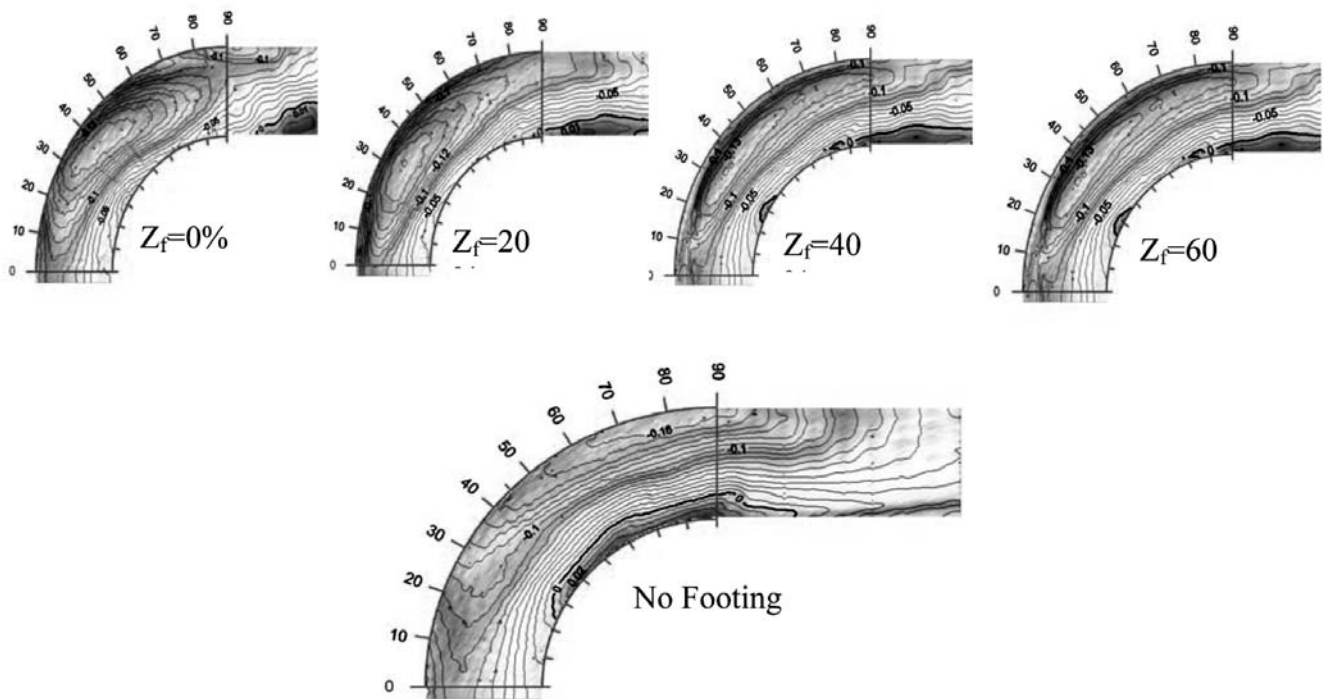
در جدول (۴) درصد های کاهش بیش ترین فرسایش در مجاورت دیواره ی قوس خارجی نسبت به حالت بدون تیغه آمده است.

با توجه به نتایج جدول (۴) در عمق کارگذاری صفر درصد (b/ha= 0.375) میزان کاهش فرسایش ۲۹/۸ درصد است. برای عمق کارگذاری ۴۰ درصد، میزان کاهش بیش ترین عمق فرسایش در مجاورت دیواره ی قوس خارجی ۴۴/۵ درصد نسبت به حالت بدون تیغه بوده که بیش ترین تاثیر بر کاهش فرسایش را در تمامی آزمایش ها نشان می دهد. از سوی دیگر تاثیر این تیغه سهم به سزایی بر یکنواخت کردن بستر دارد. نتایج بدست آمده از فرسایش برای تیغه ی افقی به عرض ۷۵ میلیمتر در اعماق گوناگون در مجاورت

جدول ۴- بیشینه ی عمق فرسایش در مجاورت دیواره قوس خارجی نسبت به عمق های کارگذاری

عمق کارگذاری	No footing	Footing width=75mm	
	بیشینه ی عمق فرسایش در مجاورت دیواره (سانتیمتر)	بیشینه ی عمق فرسایش در مجاورت دیواره (سانتیمتر)	درصد کاهش فرسایش نسبت به بدون تیغه
Zf=0%	17/1	۱۲	۲۹/۸
Zf=20%		۱۰/۶	۳۸
Zf=40%		۹/۵	۴۴/۵
Zf=60%		۱۰/۸	۳۶/۸





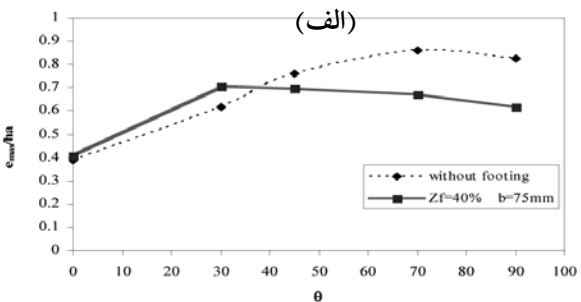
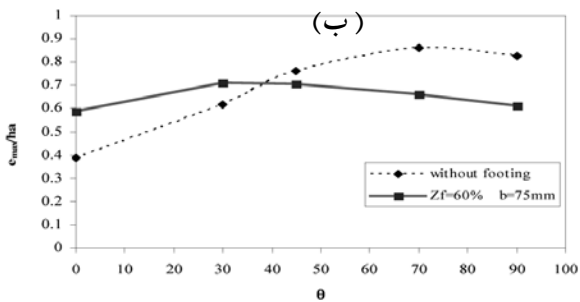
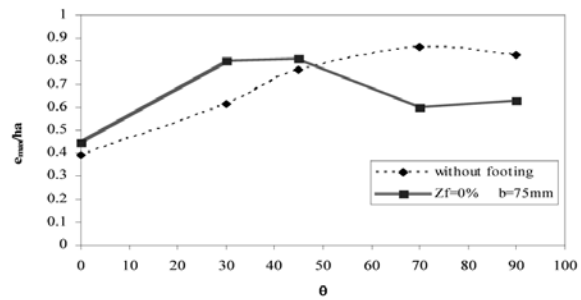
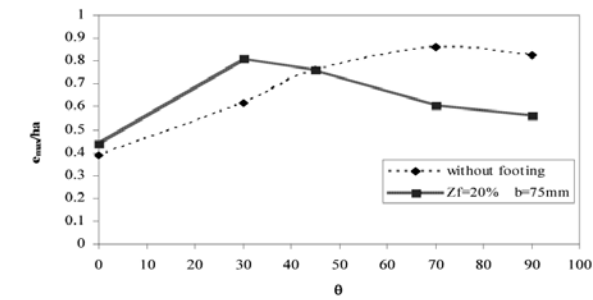
شکل ۹- توپوگرافی بستر در تیغه افقی ۷۵ میلی متری در اعماق مختلف کارگذاری و در حالت بدون تیغه

براساس نتایج جدول (۵) در بیش تر مقاطع عرضی با احداث تیغه افقی، بیشینه ی عمق آبشستگی کاهش یافته است و این در حالی است که برای مقطع عرضی ورودی به قوس (زاویه ی صفر درجه) تا زاویه ی حدود ۴۰ درجه بیشینه ی عمق آبشستگی افزایش نشان داده است که دلیل آن را می توان در بوجود آمدن جریان پیچشی عمودی در نیمه ی نخست قوس به علت احداث تیغه ی افقی دانست. در شکل (۱۰) نتایج بدست آمده از پارامتر بدون بعد  $e_{max}/ha$  در مقابل زاویه ی مرکزی قوس برای حالت بدون تیغه و با تیغه ی افقی با اعماق کارگذاری متفاوت آمده است.

رخ داده است و این در حالی است که با احداث تیغه افقی بیشینه ی عمق آبشستگی از کناره فاصله گرفته و به وسط مقطع متمایل می شود، که دلیل این موضوع احداث دیواره صلب به عنوان تیغه افقی بوده که به لحاظ فرسایش، دیواره را محافظت می نماید. با توجه به نتایج بدست آمده در عمق کارگذاری ۴۰ درصد بیشینه ی عمق آبشستگی پس از رسیدن به زمان تعادل بستر کمترین میزان و یکنواختی بستر بیشترین میزان بوده است. در جدول (۵) نتایج حاصل از بیشینه ی عمق آبشستگی در آزمایش ها مختلف آمده است که با استفاده از نتایج این جدول پارامترهای بدون بعد موثر در این پدیده محاسبه شده است.

جدول ۵- بیشینه ی عمق آبشستگی در مقاطع عرضی مختلف قوس در حالت بدون تیغه و با تیغه افقی

without footing		$Z_f=0\%$ $b=75\text{mm}$		$Z_f=20\%$ $b=75\text{mm}$		$Z_f=40\%$ $b=75\text{mm}$		$Z_f=60\%$ $b=75\text{mm}$		
$\theta$	$e_{max}$ (mm)	$e_{max}/ha$	$e_{max}$ (mm)	$e_{max}/ha$	$e_{max}$ (mm)	$e_{max}/ha$	$e_{max}$ (mm)	$e_{max}/ha$	$e_{max}$ (mm)	$e_{max}/ha$
۰	۰/۰۷۸	۰/۳۹	۰/۰۸۹	۰/۴۴۵	۰/۰۸۸	۰/۴۴	۰/۰۸۲	۰/۴۱	۰/۱۱۷	۰/۵۸۵
۳۰	۰/۱۲۳	۰/۶۱۵	۰/۱۶	۰/۸	۰/۱۶۲	۰/۸۱	۰/۱۴۱	۰/۷۰۵	۰/۱۴۲	۰/۷۱
۴۵	۰/۱۵۲	۰/۷۶	۰/۱۶۲	۰/۸۱	۰/۱۵۲	۰/۷۶	۰/۱۳۹	۰/۶۹۵	۰/۱۴۱	۰/۶۶
۷۰	۰/۱۷۲	۰/۸۶	۰/۱۲	۰/۶	۰/۱۲۱	۰/۶۰۵	۰/۱۳۴	۰/۶۷	۰/۱۳۲	۰/۶۶
۹۰	۰/۱۶۵	۰/۸۲۵	۰/۱۲۶	۰/۶۳	۰/۱۱۲	۰/۵۶	۰/۱۲۳	۰/۶۱۵	۰/۱۲۲	۰/۶۱



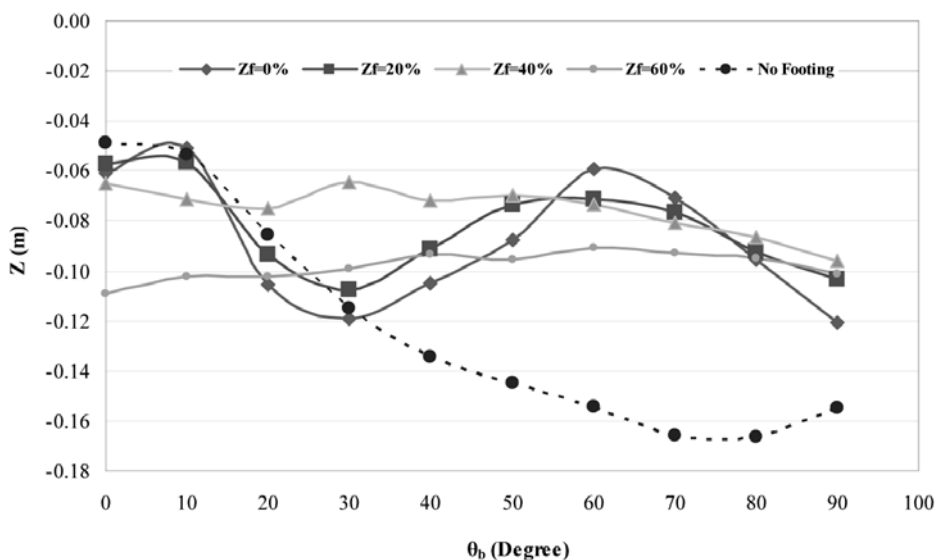
(د)

(ج)

شکل ۱۰- تغییرات پارامتر بیشینه‌ی عمق آبشستگی در مقاطع گوناگون عرضی قوس برای حالت بدون تیغه و با تیغه‌ی افقی  
 (الف) با عمق کارگذاری ۰ درصد  
 (ب) با عمق کارگذاری ۲۰ درصد  
 (ج) با عمق کارگذاری ۴۰ درصد  
 (د) با عمق کارگذاری ۶۰ درصد

حدود ۴۰ درجه، نسبت به حالت بدون تیغه کمی بیش‌تر بوده و در زاویه‌های بزرگ‌تر به میزان شایان توجهی بیشینه‌ی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان به ایجاد جریان‌های پیچشی در اثر احداث تیغه در بازه‌های ابتدایی قوس دانست، لازم به توضیح است که این موضوع برای عمق کارگذاری ۴۰ درصد نسبت به سایر اعماق کارگذاری بسیار کمتر بوده که گواهی برای کارکرد بهتر این عمق کارگذاری است. شکل (۱۱) تغییرات طولی آبشستگی را در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی برای تمامی اعماق کارگذاری

در شکل (۱۰) در تمامی نمودارها می‌توان بیشینه‌ی عمق آبشستگی حالت بدون تیغه و با تیغه‌ی افقی را مقایسه نمود. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با قرار دادن تیغه‌ی افقی چاله‌ی فرسایشی به نیمه‌ی نخست قوس منتقل می‌شود و این در حالی است که در حالت بدون تیغه بیش‌ترین چاله‌ی فرسایشی در نیمه دوم قوس می‌باشد. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی نمودارها می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با احداث تیغه‌ی افقی، بیشینه‌ی عمق آبشستگی در زاویه‌ی کم‌تر از



شکل ۱۱- فرسایش در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی برای تمامی اعماق کارگذاری تیغه و حالت بدون تیغه

و همچنین حالت بدون تیغه نمایش می دهد.

همان گونه که از شکل (۱۱) مشخص است، انتقال چاله‌ی فرسایشی در حالت تیغه‌ی افقی نسبت به حالت بدون تیغه، در مجاورت قوس خارجی به ابتدای قوس تا زاویه‌ی حدود ۳۰ درجه رخ داده است و برای زوایای بیش تر از آن تاثیر کاهش فرسایش (در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی) با قرارگیری تیغه‌ی افقی بسیار چشمگیر است.

تمامی روابط بدون بعد حاکم بر پدیده‌ی اثر تیغه‌ی افقی در کاهش فرسایش بستر در مقاطع عرضی گوناگون (زاویه‌های مختلف) محاسبه شده که به دلیل زیاد بودن محاسبه‌ها و جدول‌ها، نمونه‌ای از آنها برای زاویه‌ی ۷۰ درجه در جدول (۶) آورده شده است.

در جدول (۶)، ستون نخست مربوط به برنامه‌ی آزمایش‌ها، ستون دوم نسبت عمق کارگذاری به ارتفاع آب بالادست، ستون سوم عمق کارگذاری تیغه‌ی افقی به بیشینه‌ی عمق آبشستگی در حالت بدون تیغه‌ی افقی، ستون چهارم نسبت عرض تیغه‌ی افقی به ارتفاع آب بالادست، ستون پنجم درصد کاهش بیشینه‌ی عمق آبشستگی تیغه‌ی افقی در مقایسه با حالت بدون تیغه برای زاویه‌ی ۷۰ درجه و ستون ششم نسبت بیشینه‌ی عمق آبشستگی به ارتفاع آب بالادست جریان است.

روکا و همکاران [۱۰] در پژوهش‌های مشابهی در یک فلوم با قوس ۱۸۶ درجه، اثر تیغه‌ی افقی را بر تغییرات سطح بستر بررسی کردند. نتایج بدست آمده از پژوهش آنان نشان می دهد که در اثر به کارگیری تیغه‌ی افقی محل چاله‌ی فرسایشی به سمت ابتدای قوس جابه‌جایی پیدا می کند. با این که عدد فرود در آزمایش‌ها روکا و این پژوهش یکسان و در حدود ۰/۴ بوده، بیش‌ترین کاهش عمق فرسایش در آزمایش‌های آنان در حدود ۴۰ درصد گزارش شده که در مقایسه با این پژوهش (۴۴/۵ درصد) مقدار کوچک‌تری است که البته به دلیل زاویه‌ی بیش تر قوس در آزمایش‌های روکا و همکاران (۱۸۶ درجه) بوده است. آنها همچنین گزارش داده‌اند که به کارگیری تیغه‌ی افقی، به ویژه با عمق بهینه، در یکنواخت نمودن سطح بستر تاثیری به سزا دارد، بنابراین به کارگیری تیغه‌ی افقی در قوس ۹۰ درجه (این پژوهش) و قوس ۱۸۶ درجه دارای اثرات مشابهی است.

## نتیجه‌گیری

- استفاده از تیغه‌ی افقی مشخصا در کاهش عمق فرسایش و یکنواخت نمودن توپوگرافی بستر تاثیری معنی دار دارد.

- نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که استفاده از تیغه‌ی افقی در بالاترین و پایین‌ترین عمق کارگذاری لزوما در کاهش عمق فرسایش بیش‌ترین تاثیر را نداشته و این در حالی است که به طور کلی استفاده از تیغه‌ی افقی نسبت به حالت بدون تیغه به میزان شایان توجهی فرسایش را در نیمه‌ی دوم قوس و در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی کاهش می دهد.

- نتایج گوناگون بدست آمده از فرسایش، در حالت بدون تیغه و با تیغه‌ی افقی نشان می دهد که برای عمق کارگذاری صفر درصد، تاثیر تیغه‌ی افقی در یکنواخت کردن توپوگرافی بستر ناچیز است، ولی به طور کلی تاثیر تیغه‌ی افقی بر کاهش موضعی فرسایش کاملا معنی دار می باشد.

- برای تیغه‌ی افقی با پارامتر  $b/ha$  برابر با ۰/۳۷۵ بیش‌ترین عمق فرسایش در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی برای عمق‌های کارگذاری مختلف بین ۳۰ تا ۴۴ درصد، نسبت به حالت بدون تیغه کاهش نشان داده است.

- در حالت بدون تیغه‌ی افقی بیشینه‌ی عمق آبشستگی ( $e_{max}$ ) در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی و در نیمه‌ی دوم قوس رخ داده است و این در حالی است که با احداث تیغه‌ی افقی بیشینه‌ی عمق آبشستگی از مجاورت دیواره فاصله گرفته و به وسط مقطع متمایل و همچنین به نیمه‌ی نخست قوس منتقل می شود. عمق کارگذاری ۴۰ درصد، کارایی بهینه را برای دو حالت در پی داشت: (۱) بیش‌ترین کاهش عمق آبشستگی بستر در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی نسبت به حالت بدون تیغه (۲) بیش‌ترین میزان یکنواختی توپوگرافی بستر.

- برای مقاطع عرضی ورودی به قوس (از زاویه‌ی صفر تا حدود ۴۰ درجه) با احداث تیغه‌ی افقی، بیشینه‌ی عمق آبشستگی افزایش می یابد که دلیل آن بوجود آمدن جریان پیش‌روی عمودی در بدو احداث تیغه است.

- بیش‌ترین کاهش عمق آبشستگی در کنار تیغه‌ی افقی و یا در مجاورت دیواره‌ی قوس خارجی با عمق کارگذاری ۴۰ درصد به

جدول ۶- محاسبه‌ی روابط بدون بعد موثر در تاثیر تیغه‌ی افقی بر کاهش فرسایش بستر در زاویه‌ی ۷۰ درجه

Type	Zf/ha	Zf/ $e_{max}(w)$	b/ha	1-( $e_{max}/e_{max}(w)$ ) %	$e_{max}/ha$
without footing	---	--	----	---	۰/۸۶
Zf=0% b=75mm	۰	۰	۰/۳۷۵	۲۷/۲۷	۰/۶
Zf=20% b=75mm	۰/۱۴۴	۰/۱۷۴	۰/۳۷۵	۲۶/۶۷	۰/۶۰۵
Zf=40% 75mm	۰/۲۸۳	۰/۳۴۳	۰/۳۷۵	۱۸/۷۹	۰/۶۷
Zf=60% b=75mm	۰/۴۳۲	۰/۵۲۴	۰/۳۷۵	۲۰/۰۰	۰/۶۶

Scouring, Hydraulic Structure Design Manual, No.2, IAHR, Balkema, 143pp.

6- Dasilva, A.M. 1995. Turbulent flow in sin-generated meandering channels. Ph.D. thesis. Dept of Civil Engineering., Queens's university.kingsatone Canada.

7- Dasilva, A.M. and Yaline, M.S. 1997. Laboratory measurement in sin-generated meandering channels. Journal of hydraulic engineering, vol.125, no 2, pp.13491.

8- Hoffmans, G.J. 1997. Scour manual. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

9- Odgaard, A.J. and Berges, M.A. 1987. Stream bank protection by submerged vanes. J.Hydraul, eng., 113(4), 520-536.

10- Roca, M., Martin-Vide, J.P. and Blankaert, K. 2007. Reduction of bend score by an outer bank footing: footing design and bed topography. J. Hydraulic Engineering. February 2007, Volume 133, Number 2.

11- Singh, C.P., Setia, B. and Verma, D.V.S. 2001. Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier. Proceedings of Theme D, 29th Congress on hydraulics of river, water works and machinery, Chinese hydraulic engineering Society, Beijing, China. September 16-21, 202-209.

12- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). 1994. Hydraulic design of flood control channels; engineer manual 1110-2-1601 Washington, D.C

13- Yen, C.L. and Lee, K.T. 1995. Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow. J. Hydraulic. Engrg. 121 (8), 589-599.

14- Zarrati, A.M., Gholami, H. and Mashahir, M.B. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular piers Journal of hydraulic research, IAHR, 42 (1): 97-103.

وقوع می‌پیوند. در این حالت صفحه‌ی افقی باعث کاهش ۴۴/۵ درصدی فرسایش دیواره‌ی خارجی (در مقایسه با عدم کارگذاری تیغه‌ی افقی) در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه می‌گردد.

- با توجه به نتایج به دست آمده اختلاف آبستگي بين ديواره‌ی خارجی و داخلی در عمق کارگذاری ۶۰ درصد نسبت به سایر عمق‌های کارگذاری بیشتر بوده به گونه‌ای که روند تغییرات توپوگرافی بستر به صورت پیوسته صورت گرفته است و این در حالی است که برای عمق کارگذاری صفر درصد این روند تغییرات به صورت افزایشی و کاهش‌ی در مقاطع با زاویه‌ی ۱۵ و ۶۵ درجه قوس می‌باشد.

- با کم کردن عمق کارگذاری، فرسایش در ابتدای قوس بیشتر شده و در انتهای قوس کم می‌شود، بنابراین سطح بستر دارای یکنواختی کمتری می‌گردد.

- با افزایش عمق نصب نسبت به عمق بهینه‌ی کارگذاری، هرچند سطح بستر یکنواخت می‌ماند، ولی عمق فرسایش از ابتدا تا انتهای قوس بیشتر می‌شود.

### تشکر و قدردانی

بخشی از هزینه‌های این طرح از سوی دفتر تحقیقات و استانداردهای شبکه‌های آبیاری و زهکشی سازمان آب و برق خوزستان، قرارداد شماره‌ی ۱۳-۰۲-۰۱-۸۷، تامین شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

۱- دهقانی، ا.، قدسیان، م.، صالحی نیشابوری، س.ع.ا. و شفیعی فر، م. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات بستر کانال‌های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه. مجله هیدرولیک ایران ص ۱۶-۱

۲- صالحی، س.ع.ا. و اقبال‌زاده، ا. ۱۳۸۱. بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس. ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۵۶۷-۵۷۴.

3- Berges, M.A. 1990. Flow process in curved alluvial channel. Ph.D. Thesis, Iowa University, USA, 366P.

4- Blanckaert, K. and Graf, W.H. 2001. Mean flow and turbulence in open- channel bend. Journal of hydraulic engineering, vol.127, no 10, pp.835-847.

5- Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. 1991.