

## Experimental Investigation on the Effect of the Bendway Weir Angle on the Erosion and Sedimentation Pattern in Meandering River

M. Hemmati<sup>1\*</sup>, M. Gomeshi<sup>2</sup> and S. M. Kashefipour<sup>2</sup>

### Abstract

Bank erosion is one of the important management issues, especially in meandering rivers. Bendway weirs have recently become among the most popular structures in erosion control along the meanders. Bendway weirs are the stone structures constructed in outer bank to change the flow direction from outer bank to the center of the channel so as to prevent erosion. In this study it has been attempted to investigate the effect of angle of bendway weirs on the pattern of erosion and sedimentation. Three angles of 60°, 75° and 90° and three flow rates of 120, 180 and 230 liter per second were examined. Other structural parameters such as length, height, and distance were kept constant. Continuous injection of sediment with  $d_{50} = 1.6$  mm formed a live bed.

The results of this study showed that the cross-section area of sedimentary bar in the inner bank decreased by an order of 13 to 48 percents as a result to the construction of weirs. The minimum and maximum of decrease were corresponded to the angles of 90° and 60°, respectively. The maximum scour depth to weir height ratio in the outer bank wall was very evident for the angle of 90° but not so noticeable for other two angles. The maximum amount of this ratio was 4.6 at 90°. Sedimentation and scouring patterns showed that the sedimentation between weirs and thereby protecting the outer bank were better for the angles of 60° and 75°. Angle of 90° is not recommended for construction of bendway weirs.

**Keywords:** Angle of bendway weirs, Meandering river, Sedimentation pattern, Erosion.

Received: July 9, 2011

Accepted: November 10, 2012

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و فرسایش در پیچان رود

محمد همتی<sup>۱\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup> و سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup>

### چکیده

فرسایش ساحل یکی از موضوعات مهم مدیریتی بخصوص در رودخانه‌های مئاندری می‌باشد. اخیراً سرریزهای مستغرق به یکی از سازه‌های پرترفدار در کنترل فرسایش در قوسها تبدیل شده‌اند. سرریزهای مستغرق، سازه‌های سنگی شکل هستند که در قسمت قوس خارجی رودخانه احداث می‌گردند تا جهت جریان را از قسمت بیرونی قوس به مرکز کانال تغییر داده و مانع فرسایش آن گردد. در این تحقیق سعی گردیده است تا تأثیر زاویه سرریزهای مستغرق بر الگوی فرسایش و رسوب بررسی گردد. پارامترها و متغیرهای مورد استفاده جهت انجام آزمایشات شامل: سه دبی ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۳۰ لیتر در ثانیه، زاویه‌های ۶۰°، ۷۵° و ۹۰° می‌باشند. سایر پارامترها از جمله طول، ارتفاع و فاصله سازه‌ها ثابت بودند و از یک نوع رسوب با  $d_{50}$  برابر با ۱/۶ میلی‌متر به صورت بستر زنده (با تزریق پیوسته رسوب) استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که سطح تپه رسوبی موجود در قوس داخلی در اثر احداث سرریزها بین ۱۳ الی ۴۸ درصد کاهش یافت. کمترین و بیشترین این مقادیر بترتیب مربوط به زاویه‌های ۹۰° و ۶۰° می‌باشند. نسبت ماکزیمم عمق آبخستگی به ارتفاع سرریز در سمت دیواره قوس خارجی برای زاویه‌های ۶۰° و ۷۵° قابل ملاحظه نبوده؛ اما مقادیر نسبت مذکور در زاویه ۹۰° بسیار مشهود بود طوری که بیشترین مقدار آن در این زاویه برابر با ۴/۶ می‌باشد. الگوهای فرسایش و رسوبگذاری نشان داد تأثیر زاویه‌های ۶۰° و ۷۵° در رسوبگذاری بین سرریزها و در نتیجه آن حفاظت از قوس خارجی بهتر از ۹۰° بوده و استفاده از زاویه ۹۰° برای احداث سرریزهای مستغرق در چنین قوسهایی توصیه نمی‌گردد.

**کلمات کلیدی:** زاویه سرریزهای مستغرق، پیچان رود، الگوی رسوبگذاری، فرسایش.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۸ تیر ۱۳۹۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۰ آبان ۱۳۹۱

1- PhD. Student, Department. of Hydraulic Structures. Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, E-mail: mhemmati1982@yahoo.com

2- Professor, Department of Hydraulic Structures. Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, E-mail: m.gomeshi@yahoo.com ; kashefipour@excite.com

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

\*- نویسنده مسئول

خط مماس بر خط لبه آب برای جریان طراحی و خط مرکزی ساحل محاسبه گردد (Darrow, 2004). طبق این تعریف، سرریزهایی که دارای زاویه‌ای کمتر از  $90^\circ$  باشند، نمای جهت بالادست، سرریزهایی که دارای زاویه‌ای بیشتر از  $90^\circ$  داشته باشند، نمای پایین‌دست و سرریزهایی که زاویه  $90^\circ$  داشته باشند، عمود بر جریان نامیده می‌شوند. در گذشته اینکه سرریزهای مستغرق به چه صورتی احداث گردند تا بیشترین تأثیر را در حفاظت از قوسها داشته باشند، مورد بحث بوده است. طرفداران نمای زاویه بالادست به نتایج آزمایشگاهی و میدانی استدلال می‌کنند. نتایج مطالعات میدانی نشان داد که جریان بعد از عبور از روی سرریز به صورت عمود بر محور سرریز آنرا ترک می‌کند (Derrick, 1999). در نمای زاویه بالادست، جریان از قسمت قوس خارجی به سمت تپه رسوبی هدایت می‌شود (Derrick, 1999). در این حالت، سرریزها باعث تغییر جهت و یا دفع جریان از قوس خارجی به مرکز کانال می‌گردند و به این حالت اصطلاحاً سرریزهای دافع جریان گفته می‌شود و به نمای زاویه پایین‌دست، سرریزهای جاذب جریان گفته می‌شود. طرفداران نمای زاویه پایین‌دست سرریزها استدلال دارند که در این حالت آبستگي کاهش یافت و آشغال، یخ و... کمتری در پشت سرریزها جمع‌آوری می‌شود. (ICBIP, 1971) در سالهای اخیر، نمای زاویه پایین‌دست برای مواردی که فرسایش ساحل خارجی از اهمیت کمتری برخوردار باشد، فقط برای کشتیرانی بکار برده می‌شود. به گفته Watson (2003) در ده سال اخیر، استفاده از زاویه پایین‌دست برای حفاظت ساحل خارجی ممنوع شد و بجای آن از زاویه بالادست استفاده گردید.

Abad et al. (2008) به بررسی ساختار جریان در شرایط مختلف در یک قوس مئاندري با وجود سازه سرریزهای مستغرق پرداختند. ایشان با اندازه‌گیری سه بعدی سرعت روی نهر Sugar در مزرعه Brookside، مدل سه بعدی را برای جریانهای کم‌عمق شبیه‌سازی کردند که بعد از تایید کارایی مدل، آنرا برای جریانهای با عمق متوسط و بیشتر شبیه‌سازی کردند. روی هم رفته نتایج تحقیق ایشان نشان داد که همبستگی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده سرعت و انرژی توربولنس وجود دارد. این مدل دقت کمی در پیش‌بینی سرعت و انرژی جنبشی توربولنس موجود در لایه برشی که بلافاصله در پایین دست نوک سرریز ایجاد می‌شود، دارد. داده‌های میدانی بیانگر وجود سه ناحیه هیدرولیکی عمده در شرایط جریان کم می‌باشند: ۱- منطقه سکون یا عدم چرخش جریان بین سرریزها، ۲- یک خط‌القعر داخلی که در جلوی سرریزها ایجاد می‌شود، وجود یک ناحیه با سرعت بالا در سطح آب و کاهش سرعت در جهت کف و قوس داخلی، ۳- وجود یک لایه برشی بلافاصله در

فرایندهای طبیعی مرتبط با سیستم‌های رودخانه‌های مئاندري محافظت نشده نشان داده است که گودافتادگی بستر آبراهه، فرسایش ساحل آبراهه و جابجایی قوسها در این رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد. در بعضی سیستم‌ها، قوسها (مئاندرها) به طور طبیعی و در جهت عرضی به سمت پایین‌دست گسترش می‌یابند. یکی از سازه‌هایی که برای کنترل این جابجایی‌ها بکار برده می‌شود، سرریزهای مستغرق می‌باشد. سرریزهای مستغرق، سازه‌های سنگی شکل هستند که در قسمت قوس خارجی رودخانه احداث می‌گردند تا جهت جریان را از قسمت بیرونی قوس تغییر داده و مانع فرسایش آن گردند. جریان عبوری از قسمت بالایی سرریز، به صورت عمود بر موقعیت سرریز و به طرف قوس داخلی تغییر جهت می‌دهد. این سازه باعث کاهش سرعت در نزدیک ساحل، کاهش شدت جریان در قوس خارجی، بهبود زیستگاه آبزیان، بهبود شرایط کشتیرانی، رسوبگذاری در قوس خارجی (حفاظت قوس خارجی) و کاهش رسوبگذاری در قوس داخلی می‌گردد (Fischenich and Allen, 2000).

خصوصیات جریان در قوسها می‌تواند الگوهای رسوبگذاری و فرسایش را به خوبی توضیح دهد. رودخانه‌ها به طریقه‌های مختلفی می‌توانند جابجا شوند و پیش‌بینی اینکه رودخانه به کدام جهت مهاجرت خواهد کرد و همچنین پیش‌بینی شدت مهاجرت مشکل می‌باشد. جهت و شدت مهاجرت رودخانه بستگی به امتداد جریان و ژئوتکنیک مواد ساحل دارد که این پیش‌بینی به دلیل اینکه امتداد جریان با شرایط تغییر می‌کند و تابع زمان نیست و بررسی وسیعی از مواد تشکیل دهنده در طول ساحل رودخانه مورد نیاز است، خیلی سخت می‌باشد. شدتهای مهاجرت مئاندري همچنین به ظرفیت حمل رسوب و اینکه آبراهه در حال گود افتادگی یا رسوبگذاری است و یا خیر، بستگی دارد (Sclafani, 2010).

LaGasse et al. (2001) اعلام کردند در رودخانه‌های بزرگ شدت مهاجرت تا ۷۵۰ متر در سال نیز مشاهده شده است.

مطابق کارهای آزمایشگاهی و میدانی صورت گرفته در سالهای متمادی مشاهده شده که زاویه سرریزها یک شاخص کاملاً مهم و اثرگذار بر روی شرایط جریان می‌باشد (Derrick, 1999). سرریزهای مستغرق ممکن است به صورت عمود بر جریان و یا با زاویه کمی نسبت به بالادست و یا پایین‌دست احداث گردند. زاویه سرریزها ممکن است از طریق زاویه بین خط مماس بر قوس رودخانه در نقطه احداث سرریز با خط مرکزی سرریز و یا زاویه بین

پایین دست نوک (دماغه) سرریزها بین ناحیه غیر چرخشی و ناحیه با سرعت بالا.

(Kinzli and Thornton 2009) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی پیش‌بینی سرعت در محدوده سرریزهای مستغرق پرداختند. مدل مورد استفاده آنان مربوط به بخشی از قوس رودخانه میدل ریوگراند با مقیاس ۱:۱۲ بود. متغیرهای مورد استفاده در تحقیق آنها شامل دبی (۲۲۶، ۳۴۰ و ۴۵۳ لیتر در ثانیه)، زاویه سرریزها ( $90^\circ$  و  $60^\circ$ )، طول سرریز که به صورت درصدی از عرض بالادست کانال انتخاب می‌شد (۱۵، ۲۲ و ۲۸ درصد) می‌باشند. عرض تاج، کف و ارتفاع سرریز در تحقیق آنها ثابت بودند و آزمایشات در بستر صلب انجام گرفت. عرض تاج سرریز ۳۰ سانتی‌متر و با شیبی که به سمت پایین داشت عرض کف سرریز ۱۲۰ سانتی‌متر می‌شد. ایشان دبی ۳۴۰ مترمکعب در ثانیه را به عنوان دبی طراحی سرریزهای مستغرق استفاده کرده بودند. آنان در نهایت با استفاده از این داده‌های آزمایشگاهی چهار معادله را جهت پیش‌بینی سرعت اطراف سرریزهای مستغرق ارائه دادند. ایشان پیشنهاد داده بود بهتر است رنج وسیع‌تری از اندازه‌های طول و زاویه‌ها نیز بررسی گردند.

(Jarrahzade and Shafai-Bejestan 2011) در مطالعه‌ای به مقایسه ماکزیمم عمق آبستگي در خط ساحل و دماغه سرریزهای مستغرق در قوس  $90^\circ$  تند پرداختند. مدل مورد استفاده در آزمایشات ایشان دارای عرض  $0.4$  متر و شعاع  $0.8$  متر بود. عمق آب در آزمایشات آنها ثابت و ارتفاع سرریزها ۳۳ درصد آن انتخاب گردید. زاویه قرارگیری سازه‌ها نسبت به خط عمود بر قوس  $30^\circ$ ، فاصله سازه‌ها ۳، ۴ و ۵ برابر طول سازه و طول سازه‌ها ۲۰ درصد عرض کانال بود. نتایج مطالعات آنان نشان داد که عملکرد سازه‌ها در نسبت فاصله سازه به طول آن برابر با ۳ از بقیه موارد بهتر بوده و اشاره کردند که برای قوسهای تند در مقایسه با قوسهای معمولی و نرمال، فاصله سازه‌ها باید کمتر انتخاب شود.

رامش و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی تأثیر سه زاویه ( $0^\circ$ ،  $15^\circ$  و  $30^\circ$ ) بر ماکزیمم عمق آبستگي در یک مدل آزمایشگاهی با قوس  $90^\circ$  تند و در شرایط هیدرولیکی مختلف با دبی‌های ۱۰، ۱۴، ۱۸ و ۲۲ لیتر در ثانیه پرداختند. فاصله، ارتفاع و طول سرریزها در آزمایشات آنها ثابت و بترتیب ۴ برابر طول سرریز (۴L)، ۳۳ درصد عمق آب ( $0.33D$ ) و ۲۰ درصد عرض فوم ( $0.2W$ ) بودند. نتایج آزمایشات ایشان نشان داد که زاویه  $30^\circ$  و  $15^\circ$  بترتیب کمترین و بیشترین آبستگي را ایجاد نمودند.

در مطالعه‌ای که مهندسان ارتش آمریکا در ایستگاه آزمایش آبراهه‌ها (WES)<sup>۱</sup> بخش سنت لوئیس بر روی سرریزهای مستغرق واقع در قوس رودخانه می‌سی‌سی‌پی بر روی یک مدل فیزیکی با کف متحرک انجام دادند اعلام داشتند که هدف از طرح این مدل مطالعه و بهبود کشتیرانی در قوس و حل مشکلات زیست محیطی به شرح ذیل بود:

۱- هزینه‌های زیاد تعمیر و نگهداری لایروبی، ۲- لزوم حفاظت از لانه‌های چلچله‌های دریایی کوچک، ۳- تنگ کردن کانال کشتیرانی، ۴- سرعت‌های زیاد، ۵- جریان‌های سیلابی مضر و ۶- عرض کم کانال کشتیرانی در گذرگاه مستقیم پایین دست قوس (USACE, 1981).

با توجه به این مدل، مفهوم سرریزهای مستغرق که در ژانویه ۱۹۸۸ توسعه یافته بود برای قوسهای Price's Landing و Brown اصلاح شد. این سرریزها در ۱۱ مدل در WES<sup>۱</sup> بجهت بهسازی کشتیرانی در عمق‌های کم و زیاد، تنظیم مسیر جریان از پلهای بزرگراه، انحراف رسوب و حفاظت از ساختمان تعمیر کشتی‌ها آزمایش شد. از سال ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۵ به تعداد ۱۲۰ سرریز در ۱۳ خم رودخانه می‌سی‌سی‌پی ساخته شد. تحلیل ۵ عدد از قدیمی‌ترین تاسیسات سرریزها نشان داد که از سال ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵ لایروبی به میزان ۸۰ درصد کاسته شده و ۳ میلیون دلار صرفه جویی گردید. بعلاوه حوادث کشتی‌های یک‌کش کاهش یافت، تاخیر در زمان یک‌کشی در خم‌ها کم شد، ساماندهی رسوب و یخ بهبود پیدا کرد، اختلال در مناطق سکونت چلچله‌ها از بین رفت، حوزه زیستگاه آبزیان افزایش یافت و تعداد و اندازه ماهیان در مناطق سرریزها در بعضی موارد تا پنج برابر اضافه شد (USACE, 1981).

(Shields et al. 1998) گزارش دادند آب ساکنی که توسط گردابه‌های شکل گرفته پشت سرریزها تشکیل می‌گردد، باعث ایجاد زیستگاه آبزیان می‌شود؛ این زیستگاه بین خطالقدر رودخانه و منطقه رسوبگذار بین سرریزها بوجود می‌آید. همچنین یک چاله فرسایشی در دماغه این سرریزها اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، ایشان اشاره داشتند وقتی که این سازه‌ها به طور مناسب احداث گردند باعث کاهش فرسایش سواحل می‌گردند. ایشان گزارش دادند که با احداث این سازه‌ها افزایش معنی‌داری در تعداد ماهیان، اندازه و تنوع گونه‌های مختلف مشاهده گردید.

بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد بیشتر مطالعات صورت گرفته مربوط به مطالعات میدانی بوده و مطالعات آزمایشگاهی که با بستر

زنده صورت گرفته باشند بسیار کمیاب می‌باشند. همچنین مطالعه آزمایشگاهی که به بررسی تأثیر زاویه احداث سرریزهای مستغرق بر الگوهای رسوبگذاری و فرسایش در یک مدل پیچان‌رود همراه با تزریق رسوب پرداخته باشد، وجود ندارد. لذا تحقیق حاضر در نظر دارد در جهت توسعه مطالعات مربوط به سرریزهای مستغرق، به تأثیرات زاویه سرریزهای مستغرق بر الگوهای رسوب در یک مدل پیچان‌رود همراه با تزریق رسوب بپردازد.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- مشخصات مدل

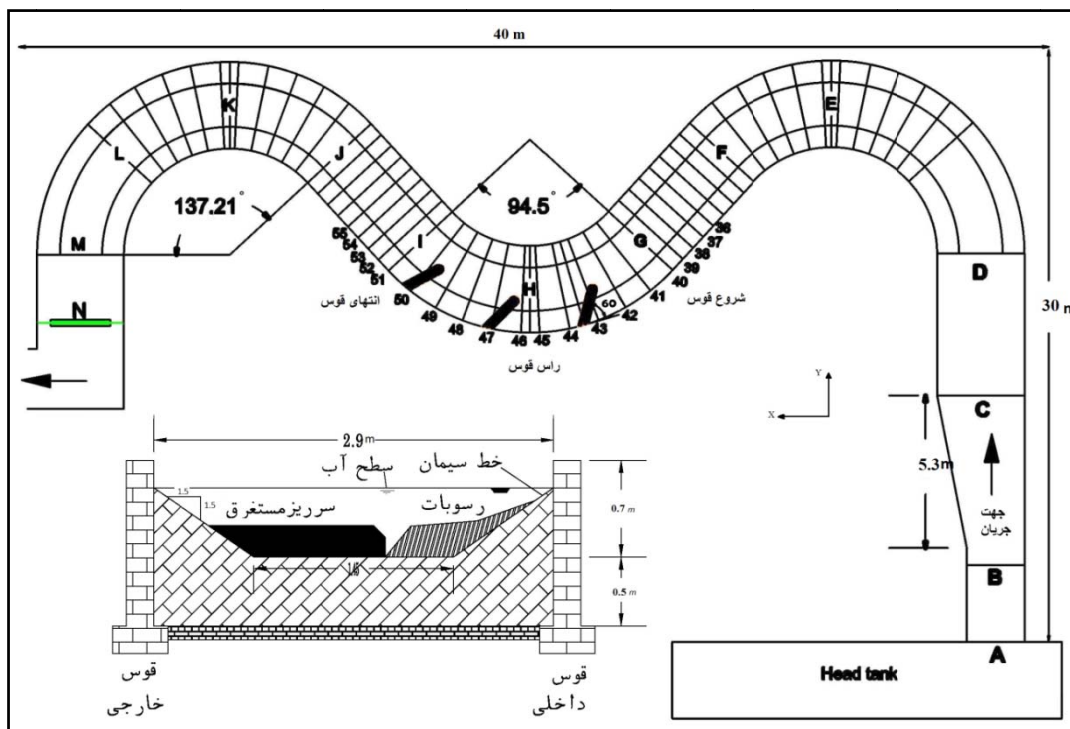
برای انجام آزمایشات مربوطه از مدل موجود در موسسه تحقیقات آب در فضائی به ابعاد  $30 \times 40$  متر مطابق شکل ۱، استفاده گردید. در مدل مربوطه، ابعاد خم با توجه به روابط رژیم تعادلی رودخانه‌ها در نواحی پیچان‌رودی و هندسه رودخانه کارون در ناحیه پائین‌دست شهر اهواز بدست آمده است. با توجه به روابط تجربی و مشخصات خم‌های رودخانه کارون، ابعاد در پلان و نسبت‌های مربوطه مدل در مقیاس هندسی در حدود  $1:80$  نسبت به نمونه اصلی بدست آمده است (ابوالقاسمی، ۱۳۸۵). مقطع کانال دوزنقه‌ای می‌باشد که عرض آن در کف و بالای کانال به ترتیب  $1/45$  و  $2/9$  متر می‌باشد (عرض کف با وجود رسوب،  $2/4$  متر می‌باشد). شیب کناره‌ها برای قوس بیرونی و داخلی مقطع سیمانی، برابر با  $1:1/5$  می‌باشد؛ لازم به توضیح می‌باشد که شیب جداره داخلی قوس با استفاده از اطلاعات  $18$  مقطع عرضی رودخانه کارون، مقدار  $5$  انتخاب شد، البته شیب داخلی آبراهه در مدل فیزیکی با رسوبگذاری می‌تواند ملایم‌تر از این مقدار باشد. لازم به ذکر است که رقم فوق برای شیب داخلی صرفاً یک معیار تقریبی برای محاسبه شرایط هیدرولیکی جریان بوده و در مدل مقدار آن به اقتضای شرایط رسوبگذاری و فرسایش تنظیم می‌گردد (ابوالقاسمی، ۱۳۸۵). شیب طولی بستر  $0/1$  در هزار می‌باشد. این مدل از سه قوس تشکیل شده است که زاویه مرکزی قوسهای اول و سوم  $137/21^\circ$  و زاویه قوس مرکزی که مورد مطالعه این تحقیق می‌باشد  $94/5^\circ$  می‌باشد؛ لازم بذکر می‌باشد که دلیل انتخاب قوس مذکور توسعه یافتگی کامل جریان در این ناحیه می‌باشد (ابوالقاسمی، ۱۳۸۵). همانطور که در شکل ۱ مشخص شده است جریان از ناحیه بالادست در محل A وارد مدل می‌گردد، در محل B جریان ورودی توسط سرریز لبه تیز مستطیلی به عرض  $2$  متر اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین دبی-اشل سرریز از اندازه‌گیری سرعت در نقاط و اعماق مختلف بر روی سرریز و همچنین کنترل آن در پایین دست در مقطع ثابت (بدون حضور رسوب) با اندازه‌گیری سطح مقطع و سرعت متوسط صورت گرفته است. بین مقطع A و B

از آرام کننده جریان استفاده گردید (فاصله دو مقطع مذکور بیش از  $5$  متر می‌باشد) و مقطع دوزنقه‌ای آبراهه از C شروع می‌شود. شروع قوس اول D و انتهای این قوس و شروع بازه مستقیم F، شروع قوس دوم G و انتهای آن I می‌باشد. قوس سوم از J شروع و تا L ادامه می‌یابد. دریچه قطاعی جهت کنترل جریان در قسمت انتهایی کانال و در مقطع N قرار گرفته است. جریان عبوری از مدل در انتها به مخزن سالن آزمایشگاه تخلیه و توسط پمپ، آب مجدداً به مدل برگردانده می‌شود.

لازم بذکر می‌باشد که فاصله بین F و G و I و J که مسیرهای مستقیم در بالادست و پایین دست قوس مرکزی می‌باشند،  $4/89$  متر بوده و طول قوس خارجی  $11$  متر و طول قوس داخلی  $5/5$  متر می‌باشد (طول قوس بین مقاطع  $40$  و  $51$ ). شماره‌گذاری‌های صورت گرفته در شکل ۱ مربوط به شماره مقاطع می‌باشند که از مقطع  $36$  بالادست قوس شروع و به مقطع شماره  $55$  در پایین دست قوس ختم می‌گردد که در نتایج به آنها اشاره می‌گردد. برش مقاطع برای ارائه نتایج طوری است که در تمامی اشکال، قوس خارجی در سمت چپ و قوس داخلی در سمت راست مقاطع قرار گرفته است.

### ۲-۲- معرفی پارامترها و متغیرهای مربوط به سرریزهای مستغرق

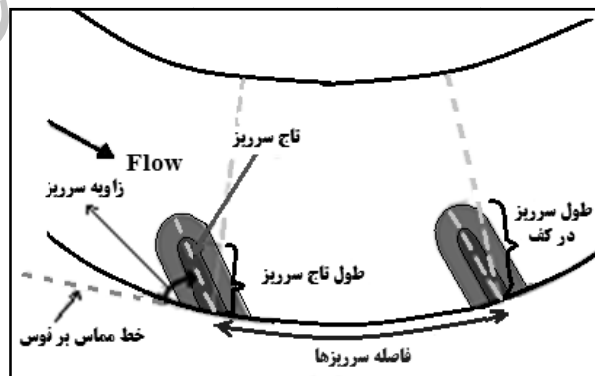
لازم به توضیح می‌باشد که زاویه سرریز در واقع همان زاویه محور مرکزی سرریز با خط مماس بر قوس در نقطه احداث سرریز می‌باشد که در این تحقیق از سه زاویه  $60^\circ$ ،  $75^\circ$  و  $90^\circ$  استفاده گردید. این سازه‌ها طوری طراحی شده بودند که طول (تصویر واقعی طول تاج در امتداد شعاع قوس) آنها ثابت و  $40$  درصد عرض سطح آب بود و همچنین فاصله و ارتفاع سرریزها نیز در تمامی آزمایشات ثابت و بترتیب سه برابر طول سرریز و  $33$  درصد عمق آب بودند. عرض تاج سرریزها  $2$  سانتی‌متر و شیب بدنه سرریزها  $1:1/5$  انتخاب گردید. لازم بذکر می‌باشد که طراحی پارامترهای سرریزها بر اساس مشخصات دبی  $180$  لیتر در ثانیه صورت گرفت. با توجه به دبی‌های  $120$ ،  $180$  و  $230$  لیتر در ثانیه و آزاد بودن شرایط جریان در کانال (بدون تغییر دریچه پایین دست) و ثابت بودن تقریبی عدد فرود جریان، با افزایش دبی در مدل، تنها عمق آب تغییر می‌کرد. لذا دبی  $180$  لیتر در ثانیه مبنای طراحی مشخصات سرریزها گردید تا تأثیرات دبی‌های بیشتر و کمتر از آن بررسی گردد. همچنین در مدل مورد استفاده در دانشگاه کلرادو توسط Darrow (2004) و Kinzli and Thornton (2009) که از سه دبی  $8$ ،  $12$  و  $16$  فوت مکعب در ثانیه استفاده کرده بودند، دبی  $12$  فوت مکعب در ثانیه را به عنوان دبی طراحی سرریزهای مستغرق در نظر گرفته بودند.



شکل ۱ - پلان و مقطع مدل فیزیکی پیچان رود

بصورت آزاد (شرایط طبیعی) عمل می‌کرد. با توجه به مطالعات قبلی در این مدل توسط ابوالقاسمی (۱۳۸۵) و الگوگیری از آن، سه دبی ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۳۰ لیتر در ثانیه انتخاب گردید. در این مطالعه بستر کانال به صورت بستر متحرک انتخاب گردیده است و لذا باید سرعت در کانال به حدی انتخاب شود که توان انتقال ذرات را داشته باشد؛ بطوریکه دبی ۱۲۰ لیتر در ثانیه کمترین دبی است که رسوبات به عنوان بار بستر شروع به حرکت می‌کنند. همچنین لازم بذکر می‌باشد که با توجه به طولانی بودن مدت زمان آزمایشات برای به تعادل رسیدن بستر، انتخاب دبی‌های کمتر، از نظر زمان و هزینه صرفه اقتصادی نداشت. بعد از تنظیم دبی ۱۲۰ لیتر در ثانیه و جاگذاری دستگاه اندازه‌گیر سه بعدی سرعت<sup>۲</sup> (ADV) در یک نقطه که ماکزیمم آبشستگی اتفاق می‌افتاد، عمق آبشستگی با گذشت زمان اندازه‌گیری و ثبت گردید. بعد از رسیدن به تعادل نسبی و برداشت داده‌ها، بدون تغییر در بستر تعادلی دبی ۱۲۰، دبی ۱۸۰ لیتر در ثانیه اجرا شد و همین طور برای دبی ۲۳۰ لیتر در ثانیه نیز این روند تکرار شد. نتایج این روند نشان داد که در این حالت بستر خیلی سریعتر به حالت تعادل می‌رسد. البته جهت اطمینان از به تعادل رسیدن تقریبی بستر علاوه بر استفاده از دستگاه ADV در مراحل اولیه، در ادامه از سه Point Gage نیز در سه نقطه از کانال، مرکز مقاطع H.F و 55 در شکل ۱ برای کنترل شیب سطح آب استفاده گردید؛ زیرا عدم تغییر در شیب سطح آب به منزله به تعادل رسیدن

شکل ۲ به معرفی مشخصات سرریزهای مستغرق در تحقیق حاضر اشاره دارد.



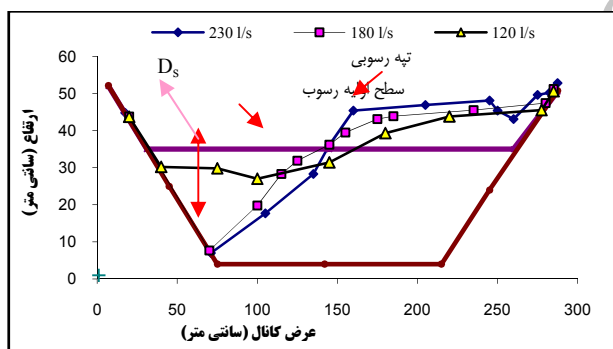
شکل ۲ - معرفی پارامترهای مربوط به سرریزهای مستغرق

### ۲-۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

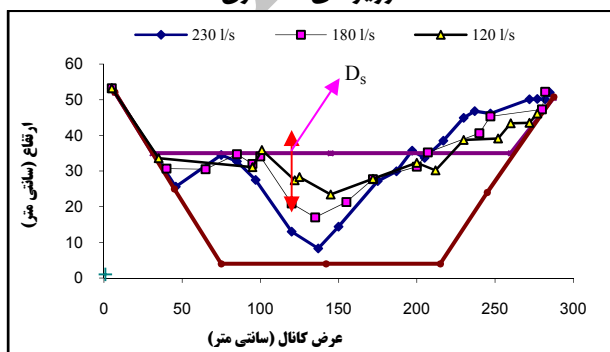
در تحقیق حاضر آزمایشات به دو صورت، قبل و بعد از احداث سازه‌ها انجام گرفت. در سری اول که سازه‌ای در کانال وجود نداشت؛ رسوبات به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر بر روی بستر کانال تسطیح گردید سپس آب به آرامی توسط لوله ۸ اینچی از پایین دست وارد مدل گردید و بعد از بالا آمدن آب در مدل، دبی به آرامی از بالادست تنظیم می‌گردید. لازم به ذکر است که در کلیه آزمایشات با وجود سازه و بدون وجود آن، دریچه پایین دست تغییری نمی‌کرد و جریان

بستر می‌باشد (ابوالقاسمی، ۱۳۸۵). در سری دوم آزمایشات تعداد سه سازه از جنس بتن پیش‌ساخته در قوس خارجی احداث گردیدند که برای بتن‌ریزی از قالبهای مخصوص فلزی به ضخامت ۳ میلی‌متری و برای آب‌بندی آنها از سیمان استفاده گردید. سپس رسوبات به ضخامت ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر بترتیب در بستر و اطراف سازه‌ها تسطیح شد و مثل حالات بدون سازه و بدون تغییر در توپوگرافی دبی‌های قبلی آزمایشات انجام گرفت. البته لازم به ذکر می‌باشد که در کلیه آزمایشات با وجود سازه و بدون سازه، همراه با جریان، تزریق رسوب پیوسته انجام گرفت. با توجه به اینکه ماکزیمم عمق آبستستگی و یا عمق خط‌القعر بین مقاطع شماره ۴۸ و ۴۹ اتفاق افتاده بود؛ در احداث سازه‌ها سعی گردید این محل بین سازه‌ها قرار گیرد. مدت زمان انجام آزمایش برای شکل‌گیری بستر بستگی به میزان دبی و قدرت جریان دارد، در مقادیر بالاتر دبی، قدرت حمل رسوب در طول بازه افزایش یافته و بستر سریعتر شکل مورد نظر خود را پیدا می‌نماید، لذا مدت زمان آزمایش از ۶ تا ۱۸ ساعت وابسته به دبی متغیر است. بعد از حصول نسبی تعادل در آبراهه، دبی قطع می‌شد و روز بعد از اتمام هر آزمایش که بستر کاملاً زهکشی شده و امکان برداشت توپوگرافی حاصل می‌گردید، در یک شبکه ۵×۱۰ سانتی‌متر از متر لیزری برای برداشت الگوی رسوب و فرسایش در مقاطع مختلف استفاده گردید که توپوگرافی فرسایش و رسوبگذاری در اشکال (۱۲ الی ۱۵) آورده شده است. این اشکال با استفاده از نرم‌افزار Surfer(9) ترسیم گردیده‌اند. در این تحقیق از مواد رسوبی که  $d_{50}$  و  $G_s$  آن بترتیب برابر با ۱/۶ میلی‌متر و ۲/۴ بود، استفاده گردید.

$D_s$  مربوط به عمق خط‌القعر کانال می‌باشد که نتایج آن در اشکال (۵) و (۶) بصورت بی‌بعد ارائه شده است. با توجه به شکل ۵، نسبت عمق خط‌القعر به ارتفاع سرریز ( $D_s/H_w$ ) در تمامی مقاطع با افزایش دبی، زیاد می‌گردد. طوری که مقادیر ماکزیمم و می‌نیم آن بترتیب در اطراف دماغه سرریزها (مقاطع ۴۳، ۴۶ و ۴۹) و بین سرریزها (۴۵ و ۴۸) اتفاق افتاده است. بطور نمونه متوسط مقادیر ماکزیمم عمق نسبی خط‌القعر در مقاطع مذکور در دبی‌های ۲۳۰، ۱۸۰ و ۱۲۰ لیتر در ثانیه بترتیب برابر با ۷، ۶ و ۴/۶ بوده که این امر بیانگر افزایش عمق نسبی خط‌القعر با افزایش دبی در طول قوس مرکزی (محدوده احداث سرریزها) می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۶ ملاحظه می‌گردد که در مقایسه با حالت بدون سازه، احداث سرریزها باعث افزایش عمق نسبی خط‌القعر در نزدیکی و اطراف دماغه سرریزها شده است. به عنوان مثال مقدار نسبت مذکور در مقطع ۴۳ در اثر احداث سرریزها ۲/۴ برابر آن در حالت بدون سرریز می‌باشد. هر چند احداث سرریزها باعث افزایش عمق نسبی خط‌القعر شده است اما موقعیت خط‌القعر در دو حالت مذکور بسیار متفاوت می‌باشد. زیرا وجود خط‌القعر عمیق در مرکز کانال، با اینکه ممکن است برای خود سازه مشکلاتی را از نظر پایداری ایجاد نماید اما خطری را برای فرسایش قوس خارجی دنبال نمی‌کند.



شکل ۳- تأثیر دبی بر الگوی فرسایش و رسوب بدون وجود سرریزهای مستغرق



شکل ۴- تأثیر دبی بر الگوی فرسایش و رسوب با وجود سرریزهای با زاویه  $60^\circ$

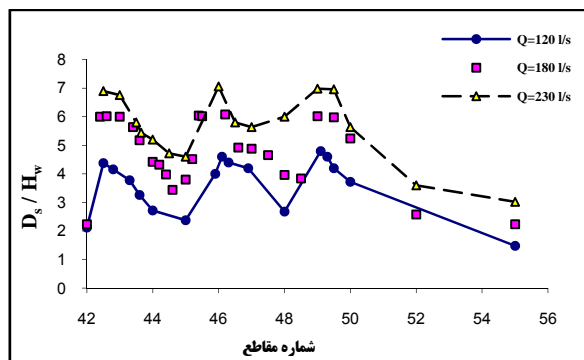
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی تأثیر دبی بر الگوی فرسایش و رسوب

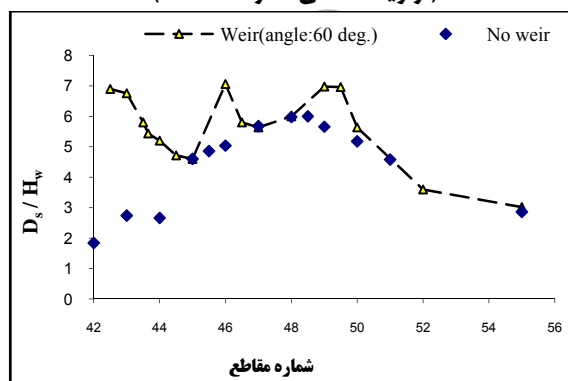
یکی از پارامترهای تأثیر گذار بر الگوی فرسایش و رسوب، دبی کانال می‌باشد. آزمایشات به دو صورت بدون سازه و با وجود سازه در سه دبی ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۳۰ لیتر در ثانیه انجام شد. اشکال (۳) و (۴) بترتیب مربوط به حالت بدون سازه و برای سرریزهای با زاویه  $60^\circ$  بوده که هر دو شکل مذکور مربوط به مقطع شماره ۴۸ می‌باشند. همانطور که در این اشکال ملاحظه می‌گردد با افزایش دبی، عمق خط‌القعر، سطح و ارتفاع تپه رسوبی در هر دو شکل افزایش می‌یابند؛ اما با مقایسه دو شکل مذکور ملاحظه می‌گردد که خط‌القعر از نقطه ۷۰ سانتی‌متری محور افقی در حالت بدون سازه در شکل ۳ به ۱۴۵ سانتی‌متری آن در شکل ۴ (با وجود سرریزها) انتقال یافته و از میزان رسوبات قوس داخلی در اثر احداث سرریزها کاسته شده است. در اشکال فوق‌الذکر، سطح رسوب تسطیح شده اولیه و بدنه کانال نیز آورده شده است تا تصویر بهتری از الگوی رسوب و فرسایش ارائه گردد. در این اشکال،

۵۰ بوده که متوسط مقدار آنها برابر با ۴/۶ می‌باشد. این مقاطع دقیقاً در بالادست سرریزهای اول و سوم (چسبیده به دیواره خارجی قوس) واقع شده‌اند که در نهایت می‌تواند به شکست سازه‌ها منجر شود. در نتیجه نمی‌توان انتظار داشت که سرریزها در چنین قوسی و در چنین زاویه‌ای (۹۰°) کارکرد مطلوبی داشته باشند. علاوه بر دو مقطع ۴۳ و ۵۰ که در بالادست سازه‌ها واقع شده‌اند؛ بقیه مقاطع در پایین‌دست و یا بین آنها قرار دارند (شکل ۱). ملاحظه می‌گردد که مقدار نسبت مذکور در مقاطع دیگر (غیر از مقاطع ۴۳ و ۵۰) در زاویه ۹۰° بین ۱ تا ۲/۸ در نوسان بوده که بیشترین آن مربوط به مقطع ۴۵ می‌باشد. این در حالی است که مقادیر نسبت مذکور برای دو زاویه ۶۰° و ۷۵° بسیار نزدیک به هم بوده و در اکثر مقاطع کمتر از ۱ می‌باشند (به جز دو مقطع ۴۴ و ۵۲ که بیشترین مقدار آن مربوط به زاویه ۷۵° در مقطع ۵۲ (اشکال ۸ و ۱۰) و برابر با ۱/۵ می‌باشد). آبشستگی این ناحیه بیانگر وجود سرعت‌های بالا در پشت سرریزها و سمت دیواره قوس خارجی می‌باشد و آبشستگی بالادست سازه‌های اول و سوم سمت دیواره خارجی (مقاطع ۴۳ و ۵۳) نیز بیانگر وجود گردابه‌های شدید در بالادست سرریزها بخصوص در زاویه ۹۰° می‌باشد. لذا با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که در چنین قوسی از مدل پیمان‌رود (قوس مرکزی در شکل ۱) زاویه ۹۰° برای احداث سرریزهای مستغرق کارایی نداشته و توصیه نمی‌گردد. لازم بذکر است که اشکال (۶ الی ۱۱) مربوط به دبی ۲۳۰ لیتر در ثانیه می‌باشند.

از دیگر کاربردهای سرریزهای مستغرق می‌توان به کاهش لایروبی و افزایش عرض کانال در اثر فرسایش تپه رسوبی قوس داخلی نام برد. زیرا با احداث این سازه‌ها در قوس خارجی، جریان توسط این سازه‌ها تسخیر شده و به سمت مرکز کانال و قوس داخلی تغییر جهت داده می‌شود. در نتیجه، تغییر جهت جریان باعث فرسایش تپه رسوبی شده که در اثر آن عرض کانال در قوس و پایین‌دست آن افزایش یافته و عمق آب در سمت قوس داخلی نیز نسبت به حالت قبل از احداث سرریزها، زیاد می‌گردد. مساحت هاشور خورده در شکل ۹ بطور شماتیک سطحی از تپه رسوبی را نشان می‌دهد که در اثر احداث سرریزهای مستغرق با زاویه ۶۰° دچار فرسایش شده است. برای بررسی تأثیر زاویه‌ها بر سطح فرسایش یافته تپه رسوبی، چندین مقطع از جمله مقاطع ۴۵، ۴۸، ۴۹ و ۵۲ انتخاب گردید و نسبت سطح فرسایش یافته تپه رسوبی به سطح مقطع آن در حالت بدون سازه  $(A/A_0)$  در زاویه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد در تمامی مقاطع به جز مقطع ۵۲، تأثیر زاویه ۶۰° بر نسبت سطح فرسایش یافته تپه رسوبی بیش از سایر زاویه‌ها می‌باشد؛



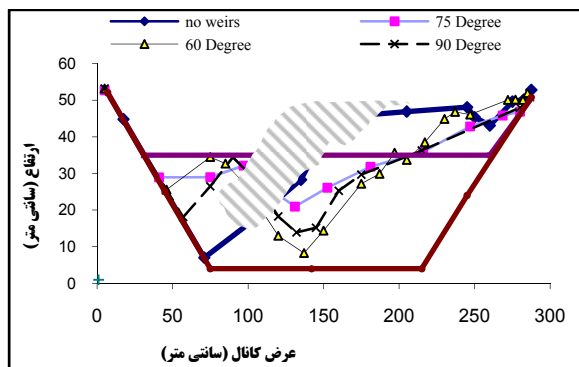
شکل ۵- تأثیر دبی بر عمق نسبی خط‌القعر در مقاطع مختلف (زاویه احداثی سازه‌ها: ۶۰°)



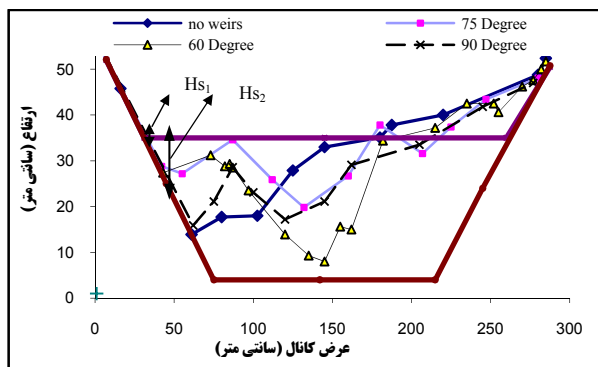
شکل ۶- عمق نسبی خط‌القعر در مقاطع مختلف برای حالت‌های با سازه و بدون سازه

### ۳-۲- بررسی تأثیر زاویه سرریزهای مستغرق بر الگوی فرسایش و رسوب

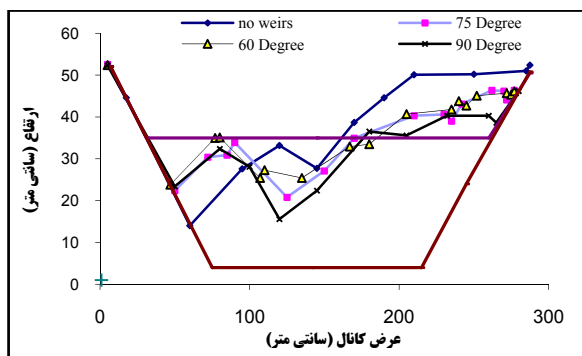
در این قسمت به بررسی تأثیر زاویه‌های ۶۰°، ۷۵° و ۹۰° بر عمق نسبی آبشستگی در سمت دیواره قوس خارجی و سطح نسبی فرسایش یافته تپه رسوبی در قوس داخلی در مقاطع مختلف پرداخته شده است. نهایتاً توپوگرافی فرسایش و رسوبگذاری در زاویه‌های مختلف احداثی ارائه گردیده است. در اثر احداث سرریزهای مستغرق دو نوع آبشستگی اتفاق افتاده است که اولی در اطراف و در امتداد دماغه سازه‌ها و دومین آبشستگی در بالادست و پایین‌دست سرریزها و چسبیده به دیواره قوس خارجی که عمق نوع دوم در زاویه ۹۰° بیشتر از سایر زاویه‌ها می‌باشد. این مهم در شکل ۷ بخوبی نشان داده شده است. در شکل مذکور  $H_{S1}$ ، عمق آبشستگی در زاویه‌های ۶۰° و ۷۵° و  $H_{S2}$ ، عمق آبشستگی در زاویه ۹۰° می‌باشند. آبشستگی پایین‌دست سرریزها در زاویه ۹۰° با نماد "S" در شکل ۱۵ بخوبی نشان داده شده است. مقادیر ماکزیم عمق نسبی آبشستگی در زاویه ۹۰° و در تمامی مقاطع بیشتر از سایر زاویه‌ها می‌باشند. بیشترین مقدار عمق نسبی آبشستگی در سمت دیواره، مربوط به مقاطع ۴۳ و



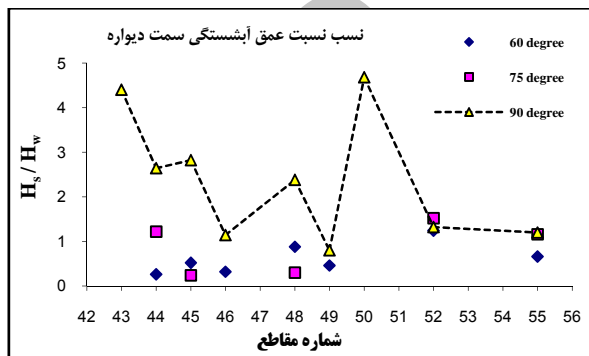
شکل ۹- سطح فرسایش یافته تپه رسوبی در اثر احداث سرریزهای با زاویه  $60^\circ$



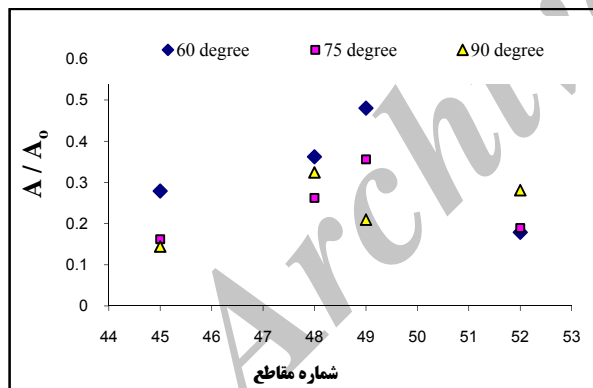
شکل ۷- الگوی رسوب و فرسایش در مقطع  $45^\circ$  در زاویه‌های مختلف سرریزهای مستغرق و حالت بدون سازه



شکل ۱۰- الگوی رسوب و فرسایش در مقطع  $52^\circ$  در زاویه‌های مختلف سرریزهای مستغرق و حالت بدون سازه



شکل ۸- تأثیر زاویه بر ماکزیمم عمق نسبی آبستنگی در مقاطع مختلف در سمت دیواره خارجی قوس



شکل ۱۱- تأثیر زاویه بر نسبت سطح فرسایش یافته تپه رسوبی در مقاطع مختلف

همچنین آبستنگی اطراف سازه سوم در زاویه  $90^\circ$  بیشتر از دو زاویه دیگر اتفاق افتاده است. لذا با توجه به نتایج آزمایشات، در این نوع قوسها، سازه سوم نسبت به دو سازه اول و دوم بیشتر در معرض حمله جریان می‌باشد که در اجرا برای حفاظت از دماغه و اطراف سازه آخری باید تمهیدات لازم اندیشیده شود. این امر را می‌توان در اشکال (۱۳ الی ۱۵) ملاحظه نمود.

زیرا در این حالت طول واقعی سرریزها بیشتر از زاویه  $75^\circ$  و آنها هم بیشتر از زاویه  $90^\circ$  می‌باشد. بیشترین مقدار نسبت مذکور در مقطع ۴۹ برای زاویه  $60^\circ$  برابر با  $0/48$  می‌باشد و این در حالی است که همین مقدار برای زاویه‌های  $75^\circ$  و  $90^\circ$  به ترتیب برابر با  $0/35$  و  $0/2$  می‌باشد. کمترین مقدار این نسبت مربوط به زاویه  $90^\circ$  و برابر با  $0/13$  می‌باشد (مقطع ۴۵). یعنی تمام مقادیر نسبت مورد بحث در هر سه زاویه بین  $0/13$  الی  $0/48$  قرار دارند و این نشان می‌دهد که صرفنظر از تأثیر زاویه، با احداث سرریزهای مستغرق، تپه رسوبی موجود در قوس داخلی بین ۱۳ تا ۴۸ درصد فرسایش یافته است. در مقطع ۵۲، تأثیر زاویه  $90^\circ$  بر فرسایش تپه رسوبی تا حدودی بیشتر از بقیه زاویه‌ها می‌باشد؛ بطوریکه مقدار نسبت مذکور برای این زاویه برابر با  $0/28$  و برای دو زاویه دیگر  $0/19$  می‌باشد. علت این امر نزدیکی دماغه سرریز  $90^\circ$  به مقطع مذکور نسبت به زاویه‌های دیگر می‌باشد. زیرا با تغییر زاویه، محل قرارگیری دماغه سرریزها تا حدودی جابجا می‌شوند.

آبستنگی دیگری نیز در دماغه و بالادست سازه‌ها اتفاق افتاده است که در سازه سوم بیشتر از سازه‌های اول و دوم می‌باشد.



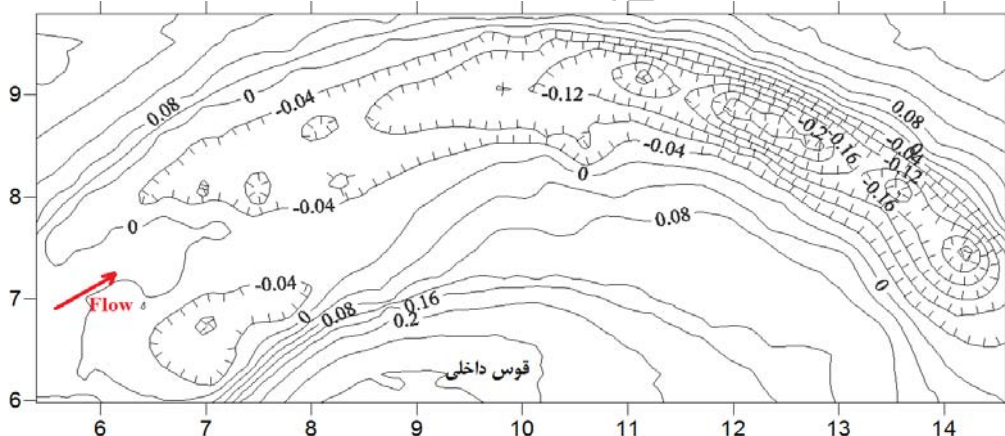
وسعت تپه رسوبی قوس داخلی کاسته شده و در نتیجه، عرض کانال افزایش یافته است. در اشکال مذکور سطوح هاشور خورده مربوط به فرسایش می‌باشند و واحد مقیاسها، متر می‌باشد.

لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده در مقاله حاضر مربوط به حالتی است که تنها متغیرهای آن زاویه سرریزها و دبی جریان می‌باشند و این در حالی است که سایر پارامترها از جمله ارتفاع، فاصله و طول سرریزهای مستغرق، ثابت می‌باشند و تغییر هر یک از آنها می‌تواند در نتایج مذکور تأثیر داشته باشند.

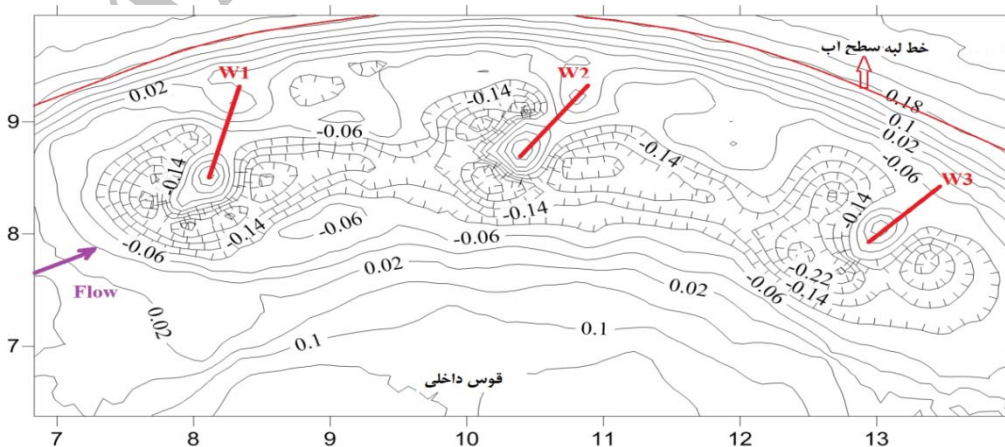
#### ۴ - نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که: عمق نسبی خطالقعر ( $D_s/H_w$ ) بین مقاطع ۴۲ تا ۴۸، با احداث سرریزها در مقایسه با حالت بدون سازه افزایش یافت. به عنوان مثال در زاویه  $90^\circ$  و در برخی مقاطع از جمله مقطع ۴۳ میزان آن  $2/4$  برابر حالت بدون سازه می‌باشد.

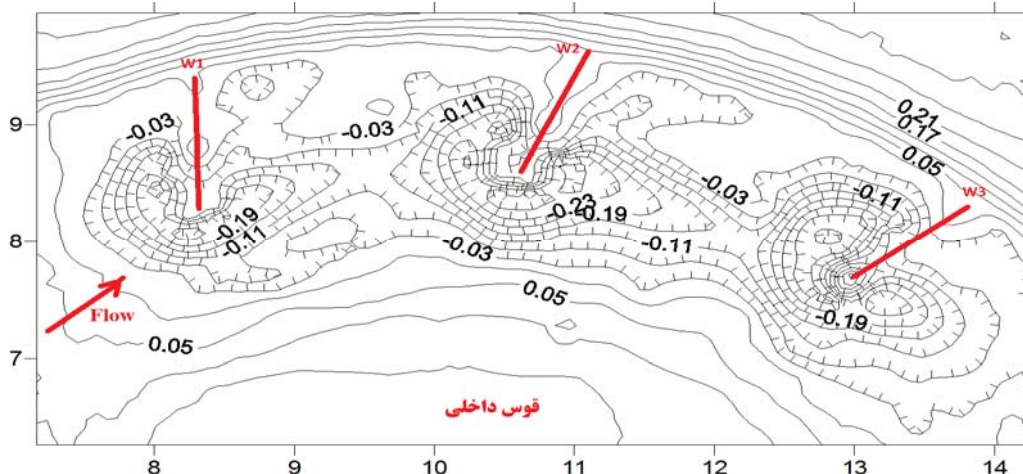
اشکال (۱۲ الی ۱۵)، توپوگرافی فرسایش و رسوبگذاری بستر را در حالت بدون سازه و با وجود سرریزهای مستغرق نشان می‌دهند. همانطور که در این اشکال ملاحظه می‌گردد در حالت بدون سازه، خطالقعر در سمت دیواره قوس خارجی شکل گرفته است که بیشترین مقدار عمق آبستنگی در پایین‌دست رأس قوس اتفاق افتاده است (شکل ۱۲). احداث سازه‌ها باعث گردید که خطالقعر به مرکز کانال و در امتداد دماغه سرریزها انتقال یابد و در بین سازه‌ها رسوبگذاری صورت گیرد. اما الگوهای رسوبگذاری نشان داد که رسوبگذاری در بین سرریزها در زاویه‌های  $60^\circ$  و  $75^\circ$  بهتر از زاویه  $90^\circ$  می‌باشند (اشکال ۱۳ الی ۱۵). آبستنگی پایین دست سازه‌های با زاویه  $90^\circ$  شدیدتر از سایر زوایا روی داده است (شکل ۱۵). بطور کلی با مقایسه اشکال مربوط به توپوگرافی فرسایش و رسوبگذاری مشخص می‌گردد که شدت فرسایش در اطراف و بین سازه‌هایی که با زاویه  $90^\circ$  احداث گردیده بودند، بیشتر از بقیه موارد می‌باشد. زیرا شدت گردابه‌های ایجاد شده در پایین‌دست سرریزهای با زاویه  $90^\circ$  بیشتر از سایر زاویه‌ها بود که این امر شدت فرسایش را تشدید می‌کرد. همچنین قابل ملاحظه است که با احداث سرریزها از حجم و



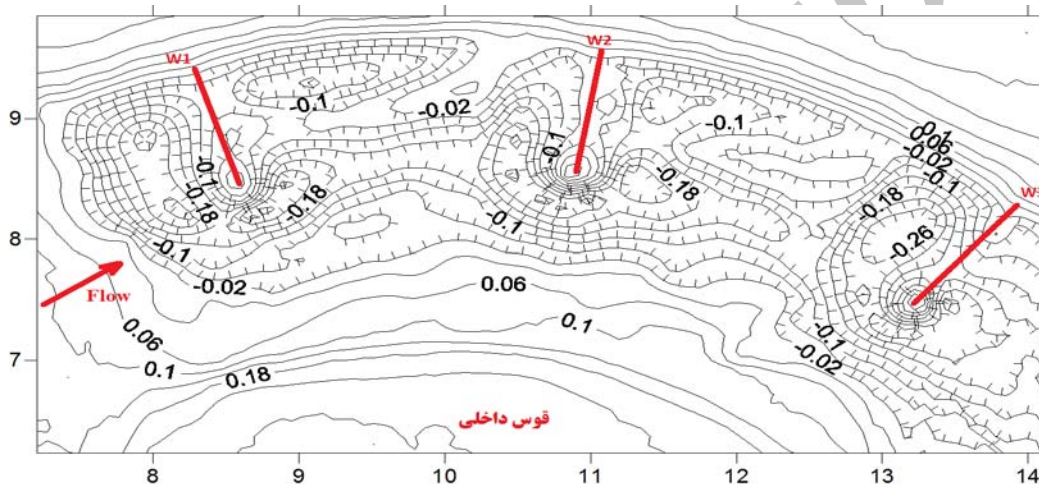
شکل ۱۲- الگوی فرسایش و رسوبگذاری قوس مرکزی پیچان‌رود در حالت بدون سازه (دبی ۱۸۰ لیتر در ثانیه)



شکل ۱۳- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در اثر احداث سرریزهای با زاویه  $60^\circ$  (دبی ۱۸۰ لیتر در ثانیه)



شکل ۱۴- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در اثر احداث سرریزهای با زاویه  $75^\circ$  (دبی  $180$  لیتر در ثانیه)



شکل ۱۵- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در اثر احداث سرریزهای با زاویه  $90^\circ$  (دبی  $180$  لیتر در ثانیه)

الگوهای فرسایش و رسوبگذاری نشان داد که رسوبگذاری در بین سرریزها و در نتیجه آن حفاظت قوس خارجی در زاویه های  $75^\circ$  و  $60^\circ$  بهتر از زاویه  $90^\circ$  اتفاق افتاد.

#### ۵- تشکر

بدینوسیله از دفتر تحقیقات و استاندارد شبکه های آبیاری و زهکشی سازمان آب و برق خوزستان بخاطر حمایت مالی و از موسسه تحقیقات آب تهران بخاطر فراهم آوردن شرایط انجام آزمایشات تشکر و قدردانی می گردد.

#### پی نوشتها

- 1 - Waterways Experiment Station
- 2- Acoustic Doppler Velocimetry

تأثیر زاویه  $60^\circ$  در فرسایش تپه رسوبی بیشتر از زاویه های  $75^\circ$  و  $90^\circ$  بود؛ بطوریکه بیشترین و کمترین مقدار نسبت سطح فرسایش یافته تپه رسوبی به سطح مقطع آن در حالت بدون سازه  $(A/A_0)$  بترتیب مربوط به زاویه های  $60^\circ$  و  $90^\circ$  بوده که مقادیر آن بترتیب برابر با  $0/48$  و  $0/13$  می باشند. این امر بیانگر آن است که صرف نظر از تأثیر زاویه، احداث سرریزهای مستغرق باعث کاهش  $13$  الی  $48$  درصدی سطح مقطع تپه رسوبی در قوس داخلی شده است.

بیشترین مقدار نسبت ماکزیمم عمق آبستگي در سمت دیواره خارجی قوس به ارتفاع سرریز  $(H_s/H_w)$  در زاویه  $90^\circ$  و در مقاطع  $43$  و  $50$  اتفاق افتاد که مقدار آن برابر با  $4/6$  می باشد. مقادیر نسبت مذکور برای دو زاویه  $75^\circ$  و  $60^\circ$  قابل ملاحظه نبود.

با توجه به نتایج تحقیق حاضر، استفاده از زاویه  $90^\circ$  برای احداث سرریزهای مستغرق در چنین قوسهایی توصیه نمی گردد.

## ۶- مراجع

- and nose of submerged weirs in a sharp bend." *Scientific Research and Essays* Vol. 6(5), pp. 1071-1076, 4 March, 2011. Available online at <http://www.academicjournals.org/SRE>
- Kinzli, K.D., and Thornton CH. I. (2009) "Predicting velocity in bendway weirs eddy fields." Published online in Wiley Inter Science ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)) DOI: 10.1002/tra.1289
- LaGasse, P. F., Schall, J. D., and Richardson, E. V. (2001) "Stream stability at highway structures." 3rd ed., HEC-20, FHWA-NHI-01-002, Federal Highway Administration, U. S. Dept. of Transportation, Washington, D. C.
- Sclafani, P. (2010) "Methodology for predicting maximum velocity and shear stress in a sinous channel with bendway weirs using 1-D HEC-RAS modeling results." M.S. Thesis, Colorado State University, Department of Civil Engineering, Fort Collins, CO.
- Shields, F.D. Jr., Knight, S.S., and Cooper, C.M. (1998) "Addition of spurs to stone toe protection for warm water fish habitat." *Journal of the American Water Resources Association* 34, pp. 1427-1436.
- USACE (1981) "The streambank erosion control evaluation and demonstration." Act of 1974 Section 32, Public Law 93-251, U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Final Report to Congress, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Watson, C.C. (2003) "Dikes, Dikes, Dikes. CE 610 Stream Restoration-Class Notes." Spring 2003. Colorado State University, Fort Collins, CO.
- ابوالقاسمی، م. (۱۳۸۵)، کنترل رسوب ورودی به آبگیر در پیچان رود، رساله دکتری دانشگاه تربیت مدرس.
- رامش، س.، جراحزاده، ف.، مشکورنیا، و شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۹)، وضعیت پروفیل طولی فرسایش و رسوب تحت تأثیر سرریز Bendway در خم ۹۰ درجه تند، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران.
- Abad, J. D., Rhoads, B. L., Guneralp, I. and Garcia, M.H. (2008) "Flow structure at difference stages in a meander-bend with Bendway weirs." *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 134(8), pp. 1052-1063.
- Derrick, D.L. (1999). Bendway Weir History, Theory and Design. Downloaded from (<http://chl.wes.army.mil/research/hydstruc/bankprotect/bendweir/work.htm>) on 6/21/04.
- Darrow, J. (2004) "Effects of Bendway Weir Characteristics on Resulting Flow Conditions." M.S. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Fischenich, J. C., and Allen, H. A. (2000) "Stream management." ERDC/EL SR-W-00-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- ICBIP (Indian Central Board of Irrigation and Power) (1971) "Manual on River Behavior, Control and Training." Publication No. 60, New Delhi.
- Jarrahzade, F., and Shafai Bejestan, M. (2011) "Comparison of maximum scour depth in Bank line