

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه

لیلا مهرداد<sup>۱</sup>، محمد همتی<sup>۲</sup>، مهدی یاسی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه های آبی، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۲/۲)

### چکیده

سرریزهای مستغرق یک ابزار مهم در کنترل فرسایش چند منظوره می باشند و برای کنترل فرسایش، احیاء آبراهه ها و بهبود زیستگاه آبزیان استفاده می شوند. این سازه ها با کاهش سرعت های جریان، فرسایش قوس خارجی را کاهش و با کاهش تمرکز جریان در سمت ساحل خارجی قوس باعث توزیع مناسب جریان در طول پیچ می گردند. در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان در یک پیچ ۹۰ درجه ملایم پرداخته شده است. آزمایش ها در یک فلوم قوس دار با انحنای نسبی برابر با  $\frac{3}{4}$ ، با طول ۲۴ متر و عرض  $\frac{0.92}{0.7}$  متر در دبی های ۵۵، ۶۶ و ۷۷ لیتر بر ثانیه انجام گرفت. یکسری از سرریزها (تعداد ۷ سازه) با سه نسبت ارتفاع (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ برابر عمق آب) و سه شیب تاج (۰، ۵ و ۱۰ درصد) در ساحل خارجی قوس ایجاد شدند؛ در حالی که زاویه (۶۰ درجه) و فاصله سازه ها (۳ برابر طول سازه ها) در آزمایش ها ثابت بود. اندازه گیری مقادیر سرعت در اطراف سرریزها در دو تراز نزدیک سطح آب و نزدیک بستر انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که بعد از احداث سرریزها، سرعت متوسط در سمت قوس خارجی بیش از ۷۰ درصد کاهش و در سمت قوس داخلی بیش از ۵۰ درصد افزایش یافت. سرریزهای با ارتفاع  $\frac{0.5}{0.7}$  و شیب تاج ۵ درصد در کاهش سرعت در قوس خارجی بسیار مؤثر بودند. از سوی دیگر سرریزهای با ارتفاع  $\frac{0.7}{0.7}$  و سرریزهای با شیب تاج تخت در افزایش سرعت در قوس داخلی به ویژه در رأس قوس بیشتر مؤثر بودند. به طور کلی نتایج تحقیق حاضر نشان داد که سرریزهای با ارتفاع نسبی برابر با  $\frac{0.5}{0.7}$  و شیب تاج برابر با ۵ درصد به عنوان مناسب ترین گزینه های طراحی در چنین قوس هایی می باشند.

واژه های کلیدی: سرریزهای مستغرق، پیچ ۹۰ درجه، الگوی جریان، شیب تاج، قوس خارجی

### مقدمه

آنها دارند و از نظر کارکرد نیز تفاوت قابل توجهی دارند (Hemmati, 2012; Jarrahzade and Shafai Bejestan, 2013). آبشکن ها معمولاً مستغرق نبوده و در حال عبور جریان از اطراف آنها قابل رؤیت هستند؛ در حالی که سرریزهای مستغرق معمولاً دیده نمی شوند و جریان از روی سازه عبور می کند. جریان عبوری از روی سرریزهای مستغرق به گونه ای هدایت می شود که جریان با محور سرریز زاویه ۹۰ درجه می سازد و به سمت خط مرکزی کانال حرکت می کند. سرریزهای مستغرق همانند آبشکن ها، سرعت در نزدیکی ساحل و همچنین تمرکز جریان در ساحل خارجی را کاهش می دهند (FHWA, 1997). با شکل-گیری گردابه ها در پشت سرریزها، یک محل مناسب برای زیستگاه آبزیان شکل می گیرد (Shields et al., 1998). کاربرد سرریزهای مستغرق از عنوان کنترل کشتیرانی در رودخانه های بزرگ، به عنوان کنترل فرسایش در آبراهه ها و رودخانه های کوچک تغییر یافت (Rhoads, 2003).

سیستم های رودخانه های ماندیری محافظت نشده با گود افتادگی بستر آبراهه، فرسایش ساحلی آبراهه و جابجایی قوس ها مواجه می باشند. در بعضی سیستم ها قوس ها (مانندرها) به طور طبیعی و در جهت عرضی به سمت پایین دست گسترش می یابند. یکی از سازه هایی که برای کنترل این جابجایی ها به کار برده می شود، سرریزهای مستغرق واقع در پیچ آبراهه می باشد (Fischenich and Allen, 2000). این سازه ها سرعت های نزدیک ساحل را کاهش داده و یک مسیری را برای جریان طبق خواست مهندس طراح در تمام طول قوس ایجاد می نمایند (Hemmati et al., 2013a). سرریزهای مستغرق از نظر ظاهر شبیه آبشکن های سنگی هستند با این تفاوت که در مقایسه با آبشکن های معمولی، کم ارتفاع بوده و طول بیشتری نسبت به

\* نویسنده مسئول: m.yasi@ut.ac.ir

درصد عرض آبراهه و  $3/7$  برابر طول سرریزها بود. آنها از سه ارتفاع ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد عمق آب ورودی به عنوان متغیر استفاده نمودند. مدل مورد استفاده در تحقیق آنها دارای بستر و کناره فرسایش پذیر بود. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با وجود این سازه‌ها، در قسمت بالادست قوس خارجی یک فرسایش اتفاق افتاد. با افزایش ارتفاع سرریزها، بخش مذکور مقداری بهبود یافت و تنها در یک مورد که ارتفاع سرریز ۱۰۰ درصد عمق آب ورودی بود و جریان از روی سرریز عبور نمی‌کرد، حفاظت از بخش فوقانی قوس خارجی به صورت قابل توجهی افزایش یافت.

Hemmati *et al.* (2012) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و زاویه سرریزهای مستغرق بر فرسایش و رسوب‌گذاری در پیچان رود پرداختند. نتایج آنها نشان داد که تغییر طول و زاویه سرریزهای مستغرق تأثیر معنی‌داری در کاهش ارتفاع تپه رسوبی در قوس داخلی نداشت؛ اما در شرایط جریان بالا (دبی جریان بیشتر از دبی طراحی سازه‌ها) احداث سرریزها بطور متوسط باعث کاهش ۱۹ درصدی ارتفاع تپه رسوبی نسبت به حالت بدون سازه گردید. همچنین آنها گزارش دادند که ماکزیمم عمق آبشستگی در دماغه سرریزهای با نسبت طول برابر با  $0/3$  و زاویه  $75$  درجه رخ داد.

Ramesh *et al.* (2010) به بررسی تأثیر سه زاویه  $0^\circ$ ،  $15^\circ$  و  $30^\circ$  بر ماکزیمم عمق آبشستگی در یک مدل آزمایشگاهی با قوس ۹۰ درجه تند و در شرایط هیدرولیکی مختلف با دبی‌های ۱۰، ۱۴، ۱۸ و ۲۲ لیتر در ثانیه پرداختند. فاصله، ارتفاع و طول سرریزها در آزمایش‌های آنها ثابت و بترتیب ۴ برابر طول سرریز، ۳۳ درصد عمق آب و ۲۰ درصد عرض فلوم بودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که زاویه  $30^\circ$  و  $15^\circ$  درجه بترتیب کمترین و بیشترین آبشستگی را ایجاد نمودند.

Hemmati *et al.* (2013a) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و فرسایش در پیچان-رود پرداختند. نتایج تحقیق آنها 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 درجه و ۶۰ درجه می‌باشد. Hemmati *et al.* (2013b) به بررسی طول سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و تراز آب در پیچان‌رود پرداختند و گزارش دادند که راندمان سرریزهای با طول ۴۰ درصد عرض سطح آب در کنترل فرسایش قوس خارجی بیشتر از سرریزهای با طول ۳۰ و ۲۰ درصد بود. آنها همچنین بیان کردند که احداث این سازه‌ها تأثیر معنی‌داری در پس‌زدگی آب (backwater) ایجاد نکرد.

Julien and Duncan (2003) در یک مقاله فنی به بررسی معیارهای بهینه طراحی سرریزهای مستغرق با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی دو و سه بعدی CCHE پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش طول و زاویه (زاویه نسبت به خط عمود بر قوس) سرریزها، سطوح ناحیه مناسب برای کشتیرانی نیز زیاد می‌گردد و بهترین زاویه برای ایجاد شرایط کشتیرانی زاویه ۴۰ درجه نسبت به خط عمود بر قوس بود. نتایج نشان داد که تغییرات بستر که بعد از احداث سرریزها به وقوع پیوسته، تأثیر بسیار کمی روی کارایی سرریزهای مستغرق و مشخصات جریان در قوس داشت. ایشان اشاره کردند که شیب کناری سرریزها باعث تغییر بیشتر در تغییر جهت جریان شد و همچنین اعلام کردند که زبری بدنه سرریزها تأثیر معنی‌داری روی تغییر جهت جریان نداشت. ایشان در بررسی تأثیر فاصله سرریزها بر منطقه مناسب برای کشتیرانی گزارش دادند که فاصله ۲ الی ۳ برابر طول سرریزها برای قوس‌های با شعاع بیشتر، سطح مناسب برای کشتیرانی را افزایش داد.

Jarrahzade and Shafai Bejestan (2011) در مطالعه‌ای به مقایسه ماکزیمم عمق آبشستگی در خط ساحل و دماغه سرریزهای مستغرق در قوس ۹۰ درجه تند پرداختند. 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.

Mashkooriniya *et al.* (2010) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی تأثیر طول آبشکن مستغرق بر میزان آبشستگی ساحل خارجی قوس ۹۰ درجه پرداختند. در آزمایش‌های آنها تعداد ۷ آبشکن با فاصله ثابت ۴ برابر طول سرریز از هم، با ارتفاع ثابت ۳۳ درصد عمق آب ورودی به کانال و با طول‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال، در ساحل خارجی قوس ۹۰ درجه احداث شدند. نتایج مطالعات آنان نشان داد با افزایش عدد فرود، میزان عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. همچنین ماکزیمم عمق آبشستگی که در حوالی رأس قوس رخ داده بود در آبشکن مستغرق با طول ۲۵ درصد، کمترین مقدار را داشته که طول زیاد این سازه موجب دور کردن هرچه بیشتر جریان غالب از ساحل خارجی شده است.

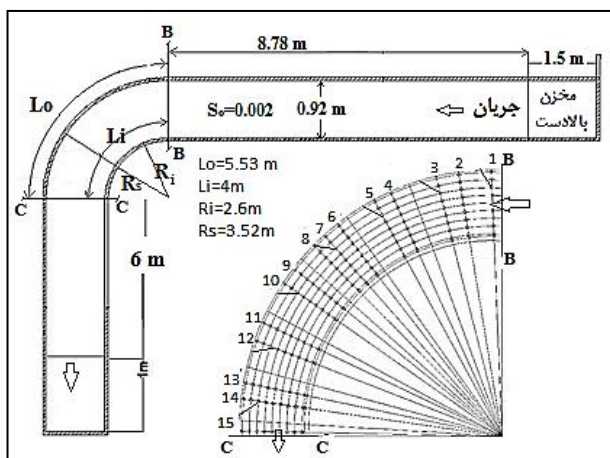
Lyn and Cunningham (2011) به بررسی اثر سرریزهای مستغرق بر کنترل فرسایش در قوس ۹۰ درجه با شعاع نسبی  $3/3$  پرداختند. آنها مشخصات سرریزها را بر اساس راهنمای Hec-23 طراحی کردند که در آن زاویه، طول و فاصله سرریزها در تمامی آزمایش‌ها ثابت و به ترتیب برابر با ۷۵ درجه، ۲۵

شیب تاج، مربوط به آبشکن‌ها بوده و مطالعات بسیار اندکی در مورد اثر شیب تاج بر عملکرد سرریزهای مستغرق انجام گرفته است. لذا تحقیق حاضر سعی دارد به بررسی اثر شیب تاج و ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت در یک قوس ۹۰ درجه ملایم بپردازد.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر فرهودی در گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، انجام یافت. کانال آزمایشگاهی موجود، یک کانال مستطیلی با پیچ ۹۰ درجه می‌باشد. این کانال از یک بازه مستقیم به طول ۹ متر در بالادست و یک بازه مستقیم در پایین دست به طول ۶ متر تشکیل شده است که این دو بازه مستقیم توسط یک پیچ ۹۰ درجه با شعاع انحنای نسبی ۳/۳ به هم متصل شده‌اند. عمق کانال ۶۰ سانتی‌متر و عرض آن ۹۲ سانتی‌متر می‌باشد. شکل (۱) پلان فلوم را به طور کامل نشان می‌دهد.



شکل ۱. مشخصات مدل آزمایشگاهی و جزئیات مقاطع در قوس

### معرفی پارامترها و متغیرهای مربوط به سرریزهای مستغرق

به منظور تعیین پارامترها و متغیرهای مربوط به سازه‌ها، از راهنمای Hec-23 (Lagasse *et al.*, 2009) استفاده گردید. زاویه احداث سرریزها در تحقیق حاضر ثابت و برابر با ۶۰ درجه انتخاب گردید. زاویه سرریز در واقع همان زاویه محور مرکزی سرریز با خط مماس بر قوس در نقطه احداث سرریز می‌باشد. طراحی سرریز به گونه‌ای بود که طول (تصویر واقعی طول تاج در امتداد شعاع قوس) آن ۳۰ درصد عرض سطح آب و برابر با ۳۲ سانتی‌متر بود. همچنین فاصله بین سرریزها در طول تمامی آزمایش‌ها ثابت و ۳ برابر طول سرریزها (برابر ۸۲ سانتی‌متر)

نتایج Heintz (2002) و Darrow (2004) در مطالعه‌ای در دانشگاه کلرادو که بر روی مدل کج رودخانه میدل ریو گرند انجام شد نشان داد که سرعت در قوس خارجی با حضور سرریزهای مستغرق در حدود ۲۰ الی ۴۰ درصد نسبت به ماکزیمم سرعت در مرکز کانال در حالت بدون سازه کاهش یافت. همچنین ایشان اشاره کردند بطور متوسط، سرعت در مرکز کانال بعد از احداث سرریزها ۱/۴ برابر حالت بدون سازه و مقدار آن در ساحل داخلی بعد از احداث سازه‌ها ۱/۴۷۸ برابر سرعت در مرکز کانال در حالت بدون سازه می‌باشد.

نتایج مطالعه Hemmati (2012) نشان داد که احداث سرریزهای مستغرق باعث ایجاد پدیده پس‌زدگی آب (back water) نمی‌شود. همچنین ایشان گزارش دادند که بطور متوسط احداث سرریزهای مستغرق با شیب تاج تخت باعث کاهش ۲۵ درصدی سرعت در قوس خارجی نسبت به متوسط سرعت مقطع در حالت بدون سازه شد که این مقدار در حدود ۱۸ درصد برای مطالعه Kinzli (2005) بود. Acharya and Gautam (2012) با اندازه‌گیری سرعت در مقاطع مختلف از قوس یک رودخانه با وجود سرریزهای مستغرق و آبشکن گزارش دادند که عملکرد سرریزهای مستغرق در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی بهتر از آبشکن‌ها می‌باشد. Hemmati *et al.* (2015) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در یک رودخانه پیچان‌رودی با بستر زنده، فرمولی را جهت تعیین عمق آبستگي در دماغه سرریزهای تخت و شیب‌دار پیش‌بینی نمودند و گزارش دادند که آبستگي در دماغه سرریزهای با شیب تاج تخت در حدود ۳ برابر مقدار آن در دماغه سرریزهای با شیب تاج ۱۰ و ۲۰ درصد می‌باشد. در سال ۱۹۹۸ در رودخانه میسوری شیب تاج سرریزهای مستغرق ۱۰ درصد انتخاب شد که این امر باعث شد سرریزها در شرایط مختلف هیدرولیکی بخوبی کار کنند (Lagrone and Remus, 1998). Maza Alverza (1989) گزارش داد که آبستگي کمتری در دماغه آبشکن‌های شیب‌دار مشاهده گردید و مواد مورد نیاز برای ساخت این سازه‌ها در حدود ۴۰ الی ۷۰ درصد کاهش یافت. Brown (1985) پیشنهاد داد که آبشکن‌های نفوذپذیر باید با تاج افقی ساخته شوند در حالی که آبشکن‌های نفوذ ناپذیر باید با شیب کمی ساخته شوند تا بتوانند جریان‌های متفاوتی را عبور دهند.

بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه سرریزهای مستغرق مربوط به مشخصات طول، زاویه، فاصله و دیگر پارامترهای هندسی این نوع سازه‌ها می‌باشد و در ارتباط با ارتفاع و شیب تاج سرریزها مطالعات اندک می‌باشد. همچنین بیشتر مطالعات انجام یافته در مورد

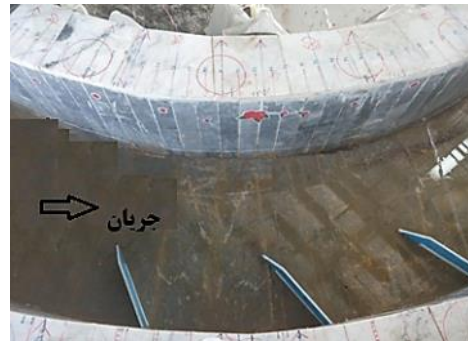
عدد فرود جریان در این آزمایش‌ها برابر با ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۳۵ به ترتیب برای دبی‌های ۵۵، ۶۶ و ۷۷ لیتر در ثانیه بود. برای کنترل عمق جریان در داخل کانال از دریچه کشویی واقع در پایین دست کانال استفاده گردید. در حالت دوم، تعداد ۷ عدد سرریز با مشخصات هندسی مختلف در قوس خارجی احداث گردید. اندازه‌گیری‌های سرعت در هر آزمایش در دو تراز نزدیک سطح آب و نزدیک بستر با فواصل ۱۰ سانتی‌متری در عرض کانال و در مقاطع مختلف (شکل ۱) انجام گرفت. شکل (۱) پلان نقاط برداشت سرعت در قوس را نشان می‌دهد.

## نتایج و بحث

### بررسی تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت در مقاطع مختلف نسبت متوسط سرعت سطحی جریان با وجود سرریزهای مستغرق به متوسط سرعت سطحی در حالت بدون سازه  $(R_v)_s$  برای ارتفاع‌های مختلف سرریز در مقاطع مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳) ملاحظه می‌گردد صرفنظر از تأثیر ارتفاع سرریزها، سرعت سطحی نسبی در سمت قوس خارجی کمتر از ۱ بوده و در سمت قوس داخلی بیشتر از ۱ می‌باشد. این بدان معنی است که با احداث سرریزها در سمت قوس خارجی، مقدار سرعت نسبت به حالت بدون سازه در سمت قوس خارجی کاهش و در سمت قوس داخلی افزایش می‌یابد. این روند در تمام مقاطع از قوس ۹۰ درجه یکسان می‌باشد (شکل ۳). روند تغییرات سرعت نسبی سطحی برای سرعت نسبی در نزدیک بستر نیز صادق می‌باشد؛ بطوریکه در تمامی مقاطع سرعت نسبی نزدیک بستر نیز همانند سرعت نسبی سطحی در سمت قوس خارجی کاهش و در سمت قوس داخلی افزایش می‌یابد (شکل ۴). نتایج شکل‌های (۳) و (۴) نشان دهنده تأثیر بیشتر سرریزهای بلند بر تغییر سرعت نسبی سطحی و نزدیک بستر در مقاطع مختلف می‌باشد؛ بطوریکه تأثیر سرریزهای با ارتفاع ۰/۷y در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی بیشتر از سرریزهای با ارتفاع ۰/۵y بوده و آنهم بیشتر از ارتفاع ۰/۳y می‌باشد. همچنین سرریزهای با ارتفاع بیشتر تأثیر بیشتری در افزایش مقدار سرعت نسبی در سمت قوس داخلی دارند. زیرا سطح مقطع اشغال شده کانال توسط سرریزهای بلندتر در سمت قوس خارجی بیشتر بوده و به این دلیل حجم بیشتری از جریان به سمت قوس داخلی هدایت می‌شود که این امر باعث افزایش بیشتر سرعت در این ناحیه می‌گردد. افزایش سرعت در سمت قوس داخلی می‌تواند باعث

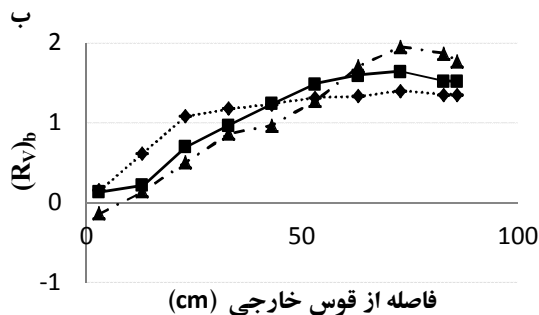
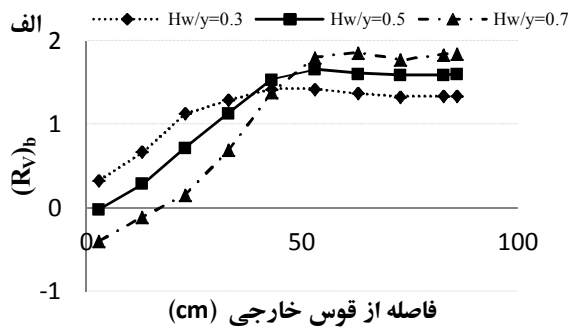
انتخاب گردید. ارتفاع سازه‌ها ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد عمق آب و به ترتیب برابر ۵/۴، ۹ و ۱۲ سانتی‌متر و تاج سرریزها با سه شیب تخت، ۵ درصد و ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. لازم به توضیح می‌باشد که انتخاب شیب تاج سرریز بر اساس توصیه Hemmati (2012) انتخاب گردید. لازم بذکر می‌باشد که بطور متوسط سطح مقطع اشغال‌شده کانال توسط سرریزهای با شیب تاج ۵ و ۱۰ درصد به ترتیب در حدود ۹ و ۱۸ درصد نسبت به حالت شیب تخت کاهش یافت. سرریزها از جنس پلاستیک فشرده بدون انعطاف با ضخامت ۱ سانتی‌متر تهیه شدند. برای استقرار سرریزها در قوس خارجی کانال از ریل‌های متصل به کف و برای آب‌بندی آن‌ها از چسب آکوارיום استفاده گردید. شکل (۲) استقرار سرریزها را در فلوم نشان می‌دهد.



شکل ۲. استقرار سرریزها در فلوم

### نحوه انجام آزمایش‌ها

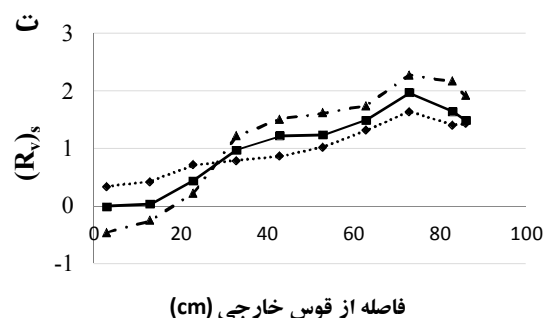
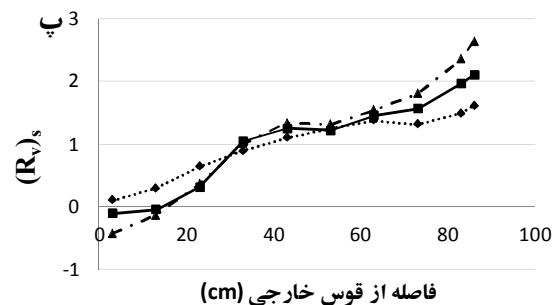
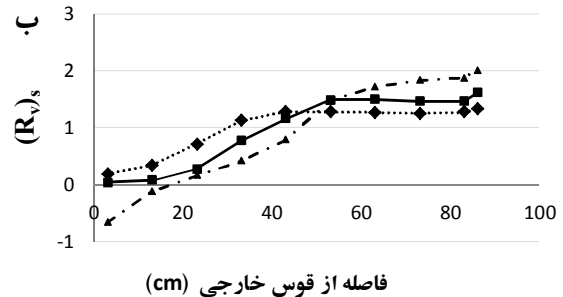
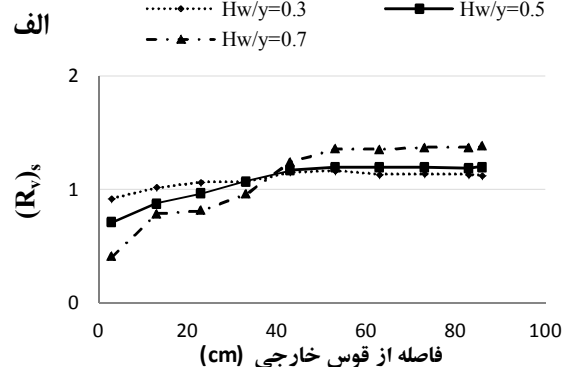
در این مطالعه آزمایش‌ها به دو صورت قبل و بعد از احداث سرریزها صورت گرفت. در حالت اول، آب با سه دبی ۵۵، ۶۶ و ۷۷ لیتر در ثانیه وارد کانال شد و بعد از تنظیم دبی و عمق مورد نظر در کانال، اندازه‌گیری سرعت با استفاده از سرعت‌سنج الکترومغناطیسی دو بعدی ACM2-RS ساخت شرکت ژاپن در مقطع (۱۵ مقطع) نشان داده شده در شکل (۱) صورت گرفت که دقت سرعت‌سنج مذکور  $\pm 2\%$  یا  $\pm 0.5 \text{ cm/s}$  می‌باشد. جهت اندازه‌گیری دبی ورودی به فلوم از یک دستگاه دبی سنج فراصوتی (Ultrasonic Flow Meter) نوع UFM 610P از محصولات KROHNE با دقت  $\pm 2\%$  استفاده گردید. به منظور قرائت تراز سطح آب و عمق جریان در آزمایش‌ها از یک دستگاه عمق سنج نقطه‌ای مکانیکی (Point Gauge) با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده گردید. لازم به ذکر می‌باشد که با توجه به متغیر بودن ارتفاع سرریزها در تحقیق حاضر و اینکه ارتفاع سرریزها درصدی از عمق جریان می‌باشد؛ لذا بدین منظور عمق آب در تمامی آزمایش‌ها ثابت (برابر با ۱۸ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد که با تغییر میزان دبی، عدد فرود جریان تغییر می‌یافت. مقدار



شکل ۴- تأثیر ارتفاع نسبی سازه‌ها بر توزیع سرعت نسبی نزدیک بستر در الف) مقطع ۹ و ب) مقطع ۱۳؛ ( $Q=77 \text{ l/s}$ ,  $S_w = 0\%$ )

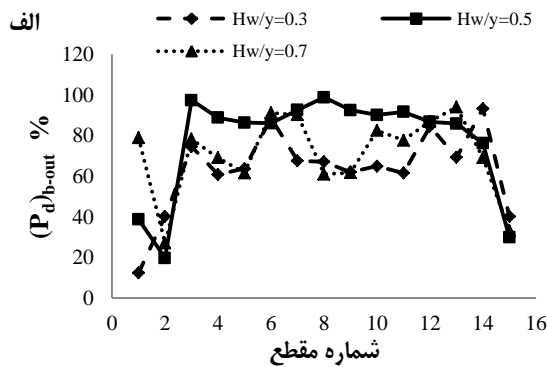
متوسط درصد افزایشی سرعت سطحی و سرعت نزدیک بستر در سمت قوس داخلی بعد از احداث سازه‌ها نسبت به حالت بدون سازه در مقاطع مختلف در شکل (۵) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد تأثیر سرریزهای مستغرق پیچ آبراهه بر افزایش سرعت سطحی در قوس داخلی در بخش میانی قوس (مقاطع ۸ و ۹) بیشتر از ابتدا و انتهای قوس می‌باشد. به عبارتی دیگر احداث این سازه‌ها علاوه بر افزایش سرعت سطحی در تمام مقاطع در طول قوس داخلی، باعث افزایش بیشتر آن در بخش میانی (رأس قوس) قوس داخلی؛ جایی که تپه رسوبی شکل می‌گیرد (Hemmati, 2012) می‌گردد (شکل ۵). علاوه بر آن شکل (۵) نشان دهنده‌ی تأثیر بیشتر سرریز با ارتفاع  $0.7y$  بر متوسط میزان افزایش سرعت در تمام مقاطع در طول قوس داخلی می‌باشد؛ بطوریکه این سرریزها باعث افزایش ۱۷۰ درصدی سرعت در مقاطع ۸ و ۹ قوس نسبت به حالت بدون سازه در سرریزهای تخت (شکل ۵ - الف) شده است. این در حالی است که سرریزهای با ارتفاع  $0.5y$  و  $0.3y$  با شیب تاج تخت به ترتیب باعث افزایش ۱۱۰ و ۶۰ درصدی سرعت در این مقاطع شده است (شکل ۵ - الف). این مقادیر در سرریزهای با شیب تاج ۱۰ درصد تا حدودی کمتر از مقادیر مربوط به سرریزهای تخت می‌باشد (شکل ۵ - ب). روند تغییرات افزایش سرعت نزدیک بستر در سمت قوس داخلی تا حدودی متفاوت با سرعت سطحی می‌باشد؛ بطوریکه سرعت نسبی در نزدیک بستر

فرسایش تپه رسوبی موجود در این ناحیه شده که در نتیجه آن عرض کانال در قوس افزایش می‌یابد (Hemmati et al., 2012). مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان داد که بعد از احداث سرریزهای مستغرق در قوس، شدت گردابه‌ها و تلاطم ایجاد شده در اطراف اولین و آخرین سازه احداثی بیشتر از بقیه سرریزها بوده که تلاطم جریان با افزایش ارتفاع سرریزها بیشتر و با افزایش شیب تاج سرریزها، کاهش می‌یافت.

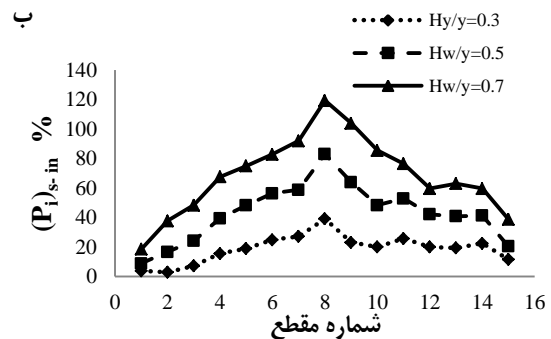
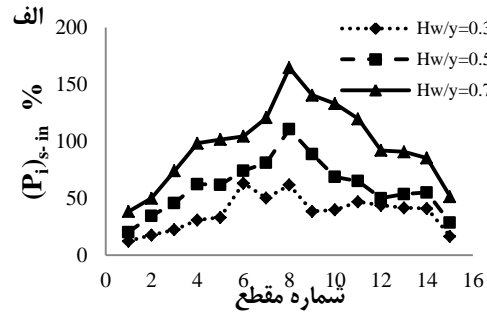


شکل ۳- تأثیر ارتفاع نسبی سازه‌ها بر توزیع سرعت سطحی نسبی در الف) مقطع ۱؛ ب) مقطع ۵؛ پ) مقطع ۹ و ت) مقطع ۱۳؛ ( $Q=77 \text{ l/s}$ ,  $S_w = 0\%$ )

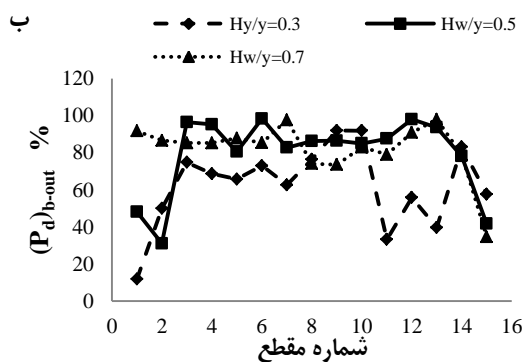
به دلیل تشکیل گردابه‌های ناشی از احداث سرریزها در سمت قوس خارجی، مقدار سرعت در برخی نقاط قوس منفی می‌باشد که در بررسی اثر ارتفاع سرریزها بر درصد کاهش سرعت در محدوده احداثی این نوع سازه‌ها از اندازه‌ی سرعت استفاده گردید. شکل‌های (۷- الف) و (۷- ب) نتایج مربوط به تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر متوسط درصد کاهش سرعت در نزدیک بستر در سمت قوس خارجی را به ترتیب برای سرریزهای با شیب تاج تخت و شیب تاج ۱۰ درصد نشان می‌دهد. با مقایسه دو شکل مذکور ملاحظه می‌گردد که روند تغییرات در هر دو شکل یکسان بوده و بطور کلی سرریزهای با ارتفاع ۰/۵ برابر عمق آب تأثیر بیشتری در کاهش اندازه سرعت در محدوده احداثی سرریزها در بخش قوس خارجی دارند.



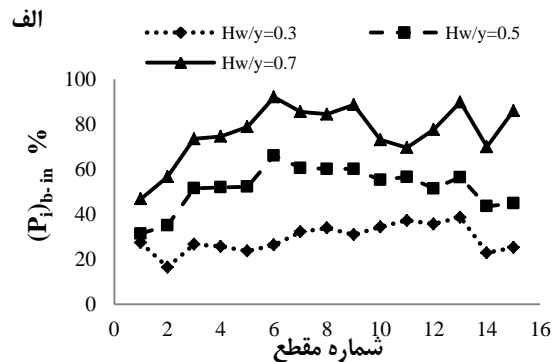
در اکثر مقاطع برای سرریزهای تخت (شکل ۶- الف) و شیب-دار (شکل ۶- ب) مقداری یکسان دارد؛ در حالی که در نزدیک سطح آب چنین نیست (شکل ۵).



شکل ۵- تأثیر ارتفاع نسبی سازه‌ها بر متوسط درصد افزایش سرعت سطحی در بخش قوس داخلی در سرریزهای با شیب تاج الف) تخت، ب) ۱۰ درصد



شکل ۷- تأثیر ارتفاع نسبی سازه‌ها بر درصد کاهش متوسط اندازه سرعت نزدیک بستر در قوس خارجی در الف) شیب تخت و ب) شیب تاج ۱۰ درصد



شکل ۶- تأثیر ارتفاع نسبی سازه‌ها بر متوسط درصد افزایش سرعت نزدیک بستر در بخش قوس داخلی در سرریزهای با شیب تاج الف) تخت، ب) شیب تاج ۱۰ درصد

متوسط درصد افزایشی سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر در ارتفاع‌های نسبی مختلف برای سرریزهای شیب‌دار و تخت در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در تمامی شیب‌های تاج سرریز، با افزایش ارتفاع نسبی سازه‌ها متوسط مقادیر سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر در تمامی مقاطع افزایش می‌یابد. علاوه بر آن ملاحظه می‌گردد که مقادیر مربوط به متوسط درصد افزایشی سرعت در سمت قوس داخلی برای سرعت سطحی بیشتر از سرعت در نزدیک بستر می‌باشد.

۲۹، ۵۱ و ۷۹ درصد افزایش یافته است؛ در حالی که متوسط مقادیر سرعت در نزدیک بستر در ارتفاعهای مذکور به ترتیب برابر با ۲۳، ۴۴ و ۶۴ درصد افزایش را نشان می‌دهد (جدول ۲). مقادیر متوسط سرعت سطحی در سمت قوس خارجی برای سرریزهای با ارتفاع ۰/۳y، ۰/۵y و ۰/۷y به ترتیب ۵۸، ۸۷ و ۷۸ درصد کاهش و همین‌طور سرعت‌های نزدیک بستر نیز به ترتیب ۶۱، ۸۱ و ۷۵ درصد کاهش یافته است (جدول ۲). بطور کلی می‌توان گفت که سرریزهای با ارتفاع ۰/۷y با شیب تاج تخت در افزایش سرعت در سمت قوس داخلی و سرریزهای با ارتفاع ۰/۵y با شیب تاج ۵ درصد در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی عملکرد مناسبی را ایجاد نمودند.

بطور متوسط، سرریزهای تخت با ارتفاع ۰/۳y، ۰/۵y و ۰/۷y به ترتیب باعث افزایش ۳۸، ۶۰ و ۹۵ درصدی سرعت در نزدیک سطح آب شده است در حالی که در سرریزهای با شیب تاج ۱۰ درصد این مقادیر به ترتیب برابر با ۲۳، ۴۶ و ۷۰ درصد می‌باشد. علاوه بر آن با افزایش ارتفاع سرریزها از ۰/۳y الی ۰/۷y مقادیر سرعت نزدیک بستر برای سرریزهای تخت از ۳۱ الی ۷۷ درصد، برای سرریزهای با شیب تاج ۵ درصد از ۲۱ الی ۵۸ درصد و برای سرریز با شیب تاج ۱۰ درصد از ۱۵ الی ۵۸ درصد نسبت به حالت بدون سازه در سمت قوس داخلی افزایش یافته است (جدول ۱). متوسط مقادیر سرعت سطحی در هر سه شیب تاج برای سرریزهای با ارتفاع ۰/۳y، ۰/۵y و ۰/۷y به ترتیب برابر با

جدول ۱- تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر متوسط درصد افزایش (+) سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر در قوس داخلی در تمام مقاطع

شیب تاج (درصد)	تخت			۵ درصد			۱۰ درصد		
	۰/۳y	۰/۵y	۰/۷y	۰/۳y	۰/۵y	۰/۷y	۰/۳y	۰/۵y	۰/۷y
ارتفاع سرریز	۳۸	۶۰	۹۵	۲۶	۴۷	۷۳	۲۳	۴۶	۷۰
سطحی	۳۱	۵۴	۷۷	۲۱	۴۰	۵۸	۱۸	۳۸	۵۸
نزدیک بستر									

جدول ۲- تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر متوسط درصد افزایش (+) و کاهش (-) سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر

ارتفاع سرریزها	سطحی			نزدیک بستر		
	۰/۳y	۰/۵y	۰/۷y	۰/۳y	۰/۵y	۰/۷y
در سمت قوس داخلی	+۲۹	+۵۱	+۷۹	+۲۳	+۴۴	+۶۴
در سمت قوس خارجی	-۵۸	-۸۷	-۷۸	-۶۱	-۸۱	-۷۵

#### تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت

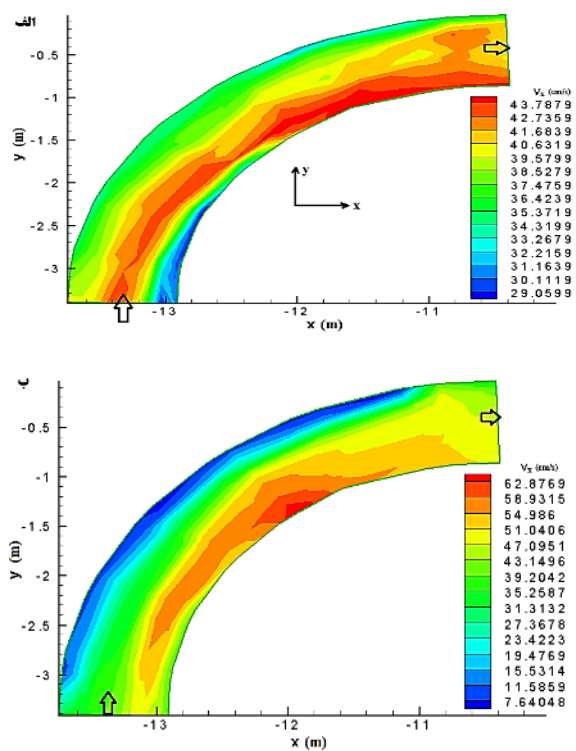
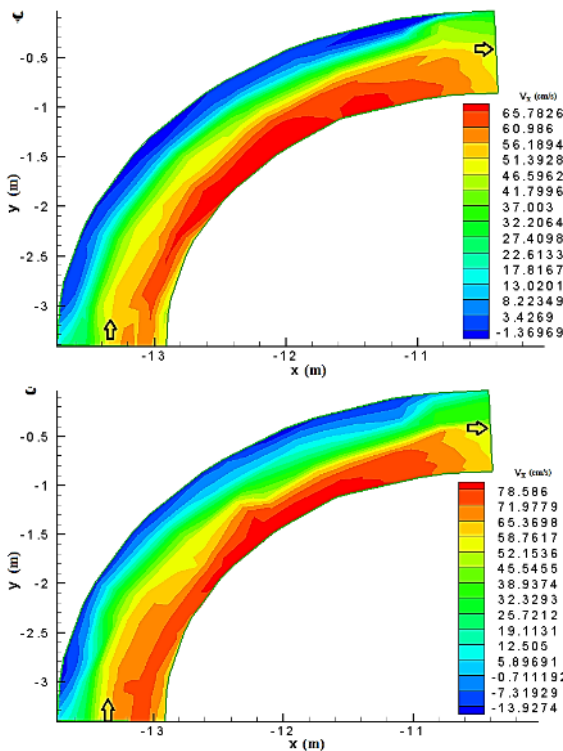
به منظور بررسی اثر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت سطحی در کل قوس از سرعت‌های طولی در جهت جریان ( $V_x$ ) استفاده گردید. برای این منظور، داده‌های سرعت دو بعدی و مختصات آنها وارد نرم‌افزار Tecplot (9.0) گردید که نتایج آن در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود توزیع سرعت طولی جریان ( $V_x$ ) در محدوده قوس ۹۰ درجه، با جایگذاری سرریزها دارای تغییرات قابل توجهی می‌باشد؛ بطوریکه با احداث این سازه‌ها، سرعت در طول قوس خارجی کاهش و در سمت قوس داخلی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. افزایش ارتفاع سرریزها بر تغییرات سرعت سطحی در سمت قوس خارجی و داخلی بیشتر تأثیر می‌گذارد. با افزایش بیشتر ارتفاع سرریزها (بویژه سرریزهای با ارتفاع ۰/۷y) (شکل ۸-ت) تلاطم جریان در سمت قوس خارجی بیشتر (بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی) و سرعت در محدوده احداثی این سازه‌ها دارای مقادیر منفی می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که بعد از احداث سرریزها سرعت در سمت قوس داخلی افزایش یافته است که با افزایش ارتفاع سرریزها بر میزان سرعت در این بخش

#### نتایج مطالعه Acharya and Gautam (2012) نشان داد

که مقدار سرعت نسبی با وجود سرریزهای مستغرق در سمت قوس خارجی بطور صد در صد تا فاصله ۴/۵ متری از دیواره قوس خارجی کاهش یافته و در مرکز کانال مقدار آن افزایش یافته است. اما با وجود آبشکن‌ها، مقدار سرعت نسبی تا فاصله کمی از قوس خارجی (۱/۷ متری) کاهش یافته است. در مطالعه آنها از نسبت سرعت متوسط‌گیری شده در عمق جریان به ماکزیمم مقدار سرعت متوسط در همان مقطع ( $V/V_{max}$ ) استفاده شده است. همچنین Hemmati (2012) گزارش داد که احداث سرریزهای تخت در قوس مرکزی یک مدل پیچان‌رودی باعث کاهش ۵۵ درصدی سرعت متوسط در سمت قوس خارجی و افزایش ۲۰ درصدی آن در سمت دیواره قوس داخلی نسبت به متوسط سرعت همان مقطع در حالت بدون سازه می‌گردد. هر چند که در تحقیق حاضر سرعت نسبی تعریف متفاوتی با مطالعه Acharya and Gautam (2012) و Hemmati (2012) دارد؛ اما نتایج هر سه تحقیق بیانگر تأثیر مثبت و قابل توجه این نوع سازه‌ها در کاهش مقدار سرعت در سمت قوس خارجی و افزایش آن در قوس داخلی می‌باشد.

ب، پ و ت) مقدار سرعت سطحی جریان بیشتر از سایر قسمتهای قوس خارجی می‌باشد. تسخیر جریان در سمت قوس خارجی توسط سرریزهای مستغرق و هدایت آن به سمت مرکز کانال و قوس داخلی در شکل‌های ۸-ب الی ۸-ت کاملاً مشهود می‌باشد؛ بطوریکه اثر سرریزهای با ارتفاع بیشتر مشهودتر می‌باشد (شکل ۸-ت). بطور کلی شکل (۸) بیانگر تأثیر معنی‌دار سرریزهای مستغرق بر تغییر مسیر جریان از سمت قوس خارجی به سمت قوس داخلی می‌باشد.

افزوده می‌شود. زیرا حجم جریان تسخیر شده توسط سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد عمق آب و هدایت آن به سمت قوس داخلی بیشتر از بقیه حالتها می‌باشد. علاوه بر آن با افزایش ارتفاع سرریز، سطح اشغال شده کانال توسط سازه زیاد می‌شود و جریان از سطح مقطع کوچک‌تری عبور می‌نماید که این امر باعث افزایش سرعت در جلو سرریزها و سمت قوس داخلی می‌شود. بعد از احداث سرریزها در بخش ابتدایی و انتهایی قوس در سمت قوس خارجی در هر سه ارتفاع سرریزها (شکل‌های ۸-



شکل ۸: تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت سطحی برای دبی ثابت ۷۷ لیتر بر ثانیه در؛ الف) حالت بدون سازه، ب)  $H_w/y=0.3$ ، پ)  $H_w/y=0.5$  و ت)  $H_w/y=0.7$

تشخیص می‌باشد. بطور کلی می‌توان گفت که احداث سرریزها در بخش قوس خارجی از نظر تغییر جهت الگوی جریان از بخش خارجی قوس به بخش میانی و داخلی قوس که جزء اهداف سرریزهای مستغرق می‌باشد موثر بوده و می‌تواند فرسایش دیواره خارجی قوس را کنترل نماید.

### بررسی تأثیر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان

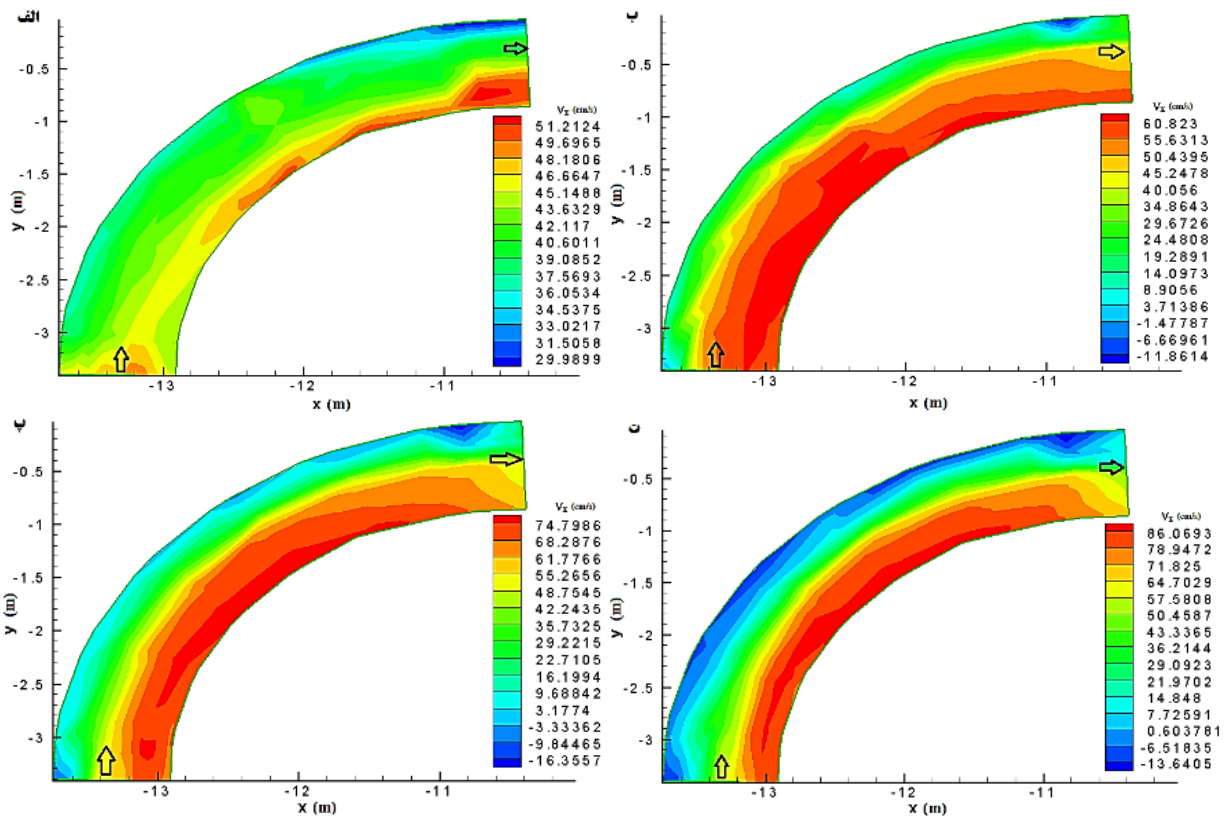
تأثیر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر تغییرات سرعت در قوس خارجی و داخلی  
نتایج مربوط به تأثیر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت نسبی سطحی با وجود سازه به حالت بدون آن ( $R_{v-s}$ ) در

اما توزیع سرعت طولی جریان در نزدیک بستر تا حدودی متفاوت از سرعت سطحی بویژه در سمت قوس خارجی می‌باشد (شکل ۹). سرعت جریان در نزدیک بستر در بخش‌های ابتدایی و انتهایی قوس مشابه سرعت سطحی نبوده و با کاهش قابل توجهی مواجه بوده است. همچنین مقادیر سرعت نزدیک بستر در بخش قوس خارجی منفی بوده که این امر حاکی از وجود گردابه‌ها و تلاطم در بین سرریزها می‌باشد در حالی که در نزدیک سطح آب مقادیر سرعت با وجود کاهش قابل توجه، منفی نمی‌باشد. علاوه بر آن با مقایسه شکل‌های ۸-ب و ۹-ب ملاحظه می‌گردد که سرعت در نزدیک بستر در کل محدوده قوس داخلی و مرکز کانال نسبت به سرعت سطحی دارای افزایش قابل ملاحظه‌ای است که این امر در کلیه حالتها قابل

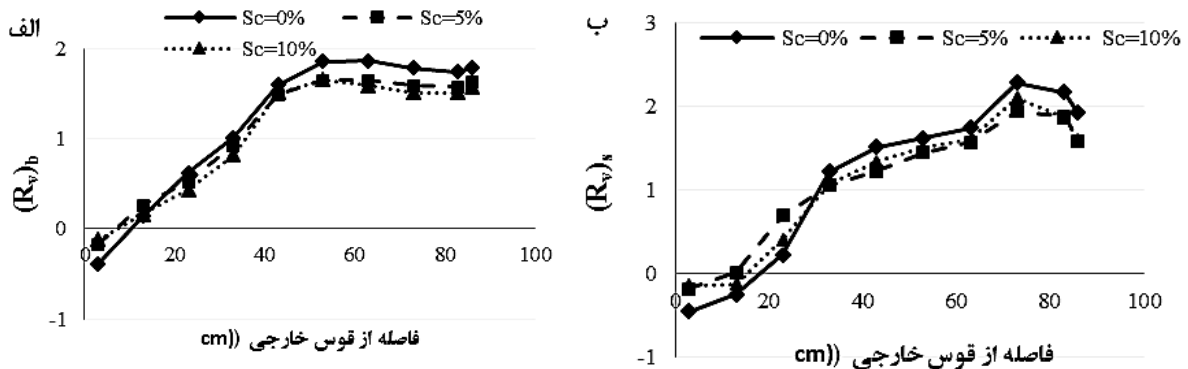


قوس داخلی می‌گردد. همچنین مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که شدت گردابه‌های شکل گرفته در اطراف سرریزهای شیب‌دار کمتر از سرریزهای تخت می‌باشد. عملکرد سرریزهای با شیب تاج ۵ و ۱۰ درصد در افزایش و کاهش سرعت به ترتیب در سمت قوس داخلی و خارجی تا حدودی یکسان می‌باشد (شکل ۱۰). روند تغییرات سرعت نسبی در نزدیک بستر نیز مشابه تغییرات سرعت نسبی در نزدیک سطح آب می‌باشد (شکل ۱۱).

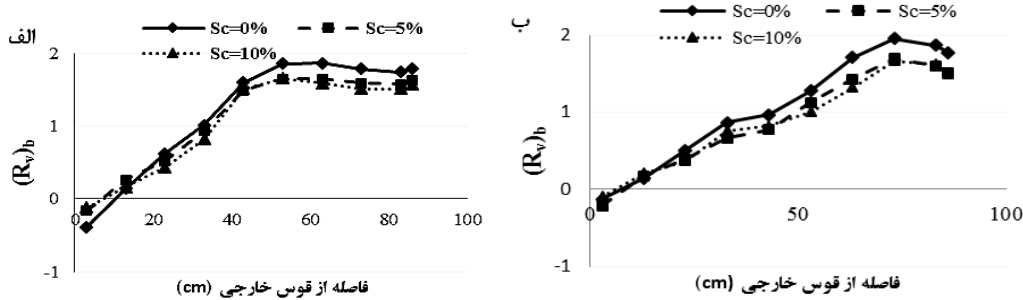
شکل ۱۰ نشان دهنده کاهش سرعت در سمت قوس خارجی و افزایش آن در سمت قوس داخلی می‌باشد که در آن تأثیر شیب تاج تخت تا حدودی بیشتر از سایر شیب‌ها می‌باشد. این روند در تمامی مقاطع قوس مشابه هم بوده که برای نمونه نتایج مقاطع (۵) و (۱۳) ارائه شده است. سرریزهای تخت حجم بیشتری از جریان را تسخیر و به سمت قوس داخلی و مرکز کانال هدایت می‌کنند و همچنین سطح مقطع بیشتری از کانال را نسبت به سرریزهای شیب‌دار اشغال می‌نمایند که این امر موجب کاهش بیشتر سرعت در قوس خارجی و افزایش بیشتر آن در سمت



شکل ۹: تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت نزدیک بستر در دبی ثابت ۷۷ لیتر بر ثانیه در الف) حالت بدون سازه، ب)  $H_w/y=0.3$ ، ج)  $H_w/y=0.5$  و د)  $H_w/y=0.7$



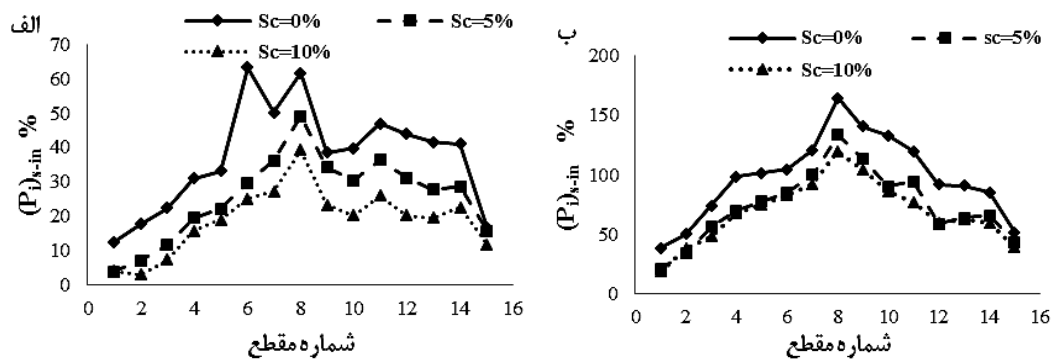
شکل ۱۰- تأثیر شیب تاج سرریزها بر توزیع سرعت نسبی در نزدیک سطح آب در الف) مقطع ۵؛ ب) مقطع ۱۳؛ ( $Q=77 \text{ l/s}, H_w/y = 0.7$ )



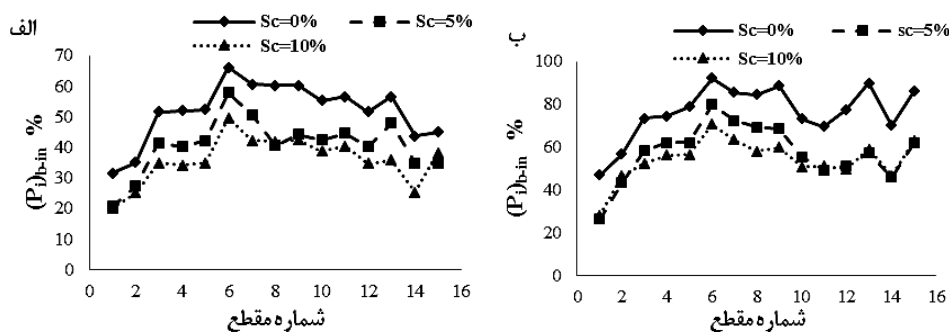
شکل ۱۱- تأثیر شیب تاج سرریزها بر توزیع نسبی سرعت نزدیک بستر در الف) مقطع ۵؛ ب) مقطع ۱۳؛ ( $Q=77 \text{ l/s}$ ,  $H_w/y=0.7$ )

شیب‌دار در بخش قوس داخلی می‌باشد. بطور متوسط سرریزهای تخت، شیب تاج ۵ درصد و شیب تاج ۱۰ درصد به ترتیب باعث افزایش ۶۴، ۴۹ و ۴۶ درصدی سرعت سطحی نسبت به حالت بدون سازه در سمت قوس داخلی شده‌اند که این مقادیر برای سرعت نزدیک بستر به ترتیب برابر با ۵۴، ۳۸ و ۳۸ درصد می‌باشد. همچنین نتایج ارائه شده در جدول (۳) بیانگر این است که مقادیر مربوط به درصد افزایش سرعت سطحی در قوس داخلی بیشتر از سرعت در نزدیک بستر می‌باشد. متوسط مقدار سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر در سمت قوس خارجی در ارتفاع‌های مختلف سرریز، در سرریزهای تخت و شیب‌دار (با شیب تاج ۵ و ۱۰ درصد) تقریباً به یک میزان کاهش یافته است.

نتایج حاصل از درصد افزایش سرعت سطحی در قوس داخلی در شرایط تغییر شیب تاج سرریزهای مستغرق در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در تمامی مقاطع، درصد افزایش متوسط سرعت سطحی در قوس خارجی برای سرریزهای تخت بیشتر از سرریزهای شیب‌دار می‌باشد؛ بطوریکه در هر سه شیب تاج سرریز، درصد افزایش سرعت در مرکز کانال (نزدیک رأس قوس) بیشتر از سایر مقاطع می‌باشد. همچنین نتایج ارائه شده در شکل (۱۳) که مربوط به درصد افزایش سرعت در نزدیک بستر در سمت قوس داخلی می‌باشد، بیانگر تأثیر بیشتر سرریزهای تخت نسبت سرریزهای شیب‌دار در افزایش مقدار سرعت در نزدیک بستر می‌باشد. نتایج جدول (۳) بیانگر اثر بیشتر سرریزهای تخت در افزایش سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر نسبت به حالت‌های



شکل ۱۲: تأثیر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر متوسط درصد افزایش سرعت سطحی در بخش قوس داخلی در سرریزهای با الف)  $H_w/y=0.3$ ؛ ب)  $H_w/y=0.7$



شکل ۱۳: تأثیر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر متوسط درصد افزایش اندازه سرعت نزدیک بستر در قوس داخلی در الف)  $H_w/y=0.5$  و ب)  $H_w/y=0.7$

جدول ۳- تأثیر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر متوسط درصد افزایش (+) و کاهش (-) سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر

سرعت‌های			سطحی			نزدیک بستر		
شیب تاج سرریز (درصد)			تخت	۵	۱۰	تخت	۵	۱۰
در سمت قوس داخلی			+۶۴	+۴۹	+۴۶	+۵۴	+۳۸	+۳۸
در سمت قوس خارجی			-۷۱	-۷۵	-۷۵	-۷۱	-۷۲	-۷۲

### نتیجه‌گیری

حفاظت از دیواره ساحلی رودخانه‌ها امروزه به یکی از مسائل مهم و مورد توجه مهندسين رودخانه تبدیل شده است. هدف از این بررسی، ارائه طرح مناسب از سرریزهای مستغرق در یک پیچ ۹۰ درجه ملایم و بررسی جریان بر روی این نوع سرریز با هدف توزیع مناسب جریان در قوس‌ها می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که:

- صرف‌نظر از تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزها، با احداث سرریزها در قوس خارجی اندازه سرعت در سمت قوس خارجی کاهش و در سمت قوس داخلی افزایش یافت.
- سرریزهای با ارتفاع ۵۰ درصد عمق آب، در تمامی حالات بیشترین تأثیر را بر کاهش سرعت در قوس خارجی داشتند و بطور متوسط سرعت‌های سطحی و نزدیک بستر به ترتیب در حدود ۸۷ و ۸۱ درصد نسبت به حالت بدون سازه کاهش یافته است.
- بیشترین تأثیر در افزایش و هدایت بیشتر آب به سمت قوس داخلی مربوط به سرریزهای تخت با ارتفاع ۰/۷ عمق آب می‌باشد که در آن بطور متوسط سرعت‌های

سطحی و نزدیک بستر به ترتیب در حدود ۷۹ و ۶۴ درصد افزایش یافته است.

- سرریزهای با شیب تاج تخت تأثیر بیشتری در افزایش سرعت در بخش قوس داخلی داشتند و بطور متوسط باعث افزایش ۶۴ درصدی سرعت سطحی و ۵۴ درصدی سرعت در نزدیک بستر نسبت به حالت قبل از احداث سازه‌ها شدند.
- سرریزهای شیب‌دار با شیب تاج ۵ و ۱۰ درصد عملکرد بهتری در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی داشتند و باعث کاهش ۷۵ درصدی سرعت سطحی و ۷۲ درصدی سرعت نزدیک بستر شدند. البته لازم به ذکر است که عملکرد سرریزهای شیب‌دار و تخت نزدیک به هم بود.
- نتایج الگوهای جریان در طول تمام قوس نشان داد که سرریزهای تخت با ارتفاع بیشتر حجم زیادی از جریان را به سمت قوس داخلی هدایت می‌کنند.
- استفاده از سرریزهای با شیب تاج ۵ درصد و با ارتفاع ۰/۵ برابر عمق آب در این نوع قوس‌ها عملکرد بهتری را در خصوص توزیع مناسب جریان در قوس از خود نشان دادند.

### REFERENCES

- Acharya, K. and Gautam, M. (2012). Evaluation of bendway weir bank stabilization techniques for stream restoration. *International Journal of River Basin Management*, 10(2), 171- 176.
- Brown, S.A. (1985). Design of spur-type streambank stabilization structures. FHWA, Report No. FHWA/RD-84.101, Final Report, 98 p.
- 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.
- FHWA, (1997). Bridge scour and stream instability countermeasures (SI). Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular Number 23, FHWA HI-97-030.
- Jarrahzade, F. and Shafai Bejestan, M. (2011). Comparison of maximum scour depth in Bank line and nose of submerged weirs in a sharp bend. *Scientific Research and Essays*, 6(5), 1071-1076.
- Jarrahzade, F. and Shafai Bejestan, M. (2013). Experimental investigation of thalweg under effect of submerged weirs in a 90 degree sharp bend. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 97, 17-29. (In Farsi)
- Julien, P. Y. and Duncan, J. R. (2003). Optimal design criteria of bendway weirs from numerical simulation and physical model studies. Technical paper, Colorado State University, Civil Engineering.
- Hemmati, M. (2012). Experimental investigation on the effect of angle, length and crest slope of bendway weirs on sediment process and flow pattern in meander river. Ph. D. dissertation, University of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran. (In Farsi)
- Hemmati, M., Ghomeshi, M., Kashefipour, S. M., Shafai-Bejestan, M. and Lanzoni, S. (2012). Experimental investigation of the effects of angle

- and length of bendway weirs on scouring and sedimentation in a meander river. *Journal of American Science*, 8(9), 912-917.
- Hemmati, M., Ghomeshi, M. and Kashefipour, S. M. (2013a). Experimental investigation on the effect of angle of bendway weirs on erosion and sedimentation pattern in meander river. *Journal of Iranian Water Resource Research*, 8(3), 66-73. (In Farsi)
- Hemmati, M., Kashefipour, S. M. and Ghomeshi, M. (2013b). Experimental Study on the Effects of Bendway Weirs Length on Sediment Process and Water Level in a Meandering River. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 43(1), 51-60. (In Farsi)
- Hemmati, M., Ghomeshi, M., Ahmadi, H. and Lanzoni, S. (2015). Scour depth around flat and sloped crest bendway weirs: a laboratory study. *International Journal of River Basin Management*. DOI: 10.1080/15715124.1085870.
- Heintz, M.L. (2002). *Investigation of bendway weir spacing*. M.S. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Kinzli, K. (2005). *Effects of bendway weir characteristics on resulting eddy and channel flow conditions*. M.S. Thesis, Colorado State University, Department of Civil Engineering, Fort Collins, CO.
- Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Pagan-Ortiz, J. E., Zevebergen, L. W., Arneson, L. A., Schall, J. D., and Girard, L. G. (2009). Bridge scour and stream stability countermeasures. 3rd ed., vols. 1 and 2, 64 HEC-23, FHWA-NHI-09-111, Federal Highway Administration, U. S. Dept. of Transportation, Washington, D. C.
- Lagrone, D.L., and Remus II, J.I. (1998). Nontraditional erosion control projects constructed on the Missouri river. In: Proceedings of the 1998 *International Water Resources Engineering Conference*, Part 1 of 2, 3-7 Aug., Memphis TN, PP. 399-404.
- Lyn, D. A. and Cunningham, R. (2011). A laboratory study of bendway weirs as a bank erosion countermeasure. Joint Transportation Research Program. Paper 1107. <http://docs.lib.purdue.edu/jtrp/1107>.
- Mashkooriniya, H., Jarrahzade, F., Ramesh, S. and Shafai-Bejestan, M. (2010). Experimental investigation of the effect of bendway weirs length on outer bank erosion in a 90 degree sharp bend. In: Proceedings of 9th *Iranian hydraulic conference*, Tarbiat Modares University, 9-11 November, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Maza Alvarez, J. A. (1989). Design of groynes and spur dikes. In: Proceedings of the 1989 *National Conference on Hydraulic Engineering*, 14-18 Aug., New Orleans, Louisiana, USA, PP. 296-301.
- Ramesh, S., Jarrahzade, F., Mashkooriniya, H. and Shafai-Bejestan, M. (2010). Experimental investigation of the effect of distance between bendway weirs on bed scour in a 90 degree sharp bend. In: Proceedings of 9th *Iranian hydraulic conference*, 9-11 Nov., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Rhoads, B. L. (2003). Protocols for geomorphic characterization of meander bends in Illinois. Dept. of Geography, Univ. Illinois Urbana-Champaign.
- 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, 1427-1436.