

The Effect of Height and Crest Slope of the Submerged Weirs on Erosion and Sedimentation Pattern in a 90° Sharp Bend

MOHSEN SALEHZADEH¹, MOHAMMAD HEMMATI^{1*}, MEHDI YASI², STEFANO LANZONI³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering ICEA, Faculty of Engineering, University of Padua, Padua, Italy.

(Received: Dec. 19, 2020- Revised: Feb. 3, 2021- Accepted: Feb. 8, 2021)

ABSTRACT

Submerged weirs are short-height structures that are completely beneath the water surface and are constructed to improve shipping conditions, create aquatic habitats, control the movement of bends, etc. The purpose of this study was to evaluate the patterns of erosion and sedimentation at a 90° sharp bend. To achieve this goal, a series of weirs with the relative heights of 30% and 70% and crest slopes of 0 and 7% were constructed on the outer wall of the bend. The angle, length, and distance between weirs were kept constant. The results showed that bendway weirs with a relative height of 70% and a flat crest slope had the best performance in protecting the bed near the outer bend wall. With the construction of these structures in the bend, 7% of sedimentation was done near the outer wall at a cross-section corresponding to the maximum scour location in the unstructured state. Changes in the height and crest slope of the bendway weir did not have a significant effect on reducing the maximum relative height of point-bar, and only at Froude number of 0.43 the average maximum relative point-bar height decreased by 10%. Moreover, with increasing the height and crest slope of the weirs, the maximum relative scours depth at the nose of the third weir increased by 11% and decreased by 6%, respectively.

Keywords: Inner wall, Outer wall, Point-bar, Scour, Thalweg.

* Corresponding Author Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر الگوی فرسایش و رسوب در قوس ۹۰ درجه تند

محسن صالح‌زاده^۱، محمد همتی^{۱*}، مهدی یاسی^۲، استفان لانونی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران، معماری و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه پادوا، پادوا، ایتالیا.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰)

چکیده

سرریزهای مستغرق سازه‌هایی با ارتفاع کوتاه هستند که کاملاً زیر سطح آب قرار داشته و جهت بهبود شرایط کشتیرانی، ایجاد زیستگاه آبریان، کنترل جابجایی قوس‌ها و ... احداث می‌شوند. هدف این تحقیق ارزیابی کارایی سرریزهای مستغرق بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس ۹۰ درجه تند می‌باشد. به‌منظور رسیدن به این هدف مجموعه‌ای از سرریزها با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد و شیب تاج صفر و ۷ درصد در دیواره قوس خارجی احداث شدند. زاویه، طول و فاصله بین سرریزها ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد و شیب تاج صفر بهترین عملکرد را در حفاظت بستر نزدیک دیواره قوس خارجی داشت. با احداث این سازه‌ها در قوس، ۷ درصد رسوبگذاری نزدیک دیواره خارجی در مقطعی که منطبق بر محل ماکزیمم آبشستگی در حالت شاهد بود، صورت گرفت. تغییر در ارتفاع و شیب تاج سرریز مستغرق اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی نداشت و فقط در فرود ۰/۴۳ به‌طور متوسط ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی ۱۰ درصد کاهش پیدا کرد. علاوه بر آن، با افزایش ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریز سوم به ترتیب ۱۱ درصد افزایش و ۶ درصد کاهش پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، تپه رسوبی، خط‌القعر، دیواره خارجی، دیواره داخلی.

مقدمه

جابجایی قوس‌ها که در نتیجه فرسایش شدید کناره‌های رودخانه‌های پیمان‌رودی به وجود می‌آید از موارد مهم در مدیریت و مهندسی رودخانه‌ها می‌باشد. یکی از سازه‌هایی که برای کاهش فرسایش و جلوگیری از توسعه آبشستگی دیواره‌های رودخانه‌ها به کار برده می‌شود، سرریزهای مستغرق واقع در قوس آبراهه می‌باشد (Fischenich and Allen, 2000). اگر چه در اصل استفاده از سرریزهای مستغرق برای بهبود شرایط کشتیرانی در رودخانه می‌سی‌سی‌پی توسعه یافت (Abad et al., 2008) اما در سال‌های اخیر استفاده از این سازه‌ها به عنوان یکی از روش‌های مهم در کنترل یا کاهش آبشستگی در رودخانه‌های مئاندری شناخته شده است (Abad et al., 2008). سرریزهای مستغرق پتانسیل عظیمی در حل مشکلات مربوط به ناپایداری‌های عرضی دارند (Hemmati et al., 2013). احداث این سازه‌ها در رودخانه‌های پیمان‌رودی با هر شعاع انحنا قوس، در محدوده وسیعی از سرعت‌ها و اندازه رسوب مناسب می‌باشند (Lagasse et al., 1997).

سرریزهای مستغرق از نظر ظاهری شبیه آبشکن‌های سنگی هستند (FHWA, 1997) با این تفاوت که در مقایسه با آبشکن‌های

معمولی کوتاه و کم ارتفاع بوده و طول بیشتری نسبت به آن‌ها دارند (Hemmati et al., 2012b; Jarrahzadeh and Shafai, 2012). از نظر کاربرد نیز تفاوت قابل‌توجهی دارند؛ آبشکن‌ها معمولاً مستغرق نبوده و جریان عبوری از اطراف آن‌ها قابل روئیت است؛ بنابراین جریان یا در اطراف سازه حرکت می‌کند یا در طول خط ساحل کاهش یافته و از میان سازه عبور می‌کند. سرریزهای مستغرق معمولاً دیده نمی‌شوند و جریان از روی سازه به‌گونه‌ای هدایت می‌شود که با محور سرریز تقریباً زاویه ۹۰ درجه می‌سازد و به سمت مرکز کانال حرکت می‌کند. سرریزهای مستغرق همانند آبشکن‌ها سرعت در نزدیکی ساحل و همچنین تمرکز جریان در ساحل خارجی را کاهش می‌دهند (FHWA, 1997). علاوه بر این استفاده از این سازه‌ها بهبود زیستگاه‌های آبی، زیستگاه ماهی، ایجاد چاله‌های آبشستگی پایدار و توزیع مجدد سرعت و نیز رشد گیاهان ساحلی ناشی از ایجاد گردابه‌ها و چاله‌های آبشستگی پایین دست سازه را به دنبال دارد (Derrick, 1997; Fischenich and Allen, 2000). (1997; Fischenich and Allen, 2000) با اندازه‌گیری سرعت در مقاطع مختلف از قوس یک رودخانه با وجود سرریزهای مستغرق و آبشکن گزارش دادند که

می‌شود، ارتفاع بهینه‌ای برای آن‌ها تعیین نشده است و به نظر می‌رسد اگر ارتفاع آن‌ها بین جریان کم و متوسط باشد قابل قبول خواهد بود (Smith and Wittler, 1998). با بررسی ارتفاع سرریزهای مستغرق با نسبت‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد عمق آب بالادست، مشخص شد که کمترین آبشستگی در دماغه سرریزها مربوط به سرریز با ارتفاع ۳۰ درصد بوده است (Darabi et al., 2017). نتایج تغییرات سرعت جریان و ارتفاع سرریزهای مستغرق نشان داد که افزایش سرعت با افزایش فرسایش همراه بوده و افزایش ارتفاع سرریزها به صورت موضعی و نقطه‌ای باعث افزایش پایداری دیواره خارجی شده است (Cunningham and Lyn, 2016).

(Hemmati et al., 2016) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در یک رودخانه پیچان‌رودی با بستر زنده، فرمولی را جهت تعیین عمق آبشستگی در دماغه سرریزهای تخت و شیب‌دار پیش‌بینی نمودند و گزارش دادند که آبشستگی در دماغه سرریزهای با شیب تاج تخت در حدود ۳ برابر مقدار آن در دماغه سرریزهای با شیب تاج ۱۰ و ۲۰ درصد بوده است. با افزایش شیب تاج سرریزهای مستغرق در یک قوس ۹۰ درجه ملایم عمق آبشستگی در دماغه سرریز کاهش، حجم آبشستگی و ارتفاع تپه رسوبی در دیواره داخلی نیز کاهش یافته است (Hemmati and Darabi, 2019). Maza Alverza (1989) گزارش داد که آبشستگی کمتری در دماغه آبشکن‌های شیب‌دار مشاهده گردید و مواد مورد نیاز برای ساخت این سازه‌ها در حدود ۴۰ الی ۷۰ درصد کاهش یافت.

با بررسی سه نسبت فاصله به طول سرریز (۳، ۴ و ۵) مشخص شد احداث سرریزهای با نسبت فاصله به طول سازه برابر با ۳ عملکرد مناسب‌تری در کنترل فرسایش داشت‌اند (Jarrahzadeh et al., 2010). احداث سرریزهای مستغرق با زاویه‌های ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نشان داد که زاویه‌های ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به ۹۰ درجه عملکرد بهتری در رسوبگذاری بین سرریزها و حفاظت از قوس خارجی داشته‌اند (Hemmati et al., 2012a). (Ramesh et al., 2010) به بررسی تأثیر سه زاویه ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه بر ماکزیم عمق آبشستگی در شرایط هیدرولیکی مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه ۳۰ و ۱۵ درجه به ترتیب کمترین و بیشترین آبشستگی را ایجاد کرده است.

از بین سه نسبت طولی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ (طول مستقیم سرریز به عرض فلوم)، سرریزهای مستغرق با طول نسبی ۰/۲ کمترین حجم آبشستگی را ایجاد کرده است (Mashkoornia and Shafai Bejestan, 2015). از سه زاویه ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه و از

عملکرد سرریزهای مستغرق در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی بهتر از آبشکن‌ها می‌باشد. همچنین راندمان سازه‌های حفاظتی که در عرض رودخانه قرار می‌گیرند همچون سرریزهای مستغرق را می‌توان با ایجاد شیب در تاج سازه بهبود بخشید (Hemmati et al., 2016; Hemmati and Darabi, 2019). اولین بار آقای پوکرفکه (Pokrefke) در سال (1977) در یک مدل فیزیکی با بستر متحرک بر روی بازه‌ای از رودخانه می‌سی‌سی‌پی به منظور کاهش تنش در قوس خارجی رودخانه و بهبود شرایط کشتیرانی، استفاده از این نوع سرریزها را ارائه دادند (Hemmati et al., 2012a). استفاده از این نوع سازه بیشترین توجه را در اواخر دهه (1980) به خود جلب کرد و زمینه نصب درست و راه‌اندازی توسط مهندسين ارتش آمریکا (USACE) و ایستگاه آزمایش آبراهه‌ها (WES) ارائه داده شد. مشکلات فرسایش و کشتیرانی در رودخانه می‌سی‌سی‌پی عاملی برای این مطالعات بود (Derrick, 1999). این سازه‌ها با استفاده از میدانی که در قوس خارجی ایجاد می‌کنند باعث رسوبگذاری در قوس خارجی بین سرریزها و فرسایش دیواره داخلی شده و با توزیع مجدد سرعت باعث ایجاد یک کانال عریض جهت کشتیرانی می‌شوند.

با گذشت زمان کاربرد سرریزهای مستغرق از بهبود وضعیت کشتیرانی در رودخانه‌های بزرگ به کنترل فرسایش در رودخانه‌های کوچک تغییر پیدا کرد (Juliean and Duncan, 2003; Abad et al., 2008; Mashkoornia et al., 2010; Hemmati et al., 2016) و عملکرد آن‌ها با و بدون تغییر در پارامترهای هندسی، به عنوان ابزاری برای تثبیت کانال‌های فرسایشی در قوس‌های مختلف توسط مطالعات (Ramesh et al., 2008). (Abad et al., 2010) Jarrhazadeh and Shafai Bejestan (2012)، (Hemmati et al., 2012a,b) Mashkoornia and Shafai Bejestan (2015)، (Hemmati et al., 2016) Cunningham and Lyn (2016)، (Hemmati and Darabi, 2017) Darabi et al. (2019) مورد بحث و بررسی قرار گرفته، که در ادامه خلاصه‌ای از نتایج این مطالعات ذکر شده است.

نتایج کلیدی بررسی ساختار جریان در یک قوس مئاندری با وجود سرریزهای مستغرق به صورت میدانی و با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی بیانگر وجود سه ناحیه هیدرولیکی عمده در شرایط جریان کم بود: ۱- منطقه سکون یا عدم چرخش جریان بین سرریزها ۲- 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 پایین‌دست دماغه سرریزها بین ناحیه غیر چرخی و ناحیه با سرعت بالا (Abad et al., 2008).

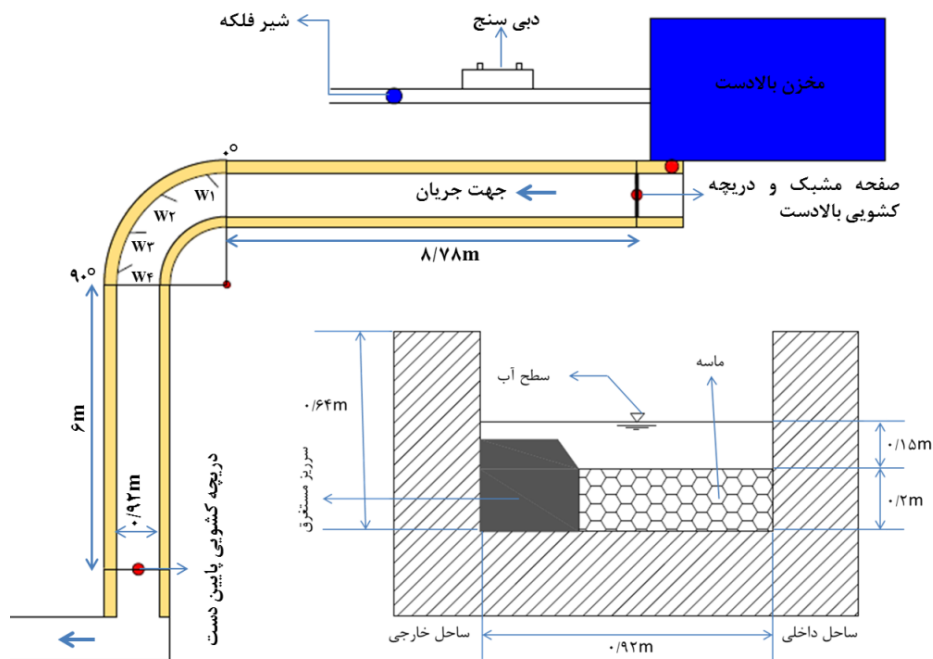
ارتفاع سرریزهای مستغرق نسبت به جریان کم عمق تعیین

مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این مطالعه از فلوم آزمایشگاهی با قوس ۹۰ درجه واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دکتر فرهودی گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه استفاده گردید (شکل ۱). نسبت شعاع انحنا به عرض فلوم ۲/۰۵ می‌باشد که بر اساس تقسیم‌بندی‌های Rozovskii (1957) جزء قوس‌های تند محسوب می‌گردد. در بالادست و پایین‌دست فلوم یک مسیر مستقیم با دیواره صلب و بستر فرسایش‌پذیر به ترتیب با طول‌های ۸/۷۸ و ۶ متر وجود دارد که این بازه‌های مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به همدیگر متصل شده‌اند. جدول (۱) محل استقرار سرریزها در قوس را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۱) در ابتدای فلوم از یک حوضچه آرامش و صفحات مشبک برای ایجاد جریان آرام و جلوگیری از انتقال امواج سطحی به فلوم استفاده شد. ارتفاع عرض فلوم به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۹۲ متر، ضخامت اولیه رسوبات ۰/۲ متر (Z_0)، قطر متوسط ذرات رسوبی ۱/۴ میلی‌متر (d_{50}) و انحراف معیار هندسی ذرات ۱/۲۹ (σ_i) در نظر گرفته شد. در تمامی آزمایش‌ها شرایط آب زلال حاکم بود.

سه نسبت طول ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ در شرایط مختلف هیدرولیکی، زاویه ۷۵ درجه و نسبت طول ۰/۳ بیشترین تأثیر را در عمق آبستنگی دماغه سازه آخر و زاویه ۶۰ درجه و نسبت طول ۰/۴ بیشترین تأثیر را در فرسایش تپه رسوبی در قوس داخلی ایجاد نموده‌اند (Hemmati *et al.*, 2012b)

بررسی منابع مختلف نشان داد که بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه سرریزهای مستغرق مربوط به مشخصات فاصله، طول، زاویه و دیگر پارامترهای هندسی این نوع سازه‌ها می‌باشند و در ارتباط با ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق مخصوصاً در قوس تند تحقیقات کمتری انجام شده است. اگرچه Darabi *et al.* (2017) و Hemmati and Darabi (2019) در ارتباط با شیب تاج و ارتفاع سرریز مطالعاتی انجام داده‌اند اما سرریزهای که مورد استفاده قرار گرفته‌اند فاقد شیب دیواره جانبی و ضخامت تاج بوده است. لذا مطالعه حاضر به بررسی تأثیر شیب تاج و ارتفاع سرریزهای مستغرق (با داشتن ضخامت و شیب دیواره جانبی سرریز) در یک قوس ۹۰ درجه تند بر الگوی رسوب و فرسایش پرداخته است.



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی با جانمایی سرریزهای مستغرق در قوس ۹۰ درجه

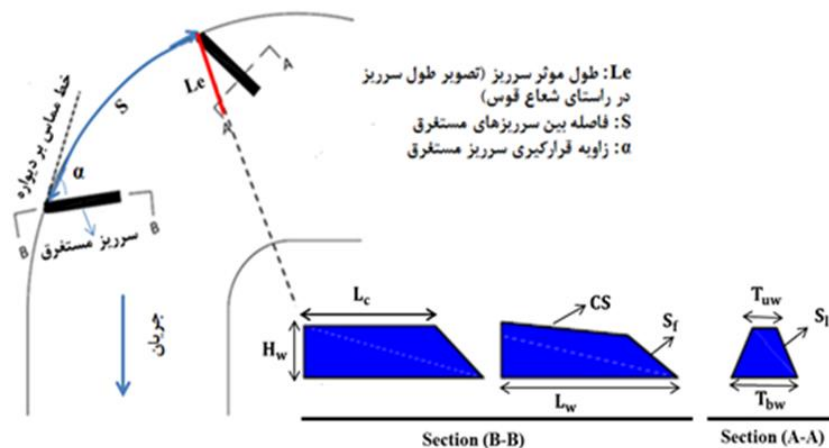
جدول ۱- محل استقرار سرریزها در قوس ۹۰ درجه

شماره سرریز	محل قرارگیری سرریز در قوس (θ°)
سرریز اول (W_1)	۱۱/۷
سرریز دوم (W_2)	۳۳/۹
سرریز سوم (W_3)	۵۶/۱
سرریز چهارم (W_4)	۷۸/۳

(T_{uw}) ۰/۰۵ متر، ضخامت کف سرریز (T_{bw}) ۰/۱۸۵ متر، شیب تاج سرریز (CS) صفر و ۷ درصد و متوسط ارتفاع سرریزها (H_w) ۳۰ و ۷۰ درصد متوسط عمق آب ورودی در کانال به ترتیب معادل ۰/۰۴۵ و ۰/۱۰۵ متر، احداث گردیدند (شکل ۲). متوسط عمق آب ورودی در کانال (D) ۰/۱۵ متر می‌باشد. با توجه به امکانات آزمایشگاهی، اندازه مواد رسوبی و شرایط کانال، عملکرد سرریزها در شرایط مختلف هیدرولیکی (سه دبی جریان ۶۰، ۶۵ و ۷۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب متناظر با اعداد فرود ۰/۳۵، ۰/۳۹ و ۰/۴۳) ارزیابی شد.

معرفی پارامترها و متغیرهای مربوط به سرریز مستغرق
در این مطالعه سرریزها از جنس چوب در نظر گرفته شد. پارامترهای هندسی مربوط به سرریزهای مستغرق با استفاده از راهنمای HEC-23، مطالعات Hemmati and Darabi (2019) و Cunningham and Lyn (2016) تعیین شدند.

به منظور انجام آزمایش‌ها تعداد چهار سرریز به شکل دوزنقه‌ای با زاویه ثابت (α) ۶۰ درجه، طول مؤثر (L_e) : تصویر طول سرریز در راستای شعاع قوس) ۳۰ درصد عرض سطح آب، شیب دماغه (S_f) و شیب دیواره جانبی عمودی-افقی (S_i) 0.7 H:1 V (S) فاصله سرریزها (S) سه برابر طول مؤثر سازه، ضخامت تاج سرریز

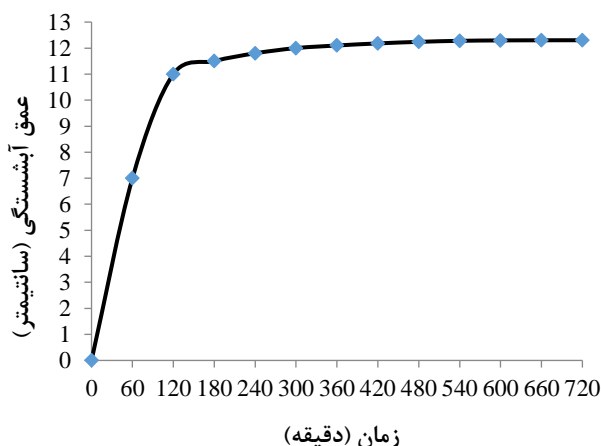


شکل ۲- برش طولی، عرضی و پلان سرریز در قوس به همراه پارامترهای هندسی آن

آزمایش ۲۴ ساعته با دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. در طول زمان انجام آزمایش ماکزیمم عمق آبشستگی در دیواره خارجی در زمان‌های مختلف توسط عمق سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل (۳) نتایج نشان داد که در فرود ۰/۴۳ بیش از ۹۲ درصد ماکزیمم عمق آبشستگی در ۸ ساعت شروع اول آزمایش اتفاق افتاد که با نتایج Hemmati and Darabi (2019) مطابقت خوبی داشت؛ اما با توجه به این که ارزیابی الگوی رسوب و فرسایش از اهداف تحقیق حاضر نیز می‌باشد مدت‌زمان انجام آزمایش‌ها ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد که در این حالت بستر به تعادل نسبی رسیده بود. پس از اتمام آزمایش، دبی جریان قطع گردید و پس از زهکشی کامل آب موجود در فلوم، توپوگرافی بستر با استفاده از دستگاه لیزری سنجش توپوگرافی بستر (LBP) (Laser Bed-Profiler) با دقت ۰/۴ میلی‌متر در مقاطع عرضی با فواصل ۰/۵ درجه روی قوس و فاصله عرضی ۲ سانتی‌متر در هر مقطع برداشت شد. خلاصه‌ای از پارامترها و شرایط آزمایش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

روش انجام آزمایش

آزمایش‌های شاهد (بدون وجود سرریزهای مستغرق) و ارزیابی (با وجود سرریزهای مستغرق) به منظور پی بردن به اثرگذاری این نوع سازه‌ها بر توپوگرافی بستر انجام شد. در هر دو حالت رسوبات به طور مساوی با ضخامت تقریبی ۰/۲ متر در کف فلوم پخش شد. پس از آن پمپ روشن شد در ابتدای هر آزمایش به منظور جلوگیری از آبشستگی اولیه در قوس، دریچه پایین‌دست بسته نگه داشته شد و عمق آب به آرامی با باز کردن شیر ورودی افزایش پیدا کرد. پس از رسیدن به دبی مورد نظر، دریچه کشویی در پایین‌دست به آرامی باز شد تا شرایط جریان مورد نظر برقرار گردد. دبی ورودی به کانال با استفاده از دبی‌سنج صوتی (Ultrasonic Flow Meter) نصب‌شده بر روی لوله ورودی به مخزن بالادست با دقت ۲ ±% اندازه‌گیری گردید (شکل ۱). در همه آزمایش‌ها عمق پایین‌دست خروجی قوس ثابت نگه داشته شد. برای اندازه‌گیری عمق جریان از عمق سنج نقطه‌ای با دقت ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. برای تعیین زمان تعادل نسبی بستر، یک



شکل ۳- تغییرات عمق آبشستگی با زمان برای بیشترین رژیم جریان (فرود ۰/۴۳)

جدول ۲- خلاصه‌ای از پارامترها و وضعیت آزمایش‌ها

نسبت سرعت متوسط به سرعت بحرانی (U/U _c)	دبی جریان (Q) لیتر بر ثانیه	عدد فرود (Fr)	ارتفاع سرریز (Hw)	شیب تاج سرریز (Cs)	زاویه قرارگیری سرریز (α) درجه	طول موثر سرریز (Le) سانتی‌متر	نوع آزمایش
۰/۸	۶۰	۰/۳۵					شاهد (بدون سرریز)
۰/۸۷	۶۵	۰/۳۹	-	-	-	-	
۰/۹۴	۷۰	۰/۴۳					
۰/۸	۶۰	۰/۳۵	۳۰ و ۷۰ درصد طول موثر سرریز	۰ و ۷ درصد	۶۰	۳۰/۶۶	ارزیابی (با وجود سرریز)
۰/۸۷	۶۵	۰/۳۹					
۰/۹۴	۷۰	۰/۴۳					

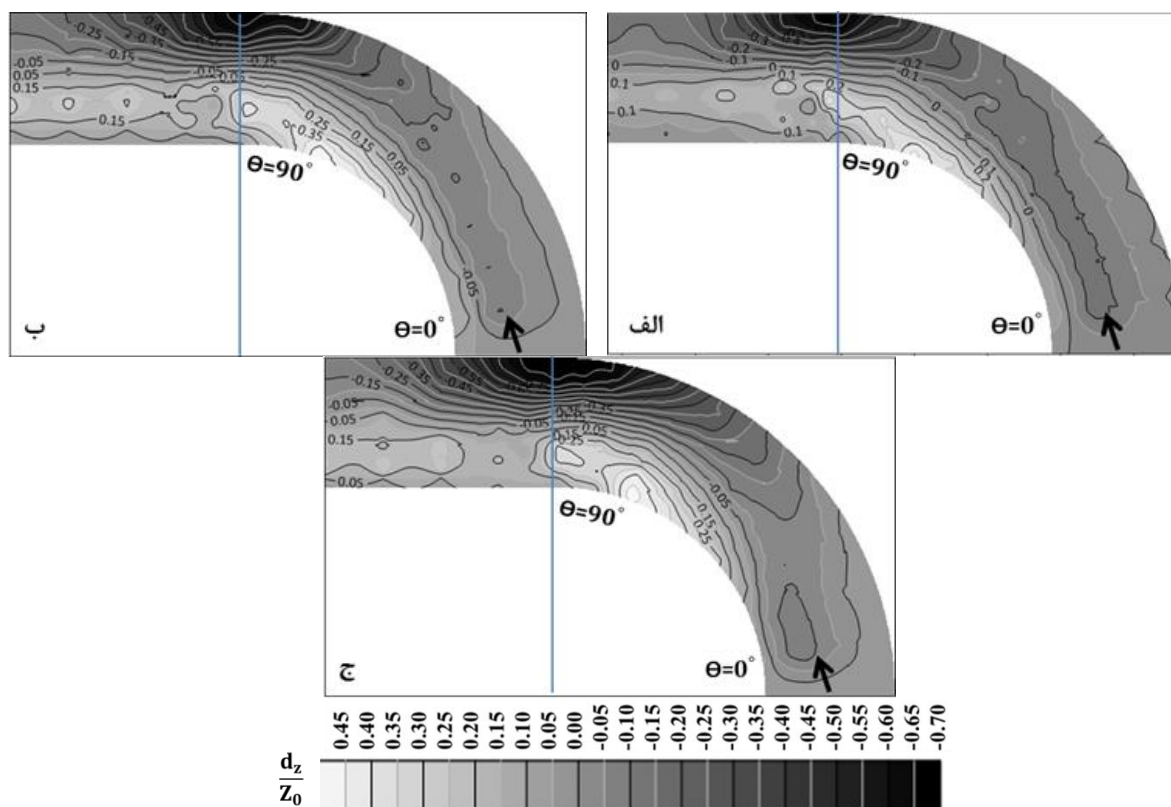
نتایج و بحث

بررسی وضعیت الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس

آزمایش‌ها در حالت شاهد و ارزیابی انجام شد. شکل (۳) تغییرات نسبت توپوگرافی بستر به ضخامت اولیه بستر ($\frac{dz}{z_0}$) در قوس را در حالت شاهد نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر منفی ($\frac{dz}{z_0} < 0$) بیانگر فرسایش و مثبت ($\frac{dz}{z_0} > 0$) در شکل‌های (۳، ۴ و ۵) نشان دهنده رسوبگذاری می‌باشد. الگوی توپوگرافی بستر نشان داد که در ورودی قوس، فرسایش نزدیک دیواره داخلی و در نیمه دوم قوس نزدیک دیواره خارجی به سمت خروجی قوس و مسیر مستقیم پایین‌دست اتفاق افتاده است. همچنین محل ماکزیمم آبشستگی نیز در مسیر مستقیم پایین‌دست قوس مشاهده می‌شود (شکل ۴). در قوس تند جریان اصلی و جریان ثانویه با همدیگر تعامل پیدا کرده و مسیر سرعت ماکزیمم را از ورودی قوس نزدیک دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی پایین‌دست رأس قوس منتقل می‌کنند، جایی که بیشترین تنش برشی اتفاق می‌افتد (Dietrich, 1987; Kashyap *et al.*, 2012). برای شعاع انحناء کمتر از ۳ حداکثر تنش در شروع قوس مجاور جداره داخلی و در انتهای قوس نزدیک دیواره خارجی اتفاق می‌افتد

(Lee *et al.*, 2019). همچنین نتایج نشان داد که فرسایش دیواره خارجی در شرایط جریان کم (فرود ۰/۳۵) از بالادست رأس قوس شروع شده و در شرایط جریان متوسط و زیاد (فرود ۰/۳۹ و ۰/۴۳) به طرف بالادست و پایین‌دست محور قوس جابجا شده و عمق بیشتری پیدا کرده است (شکل ۴) علاوه بر این با افزایش عدد فرود، تپه رسوبی نیز با ابعاد بزرگ‌تری در قوس داخلی شکل گرفته و به سمت خروجی قوس و مسیر مستقیم پایین‌دست توسعه پیدا کرده است که با (Hemmati and Vaghefi *et al.*, 2013) and Darabi (2019) مطابقت خوبی داشته است.

صرف‌نظر از شیب و ارتفاع سرریزها، در تمامی آزمایش‌ها توپوگرافی بستر نشان می‌دهد که با جاگذاری سازه‌ها در قوس، نسبت به حالت شاهد، خط‌القعر به اندازه طول موثر سرریزها از دیواره قوس خارجی فاصله گرفته و به سمت دماغه سرریزها و مرکز کانال جابجا شده است. (Minor *et al.*, 2006) با بررسی عملکرد آبشکن‌های مستغرق به منظور حفاظت دیواره رودخانه در قوس ۹۰ و ۱۳۵ درجه بیان کردند که بعد از احداث سازه‌ها، خط‌القعر به سمت مرکز کانال در مسیر خطی که دماغه سازه‌ها را به هم متصل می‌کند جابجا شده و ماکزیمم سرعت از دیواره خارجی فاصله گرفته و در دماغه سازه‌ها اتفاق افتاده است.



شکل ۴- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در حالت شاهد (الف: فرود ۰/۲۵، ب: فرود ۰/۳۹ و ج: فرود ۰/۴۳)

قدرت گردابه‌های ایجاد شده در پایین‌دست دماغه سرریزها نسبت داد (Hemmati and Darabi, 2019; Uijtewaal, 2005). در جریان متلاطم گردابه‌ها مهم‌ترین مکانیسم در انتقال انرژی جنبشی هستند (Charlton, 2008) و انتقال انرژی جنبشی بین رودخانه و میدانی از آبشکن‌ها با تاج شیب‌دار به دلیل کاهش تشکیل گردابه‌های بزرگ کاهش می‌یابد، همانطور که توسط Uijtewaal (2005) و Hemmati and Darabi (2019) گزارش شده است. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که برای سرریزهای با شیب تاج صفر و ۷ درصد، ماکزیمم آبشستگی در دماغه اولین سرریز و سرریزهای انتهایی اتفاق افتاده است (شکل ۷).

تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر حفاظت قوس خارجی

نتایج الگوی رسوب تحقیق حاضر در حالت شاهد نشان داد که حداکثر مقدار آبشستگی در خروجی قوس اتفاق افتاده است (شکل ۴-ج) که با نتایج Jamieson *et al.* (2013) مطابقت دارد. تغییرات نسبی بستر (تغییرات بستر نسبت به طول مؤثر سرریز) برای شاهد و ارزیابی در عدد فرود ۰/۴۳ برای مقطعی که در حالت شاهد ماکزیمم آبشستگی نزدیک دیواره خارجی اتفاق افتاده (فاصله ۰/۰۵ متری از خروجی قوس در مسیر مستقیم پایین‌دست)، در شکل (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این شکل‌ها مقادیر مثبت بیانگر رسوبگذاری و مقادیر منفی

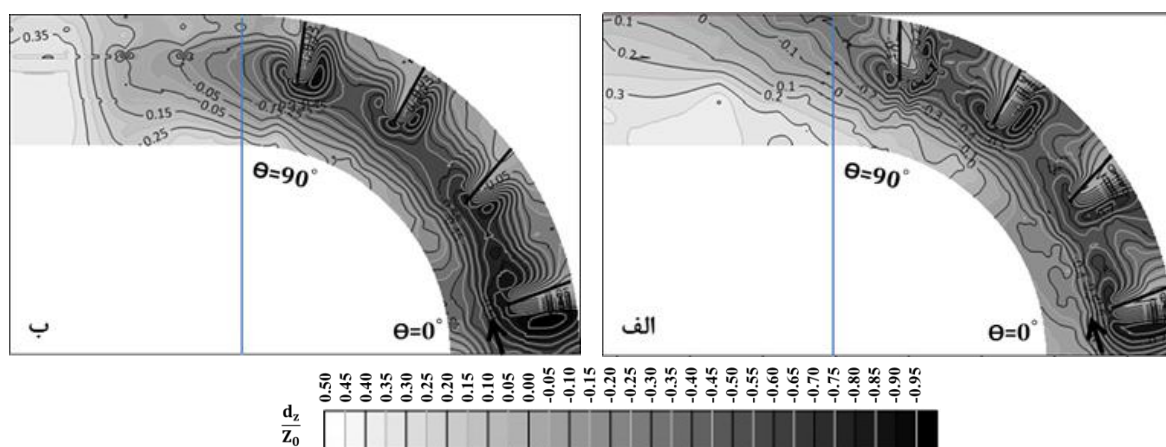
مقایسه توپوگرافی بستر در آزمایش‌های مربوط به سرریز-های مستغرق با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ با شیب تاج صفر و ۷ درصد حاکی از آن است که افزایش ارتفاع نسبی سرریز تغییرات مورفولوژیکی بیشتری را در بستر ایجاد کرده است. به عبارتی دیگر با افزایش ارتفاع نسبی سرریز، فرسایش و رسوبگذاری در سرتاسر قوس افزایش پیدا کرده است (شکل‌های ۵ و ۶) این امر می‌تواند ناشی از ایجاد تلاطم زیاد و تولید گردابه‌های قوی‌تر در دماغه سرریزها با ارتفاع نسبی بیشتر باشد (Darabi *et al.*, 2017). ارتفاع آبشکن، مقدار کل آبشستگی در قوس کاهش پیدا کرده است. نتایج نشان داد که سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد عملکرد مناسبی در پایدار دیواره قوس خارجی نداشته است (شکل‌های ۵-الف و ۶-الف)؛ اما عملکرد سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد (شکل‌های ۵-ب و ۶-ب) حاکی از کارایی مناسب این سرریزها در حفاظت از قوس خارجی می‌باشد.

مقایسه توپوگرافی بستر در آزمایش‌های مربوط به سرریز-های مستغرق با ارتفاع ۷۰ درصد و شیب تاج صفر و ۷ درصد حاکی از آن است که با افزایش شیب تاج سرریز، فرسایش و رسوبگذاری در سرتاسر قوس کاهش پیدا کرده است (شکل ۷). این حقیقت را می‌توان به کاهش سطح قرارگرفته سرریز در مقابل جریان با ایجاد شیب و در نتیجه کاهش شدت تلاطم و کاهش

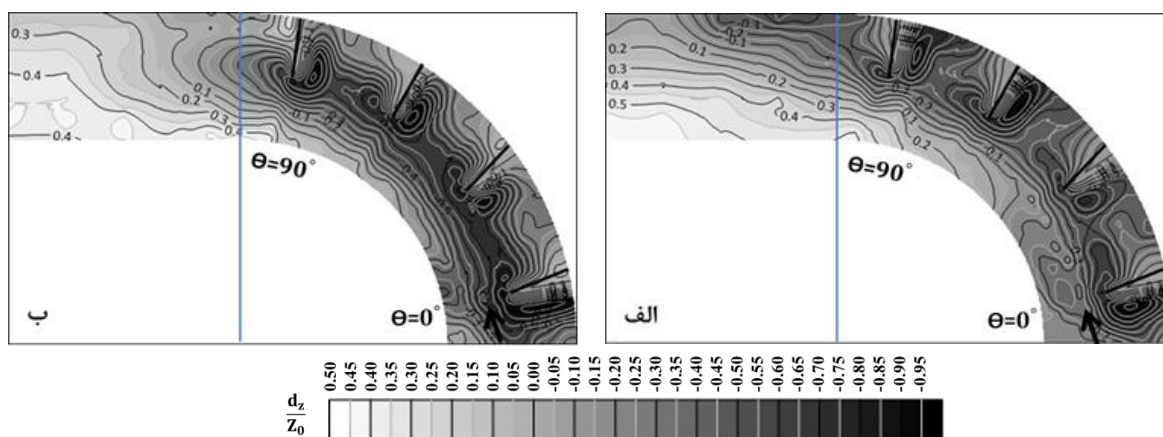
خارجی در قوس‌های تند را نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات Darabi *et al.* (2017) افزایش سطح قرارگیری سرریز در مقابل جریان عامل افزایش شدت تلاطم و ایجاد گردابه‌های قوی‌تر در پایین‌دست سرریزها بوده است که این امر، ایجاد آبشستگی بیشتر در دماغه سرریزها و افزایش پتانسیل رسوبگذاری توسط این سازه‌ها را سبب شده است. Cuningham and Lyn (2016) نشان دادند که سرریزهای مستغرق با ارتفاع بیشتر عملکرد مناسب‌تری در پایداری دیواره قوس خارجی از خود نشان داده‌اند.

پتانسیل رسوبگذاری نسبی برای سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد و شیب تاج ۷ درصد در مقایسه با شیب تاج صفر، در حدود ۳/۹ درصد کاهش پیدا کرده است (شکل ۸-ب). به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که سرریزها با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد و شیب تاج صفر نسبت به سایر موارد عملکرد بهتری در حفاظت و پایداری بستر نزدیک دیواره خارجی در قوس تند از خود نشان داده است.

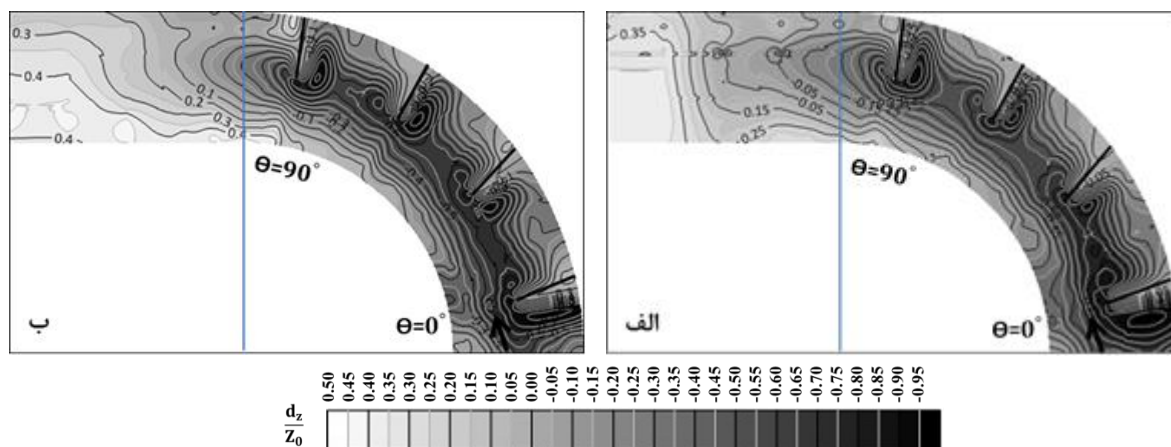
نشان‌دهنده آبشستگی می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که ماکزیمم عمق آبشستگی در حالت شاهد در این مقطع نزدیک دیواره خارجی، حدود ۶۴ درصد طول مؤثر سرریز بوده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشهود است، با احداث سرریزهای مستغرق نسبت به حالت شاهد نزدیک دیواره خارجی در مقطع مذکور رسوبگذاری صورت گرفته است که با نتایج Jamison *et al.* (2013) مطابقت خوبی داشته است. Rutherford *et al.* (1999) و Clevin (2008) گزارش دادند که سرریزهای مستغرق برای آبراهه‌هایی با قوس‌های تند مناسب نیستند. اگر چه با احداث سرریزهای مستغرق با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد آبشستگی نزدیک دیواره خارجی نسبت به حالت شاهد کاهش پیدا کرده و به حدود ۱۵ درصد رسیده است اما به طور کلی عملکرد مناسبی در حفاظت دیواره خارجی نداشته است (شکل ۸-الف). در حالی که احداث سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد تقریباً ۷ درصد رسوبگذاری نزدیک دیواره خارجی را به دنبال داشته است (شکل ۸-الف) که عملکرد مناسب این سازه در حفاظت و پایداری دیواره



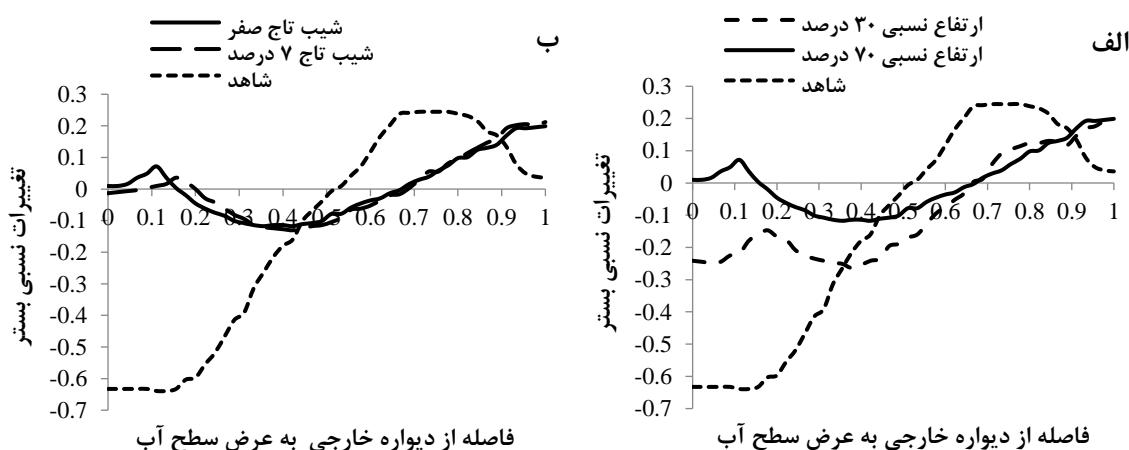
شکل ۵- اثر ارتفاع سرریزهای مستغرق با شیب تاج صفر بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در فرود ۰/۴۳ (الف: ارتفاع نسبی ۳۰ درصد، ب: ارتفاع نسبی ۷۰ درصد)



شکل ۶- اثر ارتفاع سرریزهای مستغرق با شیب تاج ۷ درصد بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در فرود ۰/۴۳ (الف: ارتفاع نسبی ۳۰ درصد، ب: ارتفاع نسبی ۷۰ درصد)



شکل ۷- اثر شیب تاج سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در فرود ۰/۴۳ (الف: سرریز با شیب تاج تخت، ب: سرریز با شیب تاج ۷ درصد)



شکل ۸- اثر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر تغییرات نسبی بستر (تغییرات بستر نسبت به طول مؤثر سرریز) در مقطع ۰/۰۵ متر پایین‌تر از خروجی قوس در مسیر مستقیم پایین‌دست با فرود ۰/۴۳، الف: سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد با شیب تاج صفر، ب: سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد شیب تاج صفر و ۷ درصد.

کشتیرانی و ناوبری را به دنبال دارد.

نتایج نشان داد که برای سرریزهای مستغرق با ارتفاع و شیب تاج‌های مختلف در رژیم جریان کم و متوسط (فرود ۰/۳۵ و ۰/۳۹) ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی (ماکزیمم ارتفاع تپه رسوبی با سرریز نسبت به حالت شاهد) بیشتر از ۱ بوده است (شکل ۹). به عبارتی دیگر تغییر در شیب تاج و ارتفاع سرریزهای مستغرق در رژیم جریان کم و متوسط اثر معنی‌داری در کاهش ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی نداشته است و فقط برای بیشترین رژیم جریان (فرود ۰/۴۳) صرف نظر از شیب تاج و ارتفاع سرریز مستغرق ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده است (شکل ۹). با این وجود در فرود ۰/۴۳ سرریزهای با ارتفاع کمتر (شکل ۹- الف) و شیب تاج بیشتر (شکل ۹- ب) عملکرد بهتری در کاهش ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی داشته‌اند؛ اما تغییرات ایجاد شده بسیار اندک و غیر

تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر ماکزیمم ارتفاع

نسبی تپه رسوبی

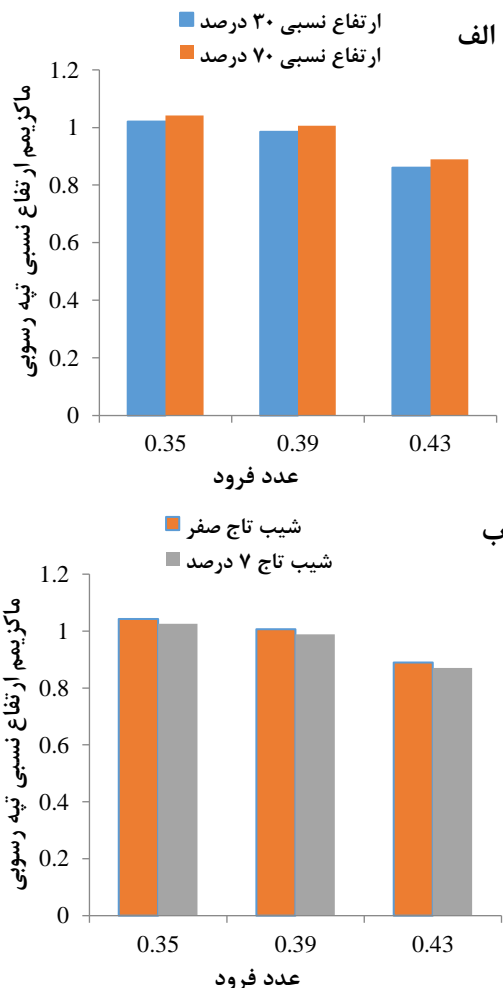
هدف کاربردی از احداث سرریزهای مستغرق در قوس رودخانه، فقط کنترل آبشستگی در دیواره خارجی قوس نیست؛ بلکه کاهش ابعاد تپه رسوبی در دیواره داخلی قوس رودخانه نیز جزء اهداف این نوع سازه‌ها خصوصاً به‌منظور بهبود شرایط کشتیرانی در رودخانه‌ها می‌باشد. Derrick (1999)، Hemmati *et al.* (2016) و Hemmati and Darabi (2019) گزارش دادند که احداث سرریزهای مستغرق عامل کنترل و انحراف جریان از دیواره خارجی قوس به سمت تپه رسوبی بوده و باعث فرسایش تپه رسوبی و عریض‌تر شدن کانال می‌شود. به بیانی دیگر سطح فرسایش یافته از تپه رسوبی، در اثر تغییر مسیر جریان از دیواره خارجی به سمت دیواره داخلی در اثر احداث سرریزهای مستغرق می‌باشد که این امر توسعه عرض رودخانه در محل قوس، برای

قابل ملاحظه می‌باشد.

مهم‌ترین پارامترهایی است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل برخورد جریان با این موانع و تغییر جهت دادن آن و همچنین به علت اختلاف فشار هیدرواستاتیکی در بالادست و پایین‌دست موانع یک سری جریان‌های گردابی در پیرامون موانع به وجود می‌آید که عامل اصلی ایجاد آبشستگی موضعی در اطراف موانع مذکور (سرریزهای مستغرق) می‌باشند. سرعت‌ها و تنش‌های برشی موضعی ناشی از جریان‌های گردابی در حقیقت مهم‌ترین عواملی هستند که موجب گسترش آبشستگی موضعی در اطراف موانع داخل جریان می‌گردند (Mashkoornia *et al.*, 2010). همان‌طور که قبلاً اشاره شد ماکزیمم آبشستگی در حالت شاهد تقریباً در فاصله ۰/۰۵ متر از خروجی قوس در مسیر مستقیم پایین‌دست نزدیک دیواره خارجی اتفاق افتاده است. درحالی‌که در شکل (۱۰- الف و ب) به‌وضوح قابل مشاهده است که با احداث سرریزهای مستغرق در قوس خارجی، ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی (عمق آبشستگی در دماغه سرریز نسبت به طول مؤثر سرریز)، اطراف دماغه سرریز سوم (W_3) تقریباً در زاویه ۵۶ درجه اتفاق افتاده است این بدان معنی است که چاله آبشستگی از انتهای پایین‌دست به سمت بالادست و از دیواره خارجی به سمت مرکز کانال جابجا شده است. در حالت شاهد بیشترین تنش در ورودی قوس نزدیک دیواره داخلی و در نیمه دوم قوس نزدیک دیواره خارجی مشاهده شد همین امر باعث شده که سرریزهای انتهایی (W_3 و W_4) بیشتر در معرض آبشستگی قرار داشته باشند. همتی و همکاران گزارش دادند که در یک رودخانه پیمان‌رودی ماکزیمم عمق آبشستگی در دماغه سازه یا سازه‌های آخری روی داده است (Hemmati *et al.*, 2016). البته در اطراف سرریز اول (W_1) نیز به دلیل اینکه نخستین مانع را در برابر جریان ایجاد می‌کند و شرایط بحرانی‌تری را نسبت به دیگر سازه‌ها دارد در تمامی حالات آزمایش مقدار آبشستگی قابل‌توجهی مشاهده می‌شود (Darabi *et al.*, 2017).

با افزایش ارتفاع سرریز، به دلیل افزایش قدرت جریان گردابی در دماغه و اطراف سرریزها (Darabi *et al.*, 2017)، ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریز سوم در فرود ۰/۴۳ حدود ۱۱ درصد افزایش پیدا کرده است (شکل ۱۰- الف). همچنین با افزایش شیب تاج در سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد (شکل ۱۰- ب)، به دلیل کاهش شدت گردابه در دماغه سرریزها بر اساس مطالعات (Hemmati *et al.*, 2016) و Hemmati and Darabi (2019)، ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در اطراف سرریز سوم در فرود ۰/۴۳ تقریباً ۶ درصد کاهش پیدا کرده است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد و شیب تاج صفر نسبت به سایر موارد عملکرد بهتری در

به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که تغییر در ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی نداشته است و فقط برای بیشترین رژیم جریان (فرود ۰/۴۳) صرف‌نظر از ارتفاع و شیب تاج سرریز به طور متوسط ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی حدود ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده است (شکل ۹- الف، ب). نتایج Hemmati *et al.* (2016) نشان داد که سرریز با تاج شیب‌دار اثر معنی‌داری در کاهش ارتفاع تپه رسوبی نداشته هر چند برای دبی بزرگ‌تر از دبی طراحی ($Q/Q_d > 1$) ارتفاع تپه رسوبی حدود ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده است.



شکل ۹- اثر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی (ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی با سازه نسبت به حالت شاهد) در قوس داخلی تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، الف: سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد با شیب تاج صفر درصد، ب: سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد با شیب تاج صفر و ۷ درصد.

بررسی ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزهای مستغرق ماکزیمم عمق آبشستگی در دماغه سرریزهای مستغرق یکی از

از دیواره قوس خارجی فاصله گرفته و به سمت دماغه سرریزها و مرکز کانال انتقال یافت.

سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد عملکرد مناسبی در حفاظت از دیواره خارجی نداشتند و با احداث این سازه‌ها در مقطعی که منطبق بر محل ماکزیمم آبشستگی در حالت شاهد بود، در فرود ۰/۴۳ حدود ۱۵ درصد طول موثر سرریز آبشستگی اتفاق افتاد.

بر خلاف گزارش‌های Rutherford et al. (1999) و Clevin (2008) که بیان کردند سرریزهای مستغرق برای آبراهه با قوس‌های تند مناسب نیستند، با احداث سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد با تاج تخت و شیب‌دار در در مقطعی که منطبق بر محل ماکزیمم آبشستگی در حالت شاهد بود، در فرود ۰/۴۳ به ترتیب حدود ۷ و ۵ درصد طول موثر سرریز رسوبگذاری صورت گرفت که این امر بیانگر عملکرد مناسب سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد در پایداری و حفاظت دیواره قوس خارجی ۹۰ درجه تند بوده است.

در سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد با افزایش شیب تاج سرریز از صفر به ۷ درصد، رسوبگذاری در مقطعی که منطبق بر محل ماکزیمم آبشستگی در حالت شاهد بود، در فرود ۰/۴۳ حدود ۳ درصد طول موثر سرریز کاهش یافت.

تغییر در ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق، اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی در قوس داخلی نداشت و فقط در بیشترین رژیم جریان (فرود ۰/۴۳) صرف نظر از ارتفاع و شیب تاج سرریز به طور متوسط ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی تقریباً ۱۰ درصد کاهش پیدا کرد.

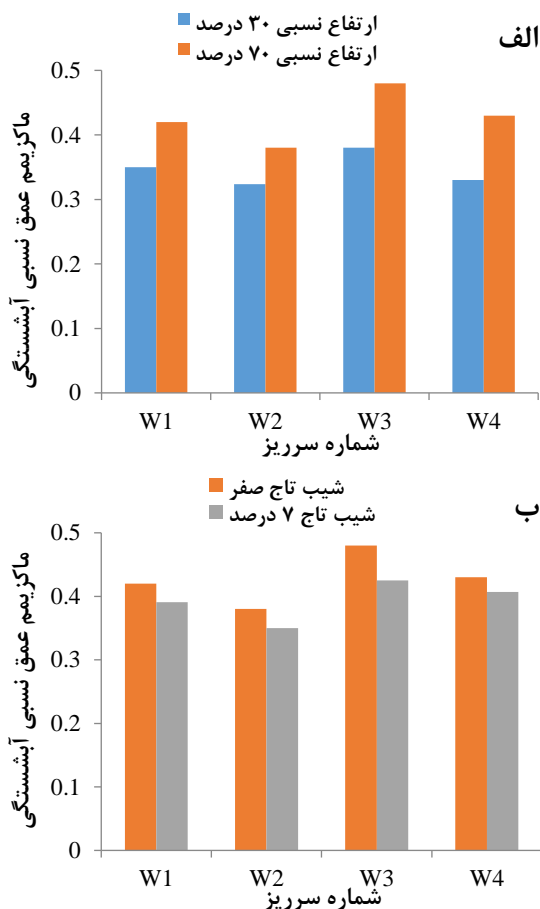
در شیب تاج و ارتفاع‌های مختلف، ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی برای فرود ۰/۴۳ در دماغه سرریز سوم (زاویه ۵۶ درجه) مشاهده شد. با افزایش ارتفاع سرریزهای با تاج تخت، ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریز سوم ۱۱ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین افزایش شیب تاج در سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد کاهش ۶ درصدی ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریز سوم را به دنبال داشت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abad, J., Rhoads, B., Gunalp, I., and Garcia, M. (2008). Flow structure at different stages in a meander-bend with bend way. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 134(8): 1052-1064.
- Acharya, K. and Gautam, M. (2012). Evaluation of bendway weir bank stabilization techniques for stream restoration. *International Journal of River*

کاهش ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزها در قوس تند ۹۰ درجه داشته است.



شکل ۱- ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی (ماکزیمم عمق آبشستگی در دماغه سرریز نسبت به طول موثر سرریز) در دماغه سرریزها برای فرود ۰/۴۳، الف: سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد با شیب تاج صفر، ب: سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد با شیب تاج صفر و ۷ درصد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر الگوی فرسایش و رسوب در پیچ آبراهه ۹۰ درجه تند پرداخته شده است. آزمایش‌ها در حالت شاهد و ارزیابی انجام گرفتند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که:

در حالت شاهد خط‌القعر نزدیک دیواره خارجی اتفاق افتاده است در صورتی که با احداث سرریزهای مستغرق صرف‌نظر از ارتفاع و شیب تاج سرریزها، خط‌القعر به اندازه طول موثر سرریز

Basin Management, 10 (2), 171-176.

Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge, New York, NY, pp. 234p.

Clevin, S. (2008). Bendway weir – an alternative approach to traditional river a lignment training technique.

- Cunningham, R. and Lyn, D. (2016). Laboratory study of bendway weirs as a bank erosion countermeasure. *J. Hydraul. Eng.* 142 (6), 04016004.
- Darabi, P., Hemmati, M. and Haghdoost, N.A. (2017). Effect of bendway weirs height on scour and sedimentation pattern at a 90 degree bend. *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 51-66. (In Farsi)
- Derrick, D. L. (1997). *Bendway weirs redirect rivers to protect highway bank abutments*. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
- Derrick, D. L. (1999). *Bendway weir history, theory and design*. From: <http://chl.wes.army.mil/research/hydstruc/bankprotect/bendweir/work.htm>
- Dietrich, W. E. (1987). *Mechanics of flow and sediment transport in river bends*. River channels: Environment and process, K. S. Richards, ed., Blackwell, Oxford, UK, 179–227.
- FHWA, (1997). *Bridge scour and stream instability countermeasures (SI)*. Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular Number 23, FHWA HI-97-030.
- 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.
- Hemmati, M., Ghomeshi, M. and Kashefipour, S. M. (2012a). 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., Ghomeshi, M., Kashefipour, S.M., Shafai-Bejestan, M. and Lanzoni, S. (2012b). Experimental investigation of the effects of angle and length of bendway weirs on scouring and sedimentation in a meander river. *J. Am. Sci.* 8 (9), 912–917.
- Hemmati, M., Kashefipour, S. M. and Ghomeshi, M. (2013). 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. (2016). Scour depth around flat and sloped crest bendway weirs: a laboratory study. *Int. J. River Basin Manage.* 14 (1). 83–93.
- Hemmati, M. and Darabi, p. (2019). Erosion and sedimentation patterns associated with restoration structures of bendway weirs. *Journal of Hydro-environment Research*, 19-28.
- Jamieson, E.C., Rennie, C.D. and Townsend, R.D. (2013). 3D flow and sediment dynamics in laboratory channel bend with and without stream barbs. *J. Hydraul. Eng.* 139 (2), 154-166.
- Jarrahzade, F., Ramesh, S., Mashkoorniya, 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)
- Jarrahzade, F. and Shafai Bejestan, M. (2012). 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)
- Kashyap, S., Constantinescu, G., Rennie, C. D., Post, G. and Townsend, R. (2012). Influence of channel aspect ratio and curvature on flow, secondary circulation, and bed shear stress in a rectangular channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 138:1045-1059.
- Lagasse, P. F., Byars, M. S., Zevenbergen, L.W. and Clopper, P. E. (1997). *Bridge scour and stream instability countermeasures: experience, selection, and design guidance*. FHWA. Hydraulic Engineering Circular No. 23, FHWA HI-97-030 HEC-23.
- Lee, S. K., Dang, T. A. and Le, V. T. (2019). Investigation of shear stress distribution in a 90 degree channel bend. *J. of Applied Mechanics and Engineering*, 24(1), 213-220.
- Mashkoornia, H., Shafai-Bejestan, M., Jarrahzade, F. and Ramesh, S. (2010). Experimental study on bendway weirs. In: *Proceedings of / the International Conference on Fluvial Hydraulics. River Flow 2010 - Dietrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds) - © 2010 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7*.
- Mashkoornia, H. and Shafai Bejestan, M. (2015). Investigation of the effect of bendway weir length on bed topographic changes in 90 ° sharp bend. *Iranian Water Research Journal*, 9(2), 159-163. (InFarsi)
- Maza Alvarez, J.A. (1989). Design of groynes and spur dikes. In: *Proceedings of / the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering*, 14–18 August, New Orleans, Louisiana, 296–301.
- Matsuura, T. and Townsend, R. (2004). Stream-barb installations for narrow channel bends—A laboratory study. *Can. J. Civ. Eng.* 31(3), 478–486.
- Minor, B., Rennie, C. D. and Townsend, R. D. (2006). 'Barbs' for river bend bank protection: Application of a three-dimensional numerical model. *Can. J. Civ. Eng.* 34(9), 1087–1095.
- Ramesh, S., Jarrahzade, F., Mashkoorniya, H. and Shafai-Bejestan, M. (2010). Longitudinal profile position of erosion and sedimentation under the influence of bendway weir in 90 degree sharp bend. In: *Proceedings of / 9th Iranian hydraulic conference*, 9-11 Nov., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Rozovskii, I.L. (1957). *Flow of water in bends of open channels*. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Kiev. 233 p.
- Rutherford, I., Jerie, K., and March, N. (1999). *A rehabilitation manual for Australian Stream*.

- Volumc One, Cooperative Research Center For Catchment Hydrology.
- Smith, S. P. and Wittler, R. J. (1998). *Bendway weirs and highway protection in Colorado: A case study on the Blue River*. Proc., ASCE Int. Water Resources Engineering Conf.: Water Resources Engineering '98, ASCE, Washington, DC, 465–470.
- Uijttewaal, W.S. (2005). Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments. *J. Hydraul. Eng*, 131 (9), 782–791.
- Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Azimi, A. (2013). Numerical Study Scour Pattern on Channel Bend Using Flow-3D Software. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Researches*, 9, 59-72. (In Farsi)