

الگوی فرسایش و رسوب با وجود سرریزهای مستغرق در قوس ۹۰ درجه

محسن صالح زاده^۱، محمد همتی^{۲*}، مهدی یاسی^۳، استفان لانزونی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱

چکیده

سرریزهای مستغرق سازه‌هایی با ارتفاع کوتاه هستند که کاملاً زیر سطح آب قرار داشته و جهت کنترل جابجایی قوس‌ها، بهبود شرایط کشتیرانی، ایجاد زیستگاه آبزیان و ... احداث می‌شوند. هدف این تحقیق ارزیابی الگوی فرسایش و رسوبگذاری در یک قوس ۹۰ درجه با شعاع انحناء نسبی ۳/۳ با حضور سرریزهای مستغرق می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، مجموعه‌ای از سرریزها با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد و شیب تاج صفر و ۷ درصد در قسمت دیواره خارجی قوس احداث شدند. زاویه سرریزها ۶۰ درجه، طول سرریزها ۳۰ درصد عرض کانال و فاصله بین سرریزها ۳ برابر طول سرریزها به صورت ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با احداث سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد و شیب تاج صفر، بیشترین رسوبگذاری (۵۶/۶۶ درصد بیشتر از حالت بدون سازه) در محل حداکثر آبستگي صورت گرفت. ماکزیم عمق نسبی آبستگي در سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد، در حدود ۱۷ درصد بیشتر از مقدار آن در سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد بود. با افزایش شیب تاج برای سرریزها با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد، متوسط ماکزیم عمق نسبی آبستگي در تمامی شرایط هیدرولیکی اطراف سرریز W5 تقریباً ۲۷ درصد کاهش پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: آبستگي، تپه رسوبی، خط‌القدر، دیواره خارجی، دیواره داخلی

مقدمه

ارائه شده‌اند که از لحاظ اجرا سخت و پرهزینه می‌باشند (Ehsan-Zabir, 1979). تعریف جامعی برای سرریزهای مستغرق وجود ندارد اما به‌طور کلی بیشتر سازه‌هایی که با این نام شناخته می‌شوند دارای شکل و کارایی مشابهی هستند (Rhoads, 2003). اولین بار پوکرفکه (Pokrefke) در سال 1977 استفاده از این نوع سرریزها را در یک مدل فیزیکی با بستر متحرک بر روی بازه‌ای از رودخانه می‌سی‌سی‌پی به منظور کاهش تنش در قوس خارجی ارائه داد و به سرعت استفاده از این نوع سرریز اولین توجه را در اواخر دهه 1980 به خود جلب کرد و زمینه نصب درست و راه‌اندازی توسط USACE و WES ارائه داده شد (Derrick et al., 1994). هیچ دستورالعمل استانداردی برای طراحی و ساخت این سازه‌ها وجود ندارد (Rhoads, 2003) و دستورالعمل‌های ارائه شده نیز هنگامی مفید هستند که با قضاوت متخصصین در محل همراه باشد (Smith and Wittler and, 1999). هدف اصلی کاربرد این سرریزها تغییر الگوی جریان در قوس بوده که نتیجه آن حفاظت ساحل خارجی است. این سازه‌ها ساختار جریان حلزونی سیال را که عموماً در خم‌ها اتفاق می‌افتد تغییر داده و با منحرف کردن جریان از ساحل خارجی، سرعت حداکثر و محل ماکزیم تنش برشی را به مرکز کانال انتقال می‌دهند (Reinauer and Hager, 1997). سرریزهای مستغرق از نظر ظاهری شبیه آیشکن‌های سنگی هستند (FHWA, 1997) با این تفاوت که در

به طور طبیعی در قوس رودخانه جریان سطحی تمایل دارد برای رسیدن به پایداری از دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی حرکت کند. این فرآیند در ارتباط با فرسایش دیواره خارجی و رسوبگذاری در دیواره داخلی به طور خاصی نگران‌کننده می‌باشد (Lagasse et al., 2001; Lagasse et al., 2009). پوشش سنگریزه‌ای روشی سنتی برای مقابله با فرسایش دیواره خارجی می‌باشد که به‌طور معمول از لحاظ پایداری دیواره مؤثر در نظر گرفته می‌شود اما ممکن است از جنبه‌های دیگر مزایای کمتری داشته باشد. پوشش سنگریزه‌ای، یکنواختی مصنوعی دارد و ممکن است اثرات مضر بر روی کیفیت زیستگاه آبزیان داشته باشد (Fischenich, 2003). علاوه بر این روش، روش‌های دیگری برای حفاظت قوس رودخانه همچون آیشکن

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- استاد مهندسی عمران، معماری و محیط زیست، دانشگاه پادوا، پادوا، ایتالیا
(* نویسنده مسئول: Email: m.hemmati@urmia.ac.ir)

دینامیک رسوبات در قوس ۱۳۵ درجه را با حالت بدون آبشکن مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت بدون آبشکن ماکزیمم آبستتگی در خروجی قوس اتفاق افتاده است که مقداری با نتایج مطالعات قبلی متفاوت بوده است. علاوه بر این، آن‌ها ماکزیمم آبستتگی را در دماغه آبشکن‌ها مشاهده کردند (Jamieson et al., 2013).

کوچک و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای اثر آبشکن نفوذپذیر، نفوذناپذیر و باندال لایک (ترکیبی از آبشکن نفوذپذیر و نفوذناپذیر) را در شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۲۱، ۰/۲۳، ۰/۲۶) و بر توپوگرافی بستر در فلووم قوسی ۹۰ درجه ملایم و در شرایط مستغرق مورد آزمایش قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که عمق فرسایش در اطراف آبشکن باندال لایک به مراتب کمتر از آبشکن نفوذناپذیر بوده است. همچنین سازه باندال لایک در مقایسه با آبشکن نفوذپذیر سبب شکل‌گیری کانال عمیق‌تر برای ناوبری شده است.

از بین سه نسبت فاصله به طول سرریز (۳، ۴ و ۵)، سرریزهایی که فاصله آن‌ها ۳ برابر طول سرریز بود، عملکرد مناسب‌تری در کنترل فرسایش قوس خارجی داشت (Jarrazhade and Shafai, 2011) و با افزایش فاصله سرریزها محل وقوع ماکزیمم عمق آبستتگی به سمت انتهای خم انتقال یافته و خط‌القدر با عمق بیشتر ایجاد شده است (جراحی‌زاده و شفاعی‌بجستان، ۱۳۹۱). بررسی تأثیر زاویه سرریزهای مستغرق با زاویه‌های ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بر الگوی فرسایش و رسوب توسط همتی و همکاران (۱۳۹۱) نشان داد که بیشترین کاهش سطح تپه رسوبی (۴۸ درصد) در اثر احداث سرریزهای مربوط به زاویه ۶۰ درجه بوده و همچنین عملکرد زوایای ۶۰ و ۷۵ درجه در رسوبگذاری بین سرریزها و حفاظت از قوس خارجی از زاویه ۹۰ درجه بهتر بوده است.

از بین سه نسبت طولی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال سرریز-های مستغرق با طول ۲۵ درصد کمترین آبستتگی را ایجاد کرده است (مشکورنیا و همکاران، ۱۳۸۹). نتایج همتی و همکاران (۱۳۹۲) نشان داد که از بین ۳ نسبت طولی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد عرض بالای کانال، تأثیر نسبت طولی ۰/۴ در کنترل فرسایش قوس خارجی بیشتر از ۰/۳ و آن هم بیشتر از ۰/۲ بوده است. اگر چه طول و زاویه سرریز-های مستغرق تأثیر معنی‌داری در کاهش ارتفاع تپه رسوبی نداشته اما در دبی‌های بالا احداث این سرریزها به طور متوسط باعث کاهش ۱۹ درصدی ارتفاع تپه رسوبی نسبت به حالت بدون سازه شده است (Hemmati et al., 2012).

با بررسی ارتفاع سرریزهای مستغرق با نسبت‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد عمق آب بالادست، مشخص شد که کمترین آبستتگی مربوط به سرریز با ارتفاع ۳۰ درصد بوده (دارابی و همکاران، ۱۳۹۶) اگر چه افزایش ارتفاع سرریزهای مستغرق به صورت موضعی و نقطه‌ای باعث

مقایسه با آبشکن‌های معمولی کوتاه و کم ارتفاع بوده و طول بیشتری نسبت به آن‌ها دارند (مهردار و همکاران، ۱۳۹۵؛ جراحی‌زاده و شفاعی-بجستان، ۱۳۹۱؛ همتی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Hemmati et al., 2012). از نظر کاربرد نیز تفاوت قابل توجهی دارند؛ آبشکن‌ها معمولاً مستغرق نبوده و جریان عبوری از اطراف آن‌ها قابل رویت 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 به گونه‌ای هدایت می‌شود که با محور سرریز تقریباً زاویه ۹۰ درجه می‌سازد و به سمت مرکز کانال حرکت می‌کند (مهردار و همکاران، ۱۳۹۵). سرریزهای مستغرق همانند آبشکن‌ها سرعت در نزدیکی ساحل و همچنین تمرکز جریان در ساحل خارجی را کاهش می‌دهند (FHWA, 1997). تجربه‌های کسب‌شده در کشورهای دیگر نشان داده است که از نظر اقتصادی نیز احداث این سرریزها باعث ۷۷ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرایی نسبت به احداث آبشکن‌های معمولی می‌گردد (جراحی‌زاده و شفاعی‌بجستان، ۱۳۹۱). 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). شیب باعث کاهش آبستتگی در دماغه این نوع سازه‌ها خواهد شد (Armanini et al., 2010; Brown, 1985; Hemmati et al., 2016; Alvarez, 1989; Wilkerson, 1972; Hemmati and Darabi, 2019).

وجود سرریزهای مستغرق در قوس و تغییر در پارامترهای هندسی آن باعث تغییر در الگوی جریان و بهبود عملکرد این نوع سازه در کنترل فرسایش می‌شود. عمده کارهای آزمایشگاهی روی سرریزهای مستغرق توسط پوکرفکه (Pokrefke) در مرکز آزمایش آبراهه (USACE) در ژانویه ۱۹۸۸ هدایت گردید. مشکلات فرسایش و کشتیرانی در رودخانه می‌سی‌سی‌پی عاملی برای این مطالعه بود (Derrick, 1999). این آزمایش‌ها از سال ۲۰۰۱ توسط USBR سرمایه‌گذاری گردید. هینتز، دارو و کینزلی هر سه در دانشگاه ایالتی کلرادو معادلاتی را در ارتباط با سرعت‌های آبراهه قبل و بعد از احداث سرریزها ارائه دادند (Heintz, 2002; Darrow, 2004; Kinzli, 2005).

کینزلی و تورنتون در مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از مدل مربوط به بخشی از قوس رودخانه میدل ریوگراند به مقیاس ۱:۱۲ به بررسی پیش‌بینی سرعت در اطراف سرریزهای مستغرق پرداختند. ایشان در نهایت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی چهار معادله را جهت پیش‌بینی سرعت اطراف این سازه‌ها ارائه دادند (Kinzli and Toronton, 2009). جمیسون و همکاران اثر آبشکن مستغرق بر جریان سه بعدی و

همکاران نقش مؤثری در الگوی جریان و رسوب خواهند داشت (Haghnazar et al., 2018). 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 ملایم بر الگوی رسوب و فرسایش پرداخته است.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

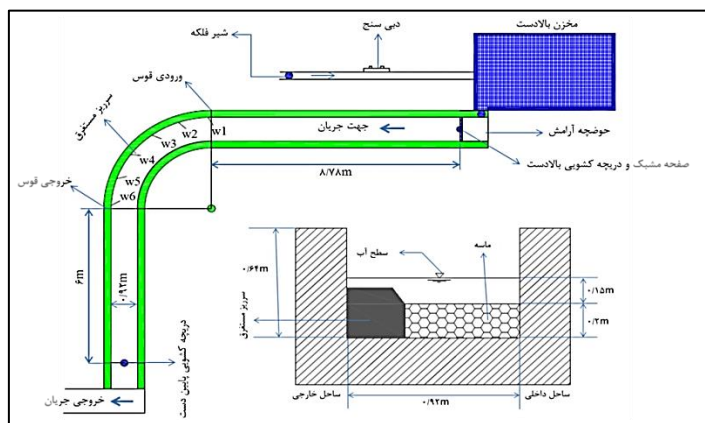
برای رسیدن به اهداف این مطالعه از فلوم آزمایشگاهی با قوس ۹۰ درجه واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دکتر فرهودی گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه استفاده گردید. نسبت شعاع انحناء به عرض این فلوم ۳/۳ می‌باشد که بر اساس تقسیم‌بندی‌های رزوسکی جزء قوس‌های ملایم محسوب می‌گردد (Rozovskii, 1975). شکل (۱) فلوم آزمایشگاهی با وجود سرریزهای مستغرق در قوس خارجی 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 شده است. ارتفاع فلوم ۶۴ سانتیمتر، ضخامت رسوبات ۲۰ سانتی‌متر، قطر متوسط ذرات رسوبی ۱/۴ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی ذرات ۱/۲۹ در نظر گرفته شد.

افزایش حفاظت دیواره خارجی شده است (Cunningham and Lyn, 2016). مهرداد و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی با استفاده از یک سری سرریزهای مستغرق (۷ عدد) با سه نسبت ارتفاع (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ برابر عمق آب) و سه شیب تاج (۰، ۵ و ۱۰ درصد) به بررسی اثر این سازه‌ها بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرریزهای با ارتفاع نسبی ۰/۵ و شیب تاج ۵ درصد مناسب‌ترین گزینه جهت طراحی برای چنین قوس‌هایی می‌باشند.

با افزایش شیب تاج سرریز از صفر الی ۲۰ درصد، عمق آبستگي در دماغه سرریزها سه برابر کاهش پیدا کرد (Hemmati et al., 2016). علاوه بر کاهش عمق آبستگي در دماغه سرریز با افزایش شیب تاج، حجم آبستگي و ارتفاع تپه رسوبی نیز کاهش یافت (Hemmati and Darabi, 2019).

بررسی منابع مختلف نشان داد که بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه سرریزهای مستغرق مربوط به مشخصات طول، زاویه، فاصله و دیگر پارامترهای هندسی این نوع سازه‌ها می‌باشند و در ارتباط با ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق تحقیقات کمتری انجام شده است. اگرچه دارابی و همکاران (۱۳۹۶) و همتی و دارابی در ارتباط با شیب تاج و ارتفاع سرریز مطالعاتی انجام داده‌اند (Hemmati and Darabi, 2019) اما سرریزهای که مورد استفاده قرار گرفته‌اند فاقد شیب دیواره جانبی و ضخامت تاج بوده که این پارامترهای هندسی خصوصاً شیب دیواره جانبی خود بر اساس مطالعات حق نظر و



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی و تجهیزات مربوطه

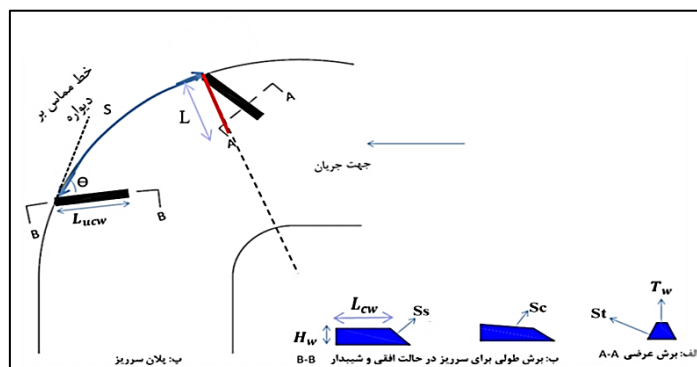
برای انجام آزمایش‌ها تعداد شش سازه دوزنقه‌ای شکل با زاویه ثابت (θ) ۶۰ درجه، طول مؤثر (L) ۳۰ درصد عرض سطح آب، شیب دماغه (S_s) و شیب دیواره جانبی عمودی-افقی (S_t) ۱:۰/۷، فاصله سرریزها (S) سه برابر طول مؤثر سازه، ضخامت تاج (T_w) ۵ سانتیمتر، شیب تاج (S_c) صفر و ۷ درصد و ارتفاع سرریزها (H_w) ۳۰ و ۷۰ درصد عمق آب ورودی کانال، احداث گردید (شکل‌های ۱ و ۲). با

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، مطالعه لاگاس و همکاران و مطالعه کانینگهام و لین تعیین شدند (Lagasse et al., 2009; Cunningham and Lyn, 2016).

۰/۳۹ و ۰/۴۳) ارزیابی شد.

توجه به امکانات آزمایشگاهی، اندازه رسوبی و شرایط کانال، عملکرد سرریزها در شرایط مختلف هیدرولیکی (اعداد فرود ۰/۳۵،



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

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. نتایج نشان داد که تقریباً ۹۲ درصد از ماکزیمم عمق آبشستگی در دو ساعت شروع اول آزمایش اتفاق افتاد. 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 سنجش توپوگرافی بستر برداشت شد (شکل ۳).

روش انجام آزمایش‌ها

در ابتدای هر آزمایش به منظور جلوگیری از آبشستگی اولیه در قوس، دریچه پایین دست 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 پایین دست به آرامی باز شد تا شرایط جریان مورد نظر برقرار گردد. دبی ورودی به کانال با استفاده از دبی سنج اولتراسونیک نصب شده بر روی لوله ورودی به مخزن بالادست با دقت ۲٪ ± اندازه‌گیری گردید (شکل ۱). برای اندازه‌گیری عمق جریان از عمق سنج نقطه‌ای استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها شرایط آب زلال حاکم بود. برای تعیین زمان تعادل نسبی بستر، یک آزمایش



شکل ۳- دستگاه سنجش توپوگرافی بستر

گردید.

با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده پارامترهای مؤثر بر رسوب شامل H_s : حداکثر عمق آبشستگی، H_b : ماکزیمم ارتفاع رسوبی در قوس داخلی، d_{50} : اندازه متوسط مصالح بستر، ρ_s : جرم مخصوص ذرات رسوب، σ_i : انحراف معیار هندسی، ϕ : زاویه ایستایی، Q : دبی جریان، v : سرعت متوسط جریان، ρ_w : جرم

آنالیز ابعادی

تحلیل ابعادی روشی است که ارتباط بین پارامترهایی را که در یک پدیده دخالت دارند به صورت گروه‌هایی بدون بعد بیان می‌کند. در این قسمت ابتدا متغیرهای مهم تأثیرگذار بر خصوصیات رسوب در مدل متاندری با وجود سرریزهای مستغرق شناسایی شد و پس از آن با استفاده از روش π باکینگهام که یکی از روش‌های مهم تجزیه و تحلیل ابعادی است پارامترهای بدون بعد به صورت زیر استخراج

$$\frac{H_b}{L} = f_2 \left(F_r, \frac{H_w}{D}, S_{cw} \right) \quad (3)$$

نتایج و بحث

بررسی وضعیت الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس

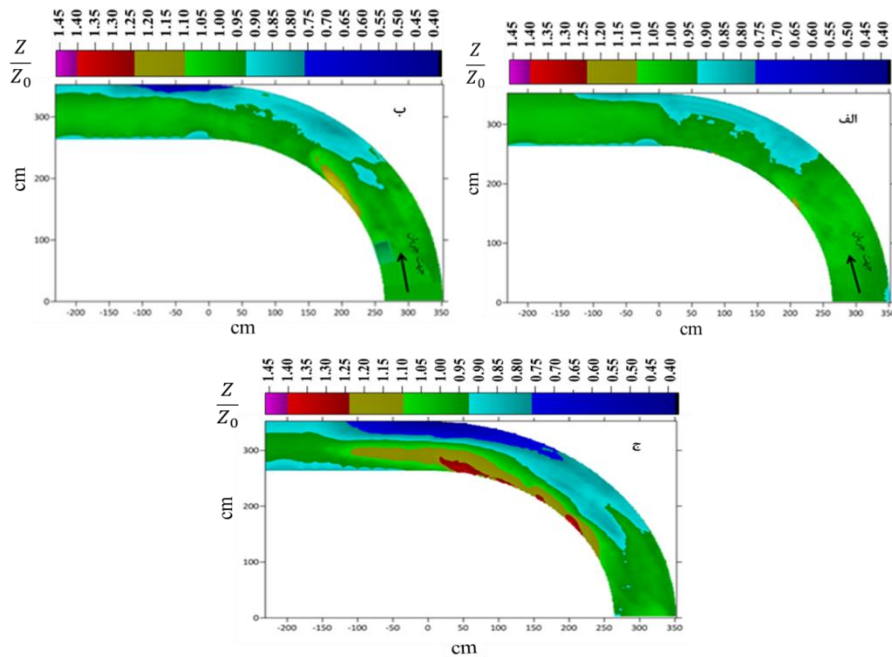
آزمایش‌ها در دو حالت بدون سازه و با وجود سازه انجام شد. در حالت بدون سرریز شروع آبشستگی در قوس از نیمه دوم قوس تا انتها و پایین دست قوس مشاهده می‌شود که دلیل آن تغییر سرعت حداکثر به سمت ساحل خارجی در نیمه دوم قوس می‌باشد (شکل ۴). با افزایش عدد فرود، حداکثر عمق آبشستگی در قوس خارجی به سمت پایین دست و خروجی قوس منتقل شده و تشکیل تپه رسوبی با ابعاد بزرگ‌تر در قوس داخلی را می‌دهد که با نتایج واقفی و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد. علاوه بر این، با افزایش عدد فرود مشاهده می‌شود که آبشستگی به سمت بالادست توسعه پیدا کرده است (شکل ۴).

حجمی آب، σ : نیروهای کشش سطحی، μ : ویسکوزیته دینامیکی، g : شتاب ثقل، S_o : شیب کف کانال، T_w : عرض تاج سرریز، R_c : شعاع مرکزی قوس، H_w : ارتفاع سرریزها، S : فاصله بین سرریزها، θ_w : زاویه احداث سرریزها، L : تصویر واقعی طول تاج سرریز در امتداد شعاع قوس، L_{ucw} : طول واقعی تاج سرریز، L_{ucw} : طول واقعی سرریز در کف، B : عرض کف کانال، S_{cw} : شیب تاج سرریز و D : عمق آب در کانال‌ها شناسایی شدند. سپس روابط بین متغیرها به صورت رابطه (۱) بیان گردید:

$$f \left(Q, \rho_w, \rho_s, \sigma, \sigma_i, \mu, g, S_o, T_w, R_c, H_w, \theta_w, \varphi, L, L_{ucw}, S, L_{ucw}, B, D, S_{cw}, V, d_{50}, H_s, H_b \right) = 0 \quad (1)$$

در نهایت با استفاده از آنالیز ابعادی به روش π باکینگهام و در نظر گرفتن جرم حجمی آب، جرم مخصوص ذرات رسوب و سرعت متوسط به عنوان پارامترهای تکرارشونده روابط زیر که تابعی از گروه‌های بدون بعد می‌باشند استخراج گردید.

$$\frac{H_s}{L} = f_1 \left(F_r, \frac{H_w}{D}, S_{cw} \right) \quad (2)$$



شکل ۴- تغییرات توپوگرافی بستر در حالت بدون سازه (Z) نسبت به ضخامت بستر اولیه (Z_0)، الف: فرود ۰/۳۵، ب: فرود ۰/۳۹ و ج: فرود ۰/۴۳

۵ و ۶).

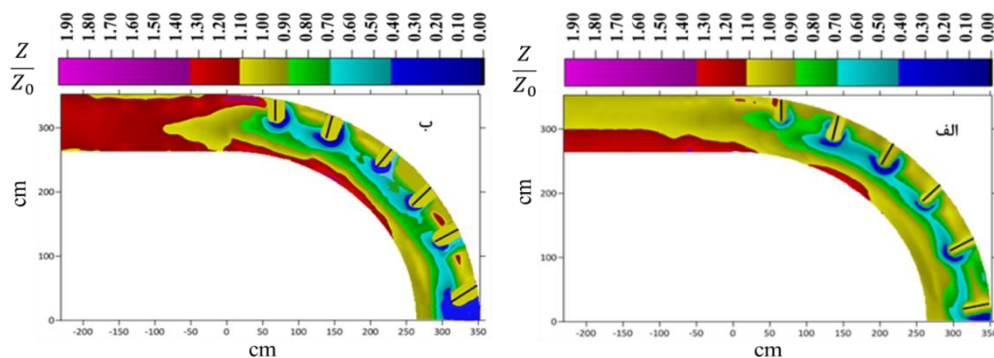
مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر همانند نتایج دریک و همتی و همکاران نشان داد که احداث سرریزهای مستغرق صرف‌نظر از ارتفاع و شیب تاج عامل کنترل و انحراف جریان از دیواره خارجی قوس به سمت تپه رسوبی بوده و باعث فرسایش تپه رسوبی شده

شکل ۴ نشان می‌دهد که خط‌القعر در حالت بدون سازه دقیقاً چسبیده به دیواره خارجی قوس اتفاق افتاده است. درحالی‌که بعد از احداث این سازه‌ها خط‌القعر از دیواره خارجی قوس در حالت بدون سازه به اندازه طول مؤثر سرریزها از دیواره خارجی فاصله گرفته و به سمت پنجه سرریزها و مرکز کانال جابجا شده است (شکل‌های

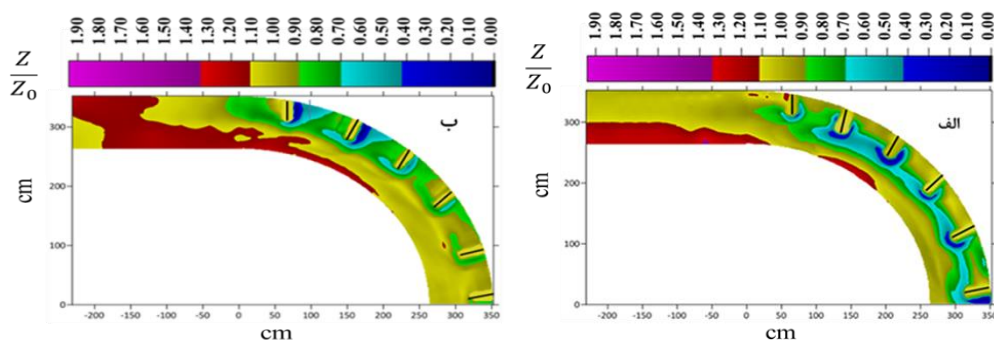
آن است که با ایجاد شیب در تاج سرریز، فرسایش و رسوبگذاری در سرتاسر قوس کاهش پیدا کرده است (شکل ۶). این حقیقت را می-توان به کاهش سطح قرارگرفته سرریز در مقابل جریان با ایجاد شیب و در نتیجه کاهش شدت تلاطم و کاهش قدرت گردابه‌های ایجاد شده در پایین دست دماغه سرریزها نسبت داد (Hemmati and Hemmati, 2005; Darabi, 2019). بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر، نتایج هم‌متی و دارابی و هم‌متی و همکاران با افزایش شیب تاج سرریز، عمق آبستنگی در دماغه سرریزها کاهش پیدا کرده است (Hemmati et al., 2016). علاوه بر این، شکل ۶ نشان می‌دهد که سرریزها با شیب تاج صفر در کنترل و هدایت جریان از دیواره خارجی به سمت تپه رسوبی شکل‌گرفته در دیواره داخلی مؤثرتر عمل کرده‌اند و باعث کاهش بیشتر سطح تپه رسوبی در قسمت دیواره داخلی شده‌اند.

است (Derrick, 1999; Hemmati et al., 2016). 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 می-باشد که این امر توسعه عرض رودخانه در محل قوس، برای کشتیرانی و ناوبری را به دنبال دارد (Richardson et al., 1975).

مقایسه توپوگرافی بستر در آزمایش‌های مربوط به سرریزهای مستغرق با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد عمق آب ورودی 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 (شکل ۵). این امر می‌تواند ناشی از ایجاد تلاطم زیاد و تولید گردابه‌های قوی‌تر در دماغه سرریزها با ارتفاع نسبی بیشتر باشد (دارابی و همکاران، ۱۳۹۶). مقایسه توپوگرافی بستر در آزمایش‌های مربوط به سرریزهای مستغرق با شیب تاج صفر و ۷ درصد حاکی از



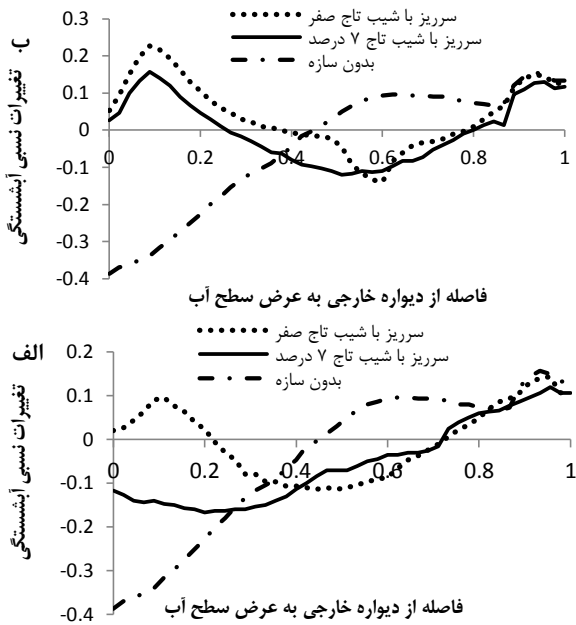
شکل ۵- تغییرات توپوگرافی بستر اطراف سرریزها با شیب تاج صفر (Z) نسبت به ضخامت بستر اولیه (Z_0)، الف: سرریز با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد عمق آب ورودی، ب: سرریز با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد عمق آب ورودی



شکل ۶- تغییرات توپوگرافی بستر اطراف سرریزها با ارتفاع ۳۰ درصد عمق آب ورودی (Z) نسبت به ضخامت اولیه بستر (Z_0)، الف: سرریز با شیب تاج صفر، ب: سرریز با شیب تاج ۷ درصد

حداکثر آبستنگی در خروجی قوس (زاویه ۹۰ درجه) و پایین دست اتفاق افتاده که برای فرود ۰/۴۳ نسبت حداکثر عمق آبستنگی به ضخامت اولیه بستر در حدود ۶۵ درصد می‌باشد. اگرچه در این مطالعه

تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر حفاظت قوس خارجی نتایج الگوی رسوب در حالت بدون سازه (شکل ۴) نشان داد که



شکل ۸- اثر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر تغییرات نسبی آبخستگی (تغییرات آبخستگی نسبت به طول مؤثر سرریز) در مقطع ۹۰ درجه با فرود $0/43$ ، الف: سرریز با ارتفاع ۳۰ درصد عمق آب ورودی، ب: سرریز با ارتفاع ۷۰ درصد عمق آب ورودی.

پتانسیل رسوبگذاری در محل حداکثر آبخستگی، برای سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ و ۷۰ درصد با تاج شیب‌دار به ترتیب $24/33$ و ۷ درصد کمتر از سرریزهای با تاج صفر می‌باشد (شکل ۸). بر اساس مطالعات همتی و همکاران و همتی و دارابی کاهش سطح قرارگیری سرریز در مقابل جریان با ایجاد شیب، عامل کاهش شدت تلاطم و مانع ایجاد گردابه‌های قوی در پایین دست سرریزها بوده است که این امر، ایجاد آبخستگی کمتر در دماغه سرریزها و کاهش پتانسیل رسوبگذاری توسط این سازه‌ها را سبب شده است (Hemmati et al., 2016; Hemmati and Darabi, 2019).

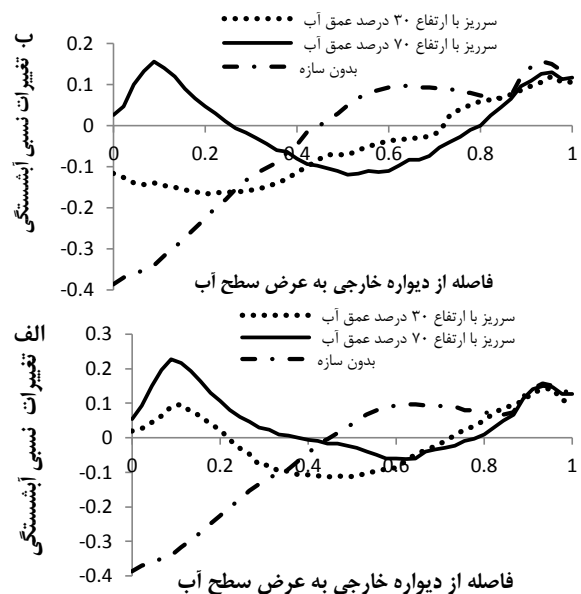
به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد که سرریزها با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد و شیب تاج صفر نسبت به سایر موارد عملکرد بهتری در حفاظت قوس خارجی داشته و با احداث این سازه در قوس، پتانسیل رسوبگذاری در محل حداکثر آبخستگی $56/66$ درصد بیشتر از حالت بدون سازه بوده است.

تأثیر شیب و تاج سرریزهای مستغرق بر ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی

هدف کاربردی از احداث سرریزهای مستغرق در قوس رودخانه، فقط کنترل آبخستگی 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

اختلاف اندکی با مطالعات کانینگهام و لین و همتی و دارابی که به ترتیب محل حداکثر آبخستگی در قوس ۹۰ درجه را مقطع ۵۸ و $62/5$ درجه بیان کرده‌اند مشاهده می‌شود (Cunningham and Lyn., 2016; Hemmati and Darabi, 2019) اما با مطالعات ماتسورا و تاونسند، مشکوری‌نیا و همکاران و سین و همکاران که نشان داد برای قوس‌های ملایم ماکزیمم تنش برشی در انتهای قوس کانال اتفاق می‌افتد مطابقت نسبتاً خوبی داشته است (Matsuura and Townsend, 2004; Mashkoornia et al., 2010; Sin et al., 2010).

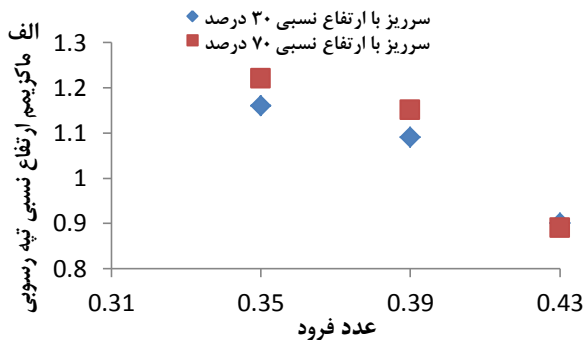
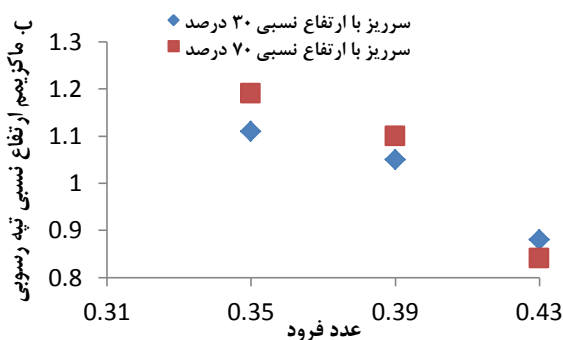
در شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات نسبی آبخستگی (تغییرات آبخستگی نسبت به طول مؤثر سرریز $30/66\text{cm}$) برای سرریز با ارتفاع و شیب تاج‌های مختلف در عدد فرود $0/43$ و مقطع ۹۰ درجه (محل حداکثر آبخستگی در حالت بدون سازه) نشان داده شده است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که رسوبگذاری در محل حداکثر آبخستگی توسط سرریزها با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد عمق آب ورودی با شیب تاج صفر و ۷ درصد، نسبت به سرریزها با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد عمق آب ورودی به ترتیب $13/66$ و $29/66$ درصد بیشتر بوده و عملکرد مناسب‌تری در حفاظت قوس خارجی داشته است. کانینگهام و لین بیان کردند سرریزهای با ارتفاع بیشتر نسبت به حفاظت قوس خارجی عملکرد بهتری داشته‌اند (Cunningham and Lyn, 2016).



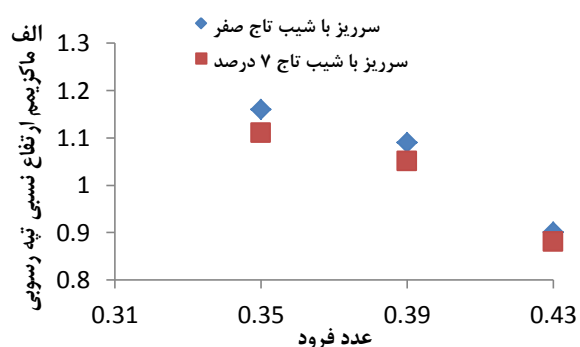
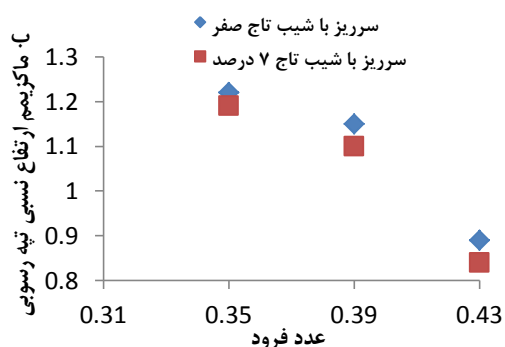
شکل ۷- اثر ارتفاع نسبی سرریزهای مستغرق (ارتفاع سرریز نسبت به عمق آب ورودی) بر تغییرات نسبی آبخستگی (تغییرات آبخستگی نسبت به طول مؤثر سرریز) در مقطع ۹۰ درجه با فرود $0/43$ ، الف: سرریز با شیب تاج صفر، ب: سرریز با شیب تاج ۷ درصد.

نتایج تحقیق حاضر همانند یافته‌های همتی و همکاران، حاکی از آن است که تغییر در پارامترهای هندسی سرریز اثر معنی‌داری روی کاهش ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی در قوس داخلی نداشته و فقط با افزایش عدد فرود جریان در ارتفاع‌های نسبی و شیب تاج‌های متفاوت سرریز، ارتفاع تپه رسوبی بیش از ۳۰ درصد کاهش پیدا کرده است (Hemmati et al., 2016).

می‌باشد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که در شرایط مختلف هیدرولیکی افزایش ارتفاع نسبی و شیب تاج سرریز اثر معنی‌داری بر روی ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی (ماکزیمم ارتفاع تپه رسوبی با سازه نسبت به حالت بدون سازه) ندارد و فقط با افزایش عدد فرود جریان بیش از ۳۰ درصد ارتفاع تپه رسوبی کاهش می‌یابد. به بیانی دیگر با افزایش عدد فرود جریان، تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزها بر کاهش ارتفاع نسبی تپه رسوبی قابل ملاحظه نمی‌باشد.



شکل ۹- اثر ارتفاع نسبی سرریزهای مستغرق (ارتفاع سرریز نسبت به عمق آب ورودی) بر ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی در قوس داخلی تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت، الف: سرریزهای مستغرق با شیب تاج صفر، ب: سرریزهای مستغرق با شیب تاج ۷ درصد



شکل ۱۰- اثر شیب تاج سرریزهای مستغرق بر ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی در قوس داخلی تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت، الف: سرریزهای مستغرق با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد عمق آب ورودی، ب: سرریزهای مستغرق با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد عمق آب ورودی

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 بدون سازه تقریباً در زاویه ۹۰ درجه و پایین دست قوس، نزدیک دیواره خارجی اتفاق افتاده است. درحالی‌که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به وضوح قابل مشاهده است که با احداث سرریزهای مستغرق در قوس خارجی، ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی (عمق آبشستگی در دماغه سرریز نسبت به طول مؤثر سرریزها (۳۰/۶۶ cm))، اطراف دماغه سرریز W5 (زاویه ۵۰-۶۵ درجه) اتفاق افتاده است این بدان معنی است که چاله آبشستگی از انتهای پایین دست به سمت بالادست، و از دیواره خارجی به سمت

بررسی ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزهای مستغرق

ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزها یکی از 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 پایین دست 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

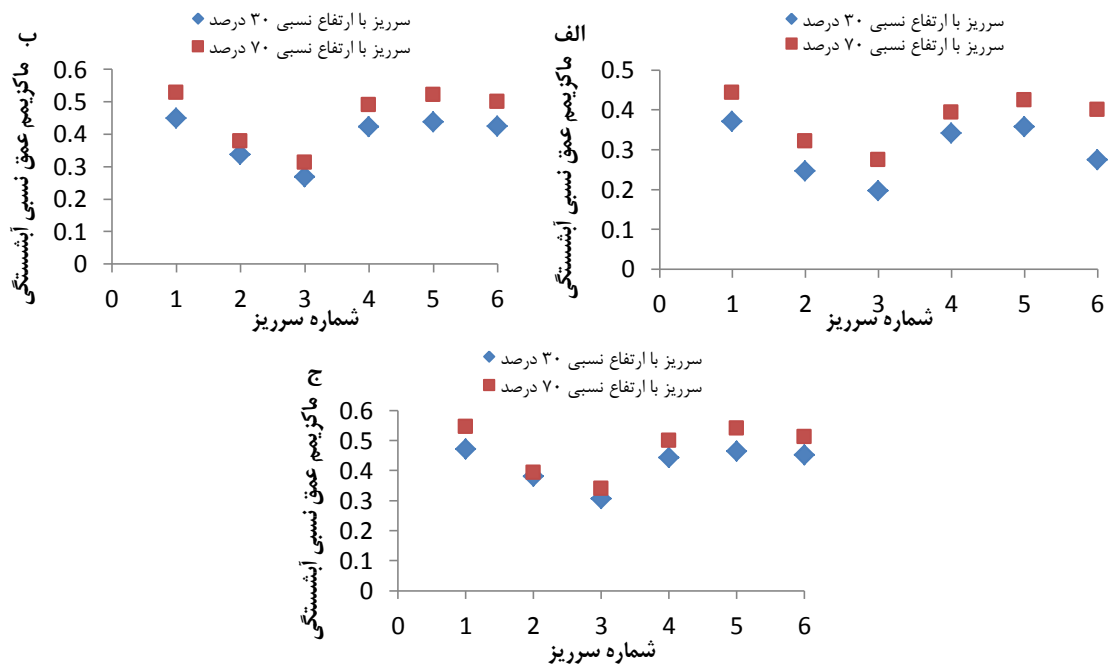
ارتفاع به دلیل افزایش قدرت جریان گردابی در دماغه و اطراف سرریزها (دارابی و همکاران، ۱۳۹۶)، متوسط ماکزیم عمق نسبی آبشستگی در تمامی شرایط هیدرولیکی اطراف سرریز W5 در حدود ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده است (شکل ۱۱).

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش شیب تاج در سرریزها با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد عمق آب ورودی، به دلیل کاهش شدت گردابه‌ها در دماغه سرریزها بر اساس مطالعات همتی و همکاران و همتی و دارابی، متوسط عمق نسبی آبشستگی در اطراف سرریز شماره ۵ در تمامی شرایط هیدرولیکی تقریباً ۲۷ درصد کاهش پیدا کرده است (Hemmati et al., 2016; Hemmati and Darabi, 2019).

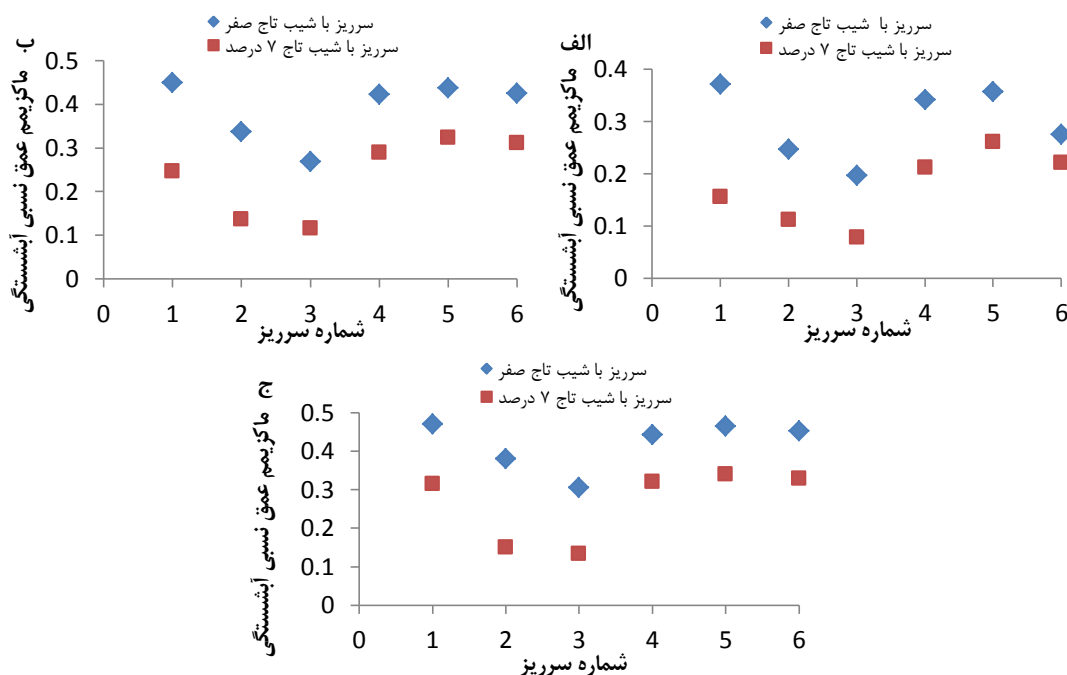
با توجه به این که با افزایش ارتفاع، ماکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزها افزایش پیدا کرده و با افزایش شیب تاج ماکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزها کاهش پیدا کرده است می‌توان نتیجه گرفت که سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد عمق آب ورودی و شیب تاج ۷ درصد در کاهش ماکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزها نسبت به سایر موارد مناسب‌تر عمل کرده‌اند.

مرکز کانال جابجا شده است. در قوس‌های ملایم، ماکزیم سرعت ابتدا روی دیواره داخلی بوده و از نیمه دوم قوس به دیواره خارجی منتقل می‌شود؛ در نتیجه سرریزهای W4، W5 و W6 بیشتر تحت تأثیر ماکزیم سرعت جریان قرار گرفته و آبشستگی بیشتری نیز در این ناحیه صورت گرفته است.

همتی و همکاران گزارش دادند که در یک رودخانه پیمان‌رودی ماکزیم عمق آبشستگی در دماغه سازه یا سازه‌های آخری روی داده است (Hemmati et al., 2016). البته در اطراف سرریز شماره ۱ 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 قابل توجهی مشاهده می‌شود (دارابی و همکاران، ۱۳۹۶). عدد فرود یکی از مهم‌ترین متغیرهای توصیفی برای مشخص کردن الگوی فرسایش و رسوبگذاری بستر با و بدون وجود سرریزها در قوس می‌باشد. در تمامی حالات آزمایش با افزایش عدد فرود ماکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزها افزایش پیدا کرده است چراکه با افزایش عدد فرود انرژی جنبشی و تنش برشی بستر افزایش یافته است در نتیجه نیروی بیشتری برای به حرکت در آوردن و جابجایی ذرات بستر وجود دارد (Sui et al., 2006). با افزایش



شکل ۱۱- ماکزیم عمق نسبی آبشستگی (ماکزیم عمق آبشستگی در دماغه سرریز نسبت به طول مؤثر سرریز) در دماغه سرریزها با ارتفاع‌های نسبی مختلف (ارتفاع سرریز نسبت به عمق آب ورودی) و شیب تاج صفر، الف: فرد ۰/۳۵، ب: فرود ۰/۳۹، ج: فرود ۰/۴۳



شکل ۱۲- ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی (ماکزیمم عمق آبشستگی در دماغه سرریز نسبت به طول مؤثر سرریز) در دماغه سرریزها با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد عمق آب ورودی و شیب تاج متغیر، الف: فرود ۰/۳۵، ب: فرود ۰/۳۹، ج: فرود ۰/۴۳

نتیجه گیری

نسبی آبشستگی (عمق آبشستگی در دماغه سرریز نسبت به طول مؤثر سرریزها) در تمامی شرایط هیدرولیکی اطراف سرریز ۵ در حدود ۲۷ درصد کاهش پیدا کرد.

به طور کلی با توجه به این که ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزها یکی از مهم ترین پارامترهایی است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. می توان نتیجه گرفت که سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد و شیب تاج ۷ درصد از این منظر و سرریزهای با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد و شیب تاج صفر برای اهداف حفاظت از قوس خارجی نسبت به سایر موارد عملکرد مناسب تری داشته اند.

منابع

جراحزاده، ف، و شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی وضعیت خط القعر تحت تأثیر وجود سرریز مستغرق در خم ۹۰ درجه تند. پژوهش های آبخیزداری. شماره ۹۷.

دارابی، پ، همی، م، و حق دوست، ن. ۱۳۹۶. تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق در پیچ آبراهه ۹۰ درجه بر الگوی فرسایش و رسوب گذاری. تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی. جلد ۱۸. شماره ۶۸، ص ۶۶-۵۱.

کوچک، پ، کاشفی پور، س.م، قمشی، م، و فتحی، ا. ۱۳۹۶. بررسی اثر نوع آبشکن بر تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه ملایم در شرایط مستغرق. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست.

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

سرریز با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد (ارتفاع سرریز نسبت به عمق آب ورودی) و شیب تاج صفر نسبت به سایر موارد عملکرد بهتری در حفاظت قوس خارجی داشته و با احداث این سازه در قوس، پتانسیل رسوبگذاری در محل حداکثر آبشستگی ۵۶/۶۶ درصد بیشتر از حالت بدون سازه بوده است.

تغییر در ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق، اثر معنی داری روی کاهش ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی در قوس داخلی نداشته و فقط با افزایش عدد فرود جریان در ارتفاع های نسبی و شیب تاج های متفاوت سرریز، ارتفاع تپه رسوبی بیش از ۳۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

با افزایش ارتفاع در سرریزهای با تاج صفر، متوسط ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی (عمق آبشستگی در دماغه سرریز نسبت به طول مؤثر سرریزها) در تمامی شرایط هیدرولیکی اطراف سرریز شماره ۵ در حدود ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده است.

با افزایش شیب تاج برای سرریزهای با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد (ارتفاع سرریز نسبت به عمق آب ورودی) متوسط ماکزیمم عمق

- Derrick, D.L. 1999. Bendway weir history, theory and design. Available from: <http://chl.wes.army.mil/research/hydstruc/bankprotect/bendweir/work.htm>.
- Ehsan Zabir, M. 1976. Study of river bank protection methods. Water Resource Development Training Centre University of Roorkee. Indiana.
- Fischenich, J.C. 2003. Effects of riprap on riverine and riparian ecosystems. Rep. ERDC/EL TR-03-4, U.S. Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center Environmental Laboratory. Vicksburg, MI.
- FHWA. 1997. Bridge scour and stream instability countermeasures (SI). Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular Number 23, FHWA HI-97-030.
- Heintz, M.L. 2002. Investigation of bendway weir spacing. Colorado State Univ., Engineering Research Center. Fort Collins, CO.
- Haghnazar, H., Hashemzadeh-Ansar, B., Asadzadeh, F. and Akbar-Salehi-Neyshabouri, S.A. 2018. Experimental study on the effect of single spur-dike with slop sides on location scour pattern. Journal of Civil Engineering and Materials Application.
- 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. J. Am. Sci. 8(9), 912-917.
- 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., 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. 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.
- Kinzli, K. 2005. Effects of bendway weir characteristics on resulting eddy and channel flow conditions. Thesis (M.S.). Colorado State University. Department of Civil Engineering, Fort Collins, CO.
- Kinzli, K. and Thornton, C. 2009. Predicting velocity in bendway weir eddy fields, river research and applications. Published online in Wiley Inter Science (www.interscience.wiley.com) DOI:
- جلد ۴۷. شماره ۱. ۸۰-۷۳.
- مشکورنیا، ه.، جراحزاده، ف.، رامش، س.، و شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول آبشکن مستغرق بر میزان آبستگي بستر در خم ۹۰ درجه. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
- مهرداد، ل.، همتی، م.، و یاسی، م. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه. تحقیقات آب و خاک ایران. دوره ۴۷. شماره ۳. ص ۵۱۶-۵۰۵.
- واقفی، م.، قدسیان، م.، و عظیمی، ا. ۱۳۹۲. مطالعه عددی الگوی آبستگي در کانال قوسی با استفاده از نرم افزار Flow3d. فصلنامه علمی پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی. سال سوم. شماره ۹. ص ۷۲-۵۹.
- همتی، م.، قمشی، م.، و کاشفی‌پور، س. م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و فرسایش در پیچان رود. تحقیقات منابع آب ایران. سال هشتم. شماره ۳. ص ۷۶-۶۶.
- همتی، م.، قمشی، م.، و کاشفی‌پور، س. م. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و تراز آب در پیچان رود. نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست. جلد ۴۳. شماره ۱.
- Alvarez, J.A.M. 1989. Design of groynes and spur dikes. 14-18 August. New Orleans. Louisiana In: Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering. pp. 296-301.
- Armanini, A., Sartori, F., Tomio, G., Cerchia, F. and Vergnani, M. 2010. Analysis of a fluvial groynes system on hydraulic scale model. Proc. International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow.
- Brown, S.A. 1985. Design of spur-type stream bank stabilization structures. FHWA. Report No. FHWA/RD-84.101. Final Report. 98.
- Cunningham, R., and Lyn, D. 2016. Laboratory study of bendway weirs as a bank erosion countermeasure. J. Hydraul. Eng. 142 (6), 04016004.
- Darrow, J. 2004. Effects of bendway weir characteristics on resulting flow conditions. M.S. Thesis: Colorado State University. Fort Collins. CO.
- Derrick, D.L., Boyd, M.B., Crutchfield, J.P., Henderson, R.R., and Pokrefke, T.J. 1994. Design and development of bendway weirs for the Dogtooth Bend reach. Mississippi River, hydraulic model investigation. Technical Rep. HL-94-10, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- Richardson, E.V., Stevenson, M.A. and Simons, D.B., 1975. The design of spurs for river training. Sao Paulo, Brazil In: Proceedings of the 16th IAHR Congress. pp. 382-388.
- Rozovskii, I.L. 1957. Flow of water in bends of open channels. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Kiev. 233 p.
- Smith, S.P. and Wittler, R.J. 1999. Bendway weirs and highway protection in Colorado: A case study on the Blue River. Water Operation and Maintenance Bulletin. No.187. pp: 1-6.
- Sin, K.S., Thornton, C.I., Cox, A.L. and Abt, S.R. 2010. Methodology for calculating shear stress in a meandering channel. Master thesis. Colorado State University.
- Sui, J., Fang, D. and Karney, B.W. 2006. An experimental study into local scour in a channel caused by a 90 bend. Can. J. Civ. Eng. 33 (7). 902-911.
- Uijtewaal, W.S. 2005. Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments. J. Hydraul. Eng. 131 (9). 782-791.
- Wilkerson, C.A. 1972. Stone dikes for river channels. Mil. Eng March-April.
- 10.1002/rra.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.
- Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Pagan-Ortiz, J.E., Zevenbergen, L.W., Arneson, L.A., Schall, J.D. and Girard, L. 2009. Bridge scour and stream stability countermeasures. HEC-23, FHWA-NHI-09-111. Federal Highway Administration. U. S. Dept. of Transportation. Washington, DC.
- Mashkoornia, H., Shafai-Bejestan, M., Jarrahzade, F and Ramesh, S. 2010. Experimental study on bendway weirs. River Flow 2010 - Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds) - © 2010 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7.
- Matsuura, T and Townsend, R. 2004. Stream-barb installations for narrow channel bends—A laboratory study. Can. J. Civ. Eng. 31(3). 478-486.
- Reinauer, R. and Hager, W.H. 1997. Supercritical bend flow. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol. 123, No. 3. 208.
- Rhoads, B.L. 2003. Protocols for geomorphic characterization of meander bends in Illinois. Dept. of Geography, Univ. Illinois Urbana-Champaign. Urbana Champaign, IL.

The Patterns of Erosion and Sedimentation with Bendway Weirs at a 90 ° Bend

M. Salehzadeh¹, M. Hemmati^{2*}, M. Yasi³, S. Lanzoni⁴

Received: Jan.26, 2020

Accepted: Mar.11, 2020

Abstract

Bendway weirs are short-height structures that are completely submerged and are constructed to control the movement of bends, improve shipping conditions, create aquatic habitats, etc. The purpose of this study was to evaluate the patterns of erosion and sedimentation at a 90° bend with a relative radius of curvature 3.3 in the presence of bendway weirs. To achieve this goal, a series of weirs with relative height 30 and 70% and crest slope of 0 and 7% were constructed on the outer wall of the bend. The angle (60°), length (30% of channel width) and distance between weirs (3 times of weir length) were considered constant. The results showed that due to the construction of weirs with relative height of 70% and flat crest slope, the maximum sedimentation (56.66% higher than the no-structure state) occurred at the maximum scour location. The maximum relative depth of scour in weirs with a relative height of 70% was about 17% higher than its value in weirs with a relative height of 30%. By increasing the crest slope for weirs with a relative height of 30%, the average maximum relative scour depth decreased by almost 27% in all hydraulic conditions around weir 5.

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

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering ICEA, University of Padua, Padua, Italy

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