

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق در پیچ آبراهه ۹۰ درجه بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری

پژمان دارابی، محمد همتی* و نورعلی حق دوست**

* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. تلفن: ۳۱۹۴۲۴۱۷ (۰۴۴)،

پیم‌نگار: m.hemmati@urmia.ac.ir

** به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ استادیار؛ و مربی آموزشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۲۰

چکیده

سرریزهای مستغرق در پیچ آبراهه ابزارهایی مهم در اهداف چند منظوره از جمله کنترل فرسایش، احیای آبراهه‌ها و پروژه‌های مربوط به بهبود زیستگاه‌ها هستند. این سازه‌ها مجموعه‌ای از موانع با ارتفاع کوتاه هستند که با زاویه بالادست (دافع جریان) برای کنترل و تغییر جهت جریان و سرعت در طول تمام قوس رودخانه یا آبراهه طراحی می‌شوند. هدف این تحقیق ارزیابی الگوی فرسایش و رسوبگذاری در یک قوس ۹۰ درجه (با شعاع انحنای نسبی ۳/۳) با حضور سرریزهای مستغرق و بدون وجود سرریزهاست. برای رسیدن به هدف مطالعه، مجموعه‌ای از سرریزها (۷ سرریز) با ارتفاع ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد عمق جریان ورودی در قسمت ساحل خارجی قوس احداث و در شرایط مختلف هیدرولیکی بررسی شد. زاویه سرریزها ۶۰ درجه و طول سرریزها ۳۰ درصد عرض کانال در نظر گرفته شد؛ این شرایط در تمامی آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در نتیجه احداث سرریزهای مستغرق، خط‌القعر به اندازه طول موثر سرریزها از سمت قوس خارجی به سمت مرکز کانال و در امتداد دماغه سرریزها انتقال می‌یابد. حجم آبشستگی در اثر احداث سرریزهای مستغرق با ارتفاع ۵۰ و ۷۰ درصد عمق آب به ترتیب ۵۳ و ۱۲۰ درصد بیشتر از حجم آبشستگی در حالت بدون سازه است در حالی که مقدار آن در سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد عمق آب، برابر با حالت بدون سازه است. همچنین، ماکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزهای با ارتفاع ۵۰ و ۷۰ درصد عمق آب در حدود ۲ برابر سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد است.

واژه‌های کلیدی

آبشستگی موضعی، ارتفاع سرریزهای مستغرق، پیچ ۹۰ درجه، جابه‌جایی قوس، کنترل فرسایش

مقدمه

شعاعی نیروی گریز از مرکز باعث افزایش تراز سطح آب در قوس خارجی، نسبت به قوس داخلی، می‌شود و گرادیان حاصل در عرض آبراهه، شرایط اولیه را برای چرخش جریان از سمت قوس خارجی به داخلی در عمق فراهم می‌کند. گرادیان سرعت جریان در پلان ناشی از مؤلفه عمودی نیروی گریز از مرکز و نیز گرادیان سرعت در عمق ناشی از اصطکاک بستر، باعث تقویت جریان چرخشی اولیه می‌شود. این جریان باعث کف‌کنی و انتقال

مقطع هر رودخانه با توجه به مکانیزم آن به مرور زمان دچار تغییرات شدید می‌شود. این تغییرات به‌ویژه در قوس رودخانه‌ها مشهودتر است. از مشخصه‌های بارز جریان در قوس رودخانه، وجود جریان ثانویه است که تأثیر بسزایی در الگوی جریان و رسوب رودخانه دارد (Zahiri et al., 2013). جریان ثانویه بر اثر نیروی گریز از مرکز به‌وجود می‌آید که به ذرات سیال وارد می‌شود، مؤلفه

زیستگاه‌آبزیان می‌شود؛ این زیستگاه بین خط‌القدر رودخانه و منطقه رسوبگذار بین سرریزها به وجود می‌آید (Shields *et al.*, 1998).

سرریزهای مستغرق برای اهداف کشتیرانی و حفاظت از فرسایش و جابه‌جایی قوس‌ها به کار برده می‌شوند. هدف پروژه اگر کشتیرانی باشد تا حد ممکن طول سرریزها کوتاه‌تر و اگر حفاظت ساحل رودخانه باشد طول سرریزها بیشتر باید انتخاب شود (Przedwojski *et al.*, 1995). علاوه بر آن، طول این نوع سازه‌ها به نفوذپذیری آنها هم بستگی دارد؛ بر اساس گزارش واتسن (Watson, 2003) اگر نفوذپذیری آبشکن‌ها در محدوده صفر تا ۳۵ درصد باشد، طول آنها باید کمتر از ۱۵ درصد عرض آبراهه و اگر نفوذپذیری ۸۰ درصد و بیشتر باشد، طول آنها نباید بیشتر از ۲۵ درصد عرض آبراهه باشد.

ارتفاع سرریزهای مستغرق نسبت به جریان کم عمق تعیین 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 & Wiltler, 1998). کاسترو (Castro, 1999) می‌گوید ماکزیمم ارتفاع سازه باید بین ۳۳ تا ۵۰ درصد عمق متوسط جریان در آبراهه باشد. دریک (Derrick, 1999) می‌گوید که سرریزها در آبراهه‌ها باید طوری احداث شوند که در تمام شرایط جریان، به خصوص حالت‌های متوسط و سیلابی، کار کنند. اسمیت و ویلتلر (Smith & Wiltler, 1998) ارتفاع سرریزها^۱ (OHW) را بین ۳۰ تا ۵۰ درصد انتخاب کردند. اداره فدرال بزرگراه (Anon, 2001) گزارش داده است که اکثر ارتفاع‌های مطلوب برای سرریزهای مستغرق بین ۳۰ تا ۵۰ درصد عمق متوسط سالانه جریان است. همچنین، ارتفاع این سازه‌ها باید کمتر از تراز آب متوسط فصلی یا سطح نرمال باشد و نیز باید برابر یا بالای متوسط کمترین تراز آب باشد. سرریزهای مستغرق باید به اندازه کافی ارتفاع داشته باشند تا درصد زیادی از جریان را تسخیر یا

رسوبات از قوس خارجی به طرف قوس داخلی می‌شود. اگر سطح اولیه رسوبات در بستر به صورت افقی ایجاد شده باشد، مقطع عرضی در اثر تداوم جریان، از مستطیلی (افقی) به مثلثی تبدیل می‌شود. این روند تا رسیدن به تعادل و ثبات مقطع عرضی با توجه به دبی و رسوب تزریقی ادامه می‌یابد (Abolghasemi, 2012). یکی از موارد مهم که همواره هدف مطالعات گسترده محققان بوده است، نحوه و الگوی آبشستگی در قوس خارجی و شیوه‌های مقابله با آن است (Zahiri *et al.*, 2013). هدف اولیه سرریزهای مستغرق، بهبود شرایط کشتیرانی در رودخانه‌های بزرگ است که بعدها به عنوان سازه‌های محافظت از فرسایش در قوس آبراهه‌های کوچک نیز به کار برده شد (Rhoads, 2003; Hemmati *et al.*, 2013). سرریزهای مستغرق سازه‌هایی سنگی با ارتفاعی کوتاه، ظاهراً شبیه آبشکن‌ها اما از لحاظ عملکرد متفاوت با آنها هستند از جمله اینکه طول بیشتری دارند. این سازه‌ها باعث کاهش سرعت در نزدیک ساحل، کاهش شدت جریان در قوس خارجی، بهبود زیستگاه آبزیان، بهبود شرایط کشتیرانی، رسوبگذاری در قوس خارجی و کاهش رسوبگذاری در قوس داخلی و... می‌شوند (Fischenich & Allen, 2000). در اثر احداث این سازه‌ها سه ناحیه هیدرولیکی ایجاد می‌شود: الف) منطقه سکون بین سرریزها؛ ب) خط‌القدر جلو سرریزها، وجود ناحیه‌ای با سرعت زیاد در سطح آب و سرعت کم در کف؛ و ج) وجود لایه‌ای برشی بین ناحیه غیرچرخشی و ناحیه با سرعت زیاد (دماغه سرریزها) (Abad *et al.*, 2008). سرریزهای مستغرق در پیچ آبراهه باعث انتقال خط‌القدر از سمت قوس خارجی به سمت مرکز کانال و در امتداد دماغه سازه‌ها می‌شوند که این امر از جابه‌جایی قوس‌ها جلوگیری می‌کند (Jarrahzade & Shafai-Bejestan, 2011; Hemmati *et al.*, 2013). آب ساکن که بین سرریزها شکل می‌گیرد (ناحیه سکون) باعث ایجاد

نشان می‌دهد که عملکرد سرریزهای مستغرق با ارتفاع ۷۰ درصد عمق متوسط جریان ورودی در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی و افزایش آن در قوس داخلی، نسبت به سایر ارتفاعها بهتر است. ماکزیمم عمق و حجم آبشستگی در سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد عمق متوسط جریان ورودی، کمتر از عمق و حجم آبشستگی در سایر سرریزهاست و بیشترین مقدار آن در حالت آبشکن ایجاد شده است.

کانینگهام و لین (Cunningham & Lyn, 2016) به بررسی آزمایشگاهی کارایی سرریزهای مستغرق در حفاظت از فرسایش قوس ۹۰ درجه با بستر و کناره‌های فرسایش‌پذیر پرداختند. در این بررسی، زاویه و طول سرریزها در تمامی آزمایشها ثابت و به ترتیب برابر با ۷۵ درجه و ۲۵ درصد عرض آبراهه و فاصله سازه‌ها نیز ثابت و ۳/۷ برابر طول موثر سرریزها انتخاب شد. از سه ارتفاع سرریز برابر با ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد عمق آب ورودی برای آزمایشها استفاده کردند. نتایج آزمایشها نشان داد که مرز ورودی برای سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی به‌طور متوسط پایدار است اما برای سرعت‌های بیشتر از سرعت بحرانی، مقداری جزئی فرسایش در مرز ورودی روی می‌دهد. به دلیل آبشستگی اتفاق افتاده در قسمت‌های ابتدایی قوس در حالت با سرریز و بدون سرریز، این دو محقق گزارش دادند که طراحی سرریزهای مستغرق بر اساس راهنمای HEC-23 رضایت‌بخش نیست و نیز سرریزهای با ارتفاع ۱۰۰ درصد عمق آب ورودی در کاهش آبشستگی بخش ورودی قوس خارجی عملکرد مناسبی دارند.

بررسی مطالعات در خصوص سرریزهای مستغرق واقع در پیچ آبراهه نشان می‌دهد که کارهای آزمایشگاهی در زمینه تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر الگوهای آبشستگی و رسوبگذاری در قوس رودخانه کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است و هنوز دستورالعمل کاملی

جدا کنند تا اینکه نتایج مورد انتظار از آنها به دست آید. در کاربردهای مربوط به بهبود عرض کانال برای کشتیرانی، ارتفاع سرریزها باید به اندازه‌ای کوتاه باشد تا کشتی‌ها به راحتی از روی آنها عبور کنند (FWHA, 2001). در پروژه‌ای که روی رودخانه Blue در کلرادو اجرا شد، ارتفاع به کار برده شده بین ۰/۳ تا ۰/۵ برابر عمق جریان سیلابی بود (Smith & Wiltler, 1998). در آبراهه‌هایی که نگرانی برای کشتیرانی وجود دارد روش‌های مختلفی به کار برده شده است؛ از جمله اینکه بعد از محاسبه تراز آب برای شرایط جریان کم، عمق مورد نیاز برای کشتیرانی در زیر قایق تعیین می‌شود و از اختلاف این دو، ارتفاع سرریز انتخاب می‌گردد (Winkler, 2003).

مهردار (Mehrdar, 2015) به بررسی اثر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداخت. او از سه ارتفاع ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد عمق آب ورودی برای ساخت سرریزهای مستغرق استفاده کرد. نتایج تحقیق وی نشان می‌دهد که بعد از احداث سرریزها، سرعت متوسط در قوس خارجی (نزدیک دیواره) نسبت به حالت بدون سازه بیش از ۷۰ درصد کاهش اما در سمت قوس داخلی بیش از ۵۰ درصد افزایش یافته است. این محقق همچنین می‌گوید که سازه‌های با ارتفاع ۷۰ درصد، در کاهش سرعت متوسط در سمت قوس خارجی عملکرد بهتری دارند.

بیگدلی‌تبار (Bigdeli-Tabar, 2015) با استفاده از مدل ریاضی Mike 3 Flow Model FM به بررسی اثر ارتفاع و فاصله سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان و رسوب در پیچان رود پرداخت. او سه فاصله ۲، ۳ و ۴ برابر طول موثر سازه برای فواصل احداثی سرریزها، دو ارتفاع ۳۰ و ۷۰ درصد عمق متوسط جریان ورودی برای سرریزهای مستغرق و یک حالت آبشکن (حالت غیر مستغرق) را در یک مدل پیچان‌رودی با بستر زنده همراه با تزریق پیوسته رسوب به کار گرفت. نتایج تحقیق وی

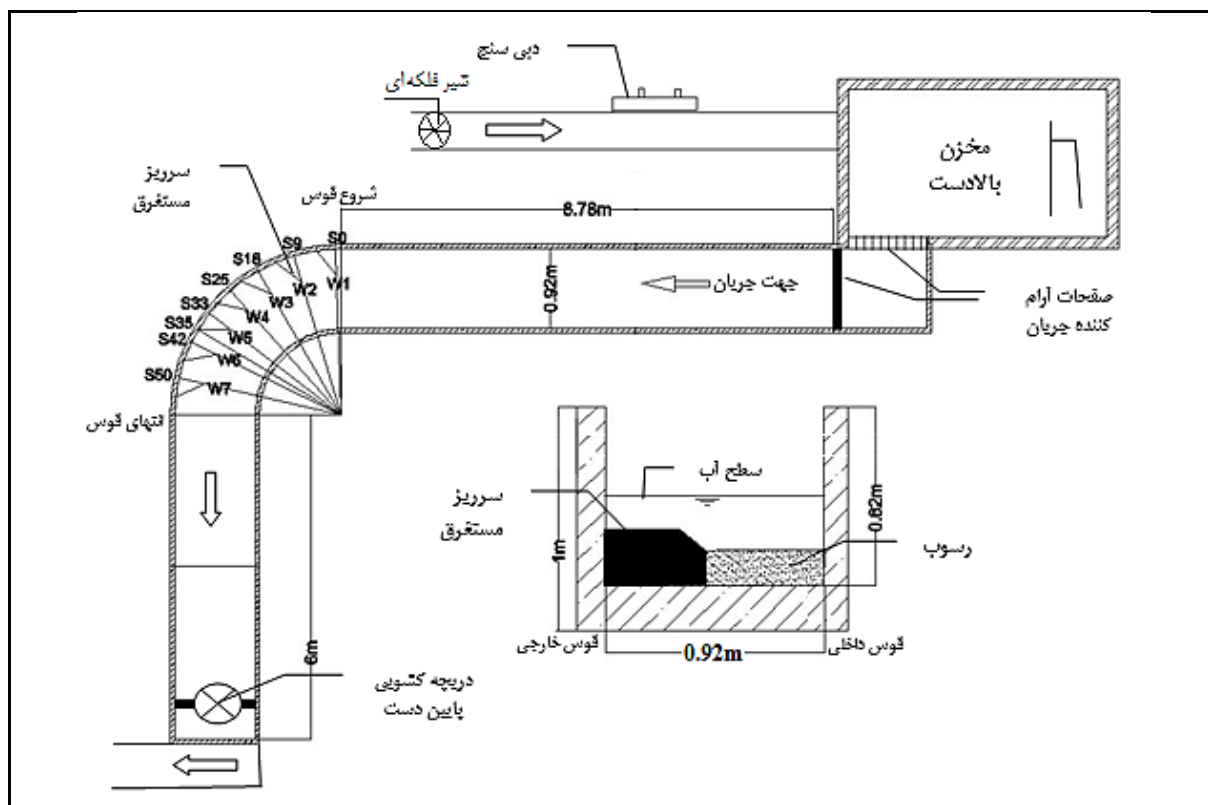
آزمایشگاهی موجود، یک کانال با قوس ۹۰ درجه است که از یک بازه مستقیم در بالادست قوس به طول ۸/۷۸ متر و یک بازه مستقیم به طول ۶ متر در پایین دست قوس تشکیل شده است؛ این دو بازه مستقیم از طریق قوس ۹۰ درجه با انحنای نسبی ۳/۳ به هم متصل شده‌اند. طول دیواره‌های خارجی و داخلی قوس به ترتیب ۵/۵۳ و ۴/۰۸ متر، عمق کانال ۶۲ سانتی‌متر و عرض آن ۹۲ سانتی‌متر است. برای آرام کردن جریان از صفحات مشبک در قسمت ورودی و برای کنترل عمق جریان در فلوم در دریچه کشویی در پایین دست استفاده شد (شکل ۱).

برای تعیین ارتفاع سرریزها وجود ندارد. از این رو مطالعه حاضر در نظر دارد به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و فرسایش و عملکرد آنها در حفاظت از قوس خارجی بپردازد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

برای اجرای آزمایش‌ها، از فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر فرهودی، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه استفاده شد. کانال



شکل ۱- تجهیزات آزمایشگاهی

ذرات رسوبی بستر را نشان می‌دهد. بعد از اطمینان از بالا بودن عمق آب در کانال، دبی جریان با دبی‌سنج اولتراسونیک^۱ نوع UFM 610P از محصولات KROHNE (شکل ۳-الف) با دقت $\pm 2\%$ تنظیم گردید. برای اندازه‌گیری عمق جریان از عمق‌سنج نقطه‌ای^۱ با دقت ۰/۱

روش کار

ابتدا مواد رسوبی با قطر متوسط ۱/۴ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی ۱/۲۹ تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در طول بستر کانال تسطیح شد و پس از آن اجازه داده شد تا جریان به آرامی وارد کانال شود. شکل ۲، نمودار دانه‌بندی

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق در بیج ابراهه...

مختصات دکارتی با استفاده از نرم‌افزارهای Surfer و Excel آنالیزهای لازم انجام شد و نتایج آن در بخش بحث و نتایج ارائه شده است.

پارامترها و متغیرهای مربوط به سرریزهای مستغرق با استفاده از راهنمای Hec-23 (Lagasse et al., 2009) تعیین شدند. هفت سازه دوزنقه‌ای (شکل ۱) با شیب تاج تخت، با زاویه ثابت ۶۰ درجه، با طول تصویر شده (طول مؤثر) ثابت ۳۰ درصد عرض سطح آب و با فاصله ثابت ۳ برابر طول سازه در طول قوس خارجی با ارتفاع‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد عمق آب ورودی کانال احداث گردید. با توجه به امکانات آزمایشگاه و شرایط کانال، عملکرد سرریزها در شرایط مختلف هیدرولیکی (سه دبی جریان برابر با ۴۶، ۵۶ و ۶۶ لیتر بر ثانیه به ترتیب متناظر با عدد فرودهای ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳) ارزیابی شد. سرریزها از جنس پلاستیک فشرده بدون انعطاف با ضخامت یک سانتی‌متر تهیه شدند. برای استقرار سرریزها در قوس خارجی کانال از ریل‌های متصل به کف و برای آب‌بندی آنها از چسب آکواریوم استفاده شد.

میلی‌متر استفاده شد. عمق آب در کل آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۱۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که برای کنترل آن از دریچه کشویی در انتهای فلوم استفاده گردید. در تمامی آزمایش‌ها شرایط آب زلال حاکم بود. برای تعیین زمان تعادل نسبی بستر که در آن بیش از ۹۰ درصد عمق آبشستگی اتفاق می‌افتد، از عمق سنج نقطه‌ای استفاده شد. در چند آزمایش اولیه، بعد از تنظیم دبی جریان، عمق آبشستگی با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای در حین جاری بودن آب در فلوم و با گذشت زمان ثبت گردید که با استفاده از نتایج آن، زمان تعادل نسبی به دست آمد. مدت زمان اجرای آزمایش‌ها ۶ تا ۸ ساعت، با توجه به دبی جریان، متغیر بود زیرا با افزایش دبی جریان، قدرت حمل رسوبات بستر افزایش می‌یافت و بستر زودتر به تعادل می‌رسد. بعد از تعادل نسبی آبشستگی، دبی جریان قطع شد و پس از زهکشی کامل آب موجود در فلوم، توپوگرافی بستر با دقت ۰/۴ میلی‌متر، با استفاده از دستگاه سنجش توپوگرافی بستر^۲ (شکل ۳-ب) ساخت شرکت آذر آشنا آب تبریز برداشت شد. داده‌های ثبت شده با این دستگاه در مختصات قطبی هستند که با تبدیل داده‌ها به



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی رسوبات



شکل ۳- الف) دی‌سنج اولتراسونیک و ب) دستگاه برداشت پروفیل رسوب ساخت شرکت آذر آشنا آب تبریز

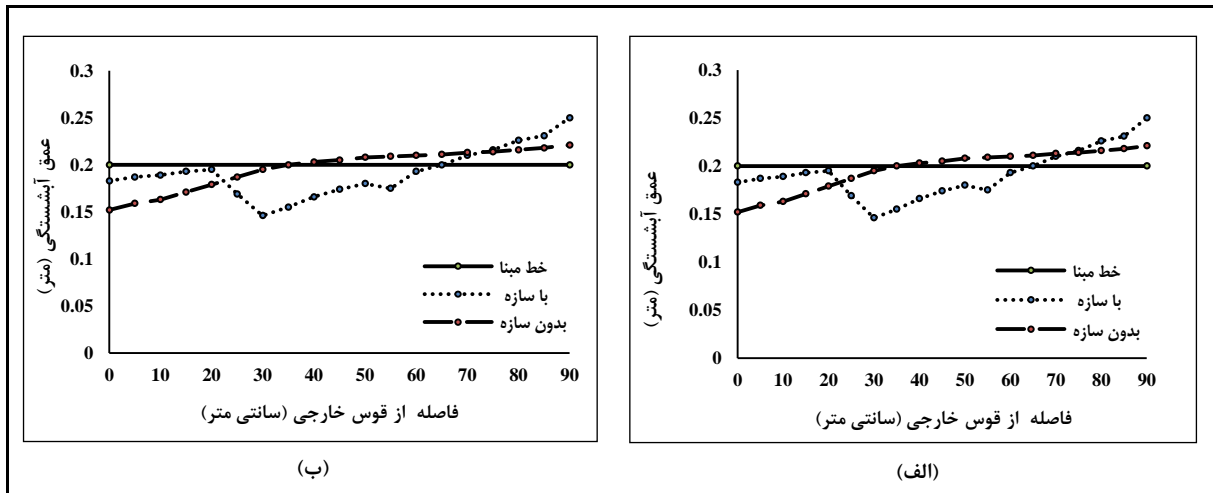
نتایج و بحث

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر موقعیت خط‌القعر آبراهه

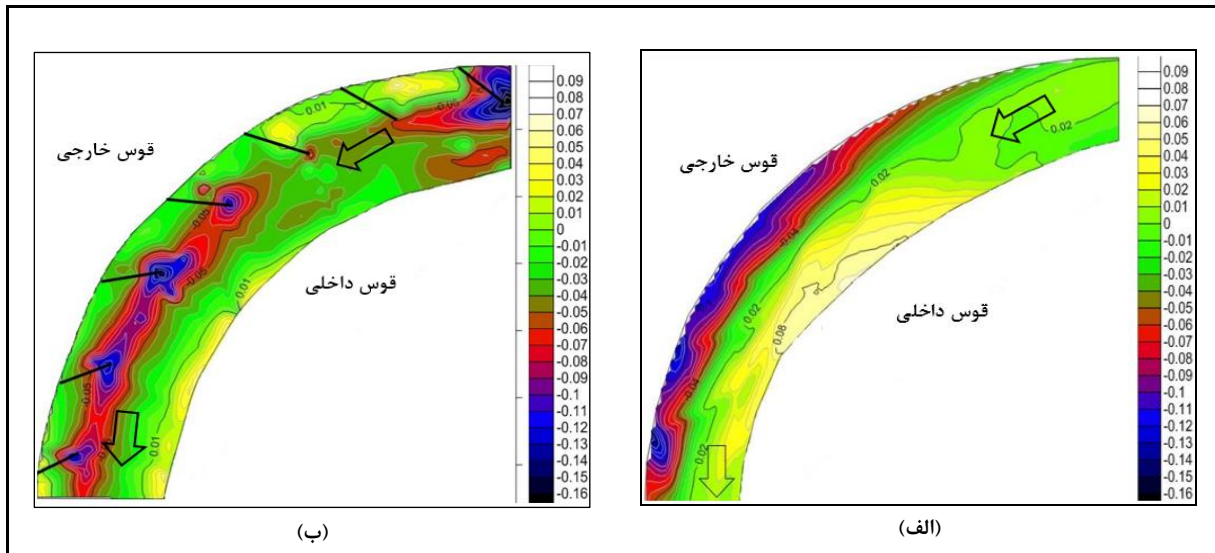
نتایج الگوی رسوب در حالت بدون سازه نشان می‌دهد که بیشترین آبستتگی قوس خارجی در زاویه ۶۲ درجه نسبت به ابتدای قوس (مقطع شماره ۳۵، شکل ۱) اتفاق افتاده است؛ از این‌رو این مقطع برای بررسی عملکرد سرریزها انتخاب شد. در شکل ۴ می‌بینیم که خط‌القعر در حالت بدون سازه دقیقاً چسبیده به دیواره ساحل خارجی قوس اتفاق افتاده است در حالی‌که بعد از احداث این سازه‌ها، خط‌القعر به سمت مرکز کانال (در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از دیواره قوس خارجی) جابه‌جا شده که این امر مانع از جابه‌جایی قوس‌ها می‌شود. همچنین کاملاً مشهود است که در حالت بدون سازه، کانال اصلی در سمت قوس خارجی شکل گرفته که بعد از احداث سرریزها این کانال در مرکز شکل می‌گیرد (شکل ۴). علاوه بر آن، در اثر احداث این سازه‌ها، تپه رسوبی موجود در سمت قوس داخلی با فرسایش مواجه شده است (شکل‌های ۴ و

۵) که این نتیجه با نتایج بررسی‌های همتی و همکاران (Hemmati *et al.*, 2013) همخوانی دارد. الگوی فرسایش و رسوبگذاری در شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که خط‌القعر ایجاد شده در سمت قوس خارجی در حالت بدون سازه (شکل ۵-الف) به سمت مرکز کانال و در امتداد دماغه سرریزها (شکل ۵-ب) جابه‌جا شده است؛ اما در اثر احداث این سازه‌ها، خط‌القعر کانال از دیواره قوس خارجی در حالت بدون سازه به اندازه طول مؤثر سرریزها به طرف مرکز کانال جابه‌جا شده است. با مقایسه الگوی رسوب در حالت با سازه (شکل ۵-ب) و بدون سازه (شکل ۵-الف)، می‌بینیم که سطح تپه رسوبی در قوس داخلی بعد از احداث سرریزها کاهش یافته است که این امر عریض شدن کانال در محل قوس را به دنبال دارد. علاوه بر آن، موقعیت تپه رسوبی بعد از احداث سرریزها به سمت پایین دست قوس انتقال یافته است (شکل ۵). به‌طور کلی این نتایج حاکی از کنترل و کاهش فرسایش ساحل خارجی قوس بعد از احداث سرریزهای مستغرق است.

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق در پیچ آبراهه...



شکل ۴- توپوگرافی بستر در مقطع شماره ۳۵ در حالت بدون سازه و با سازه در ارتفاع ۷۰ درصد برای: الف) $Fr=0.2$ و ب) $Fr=0.3$



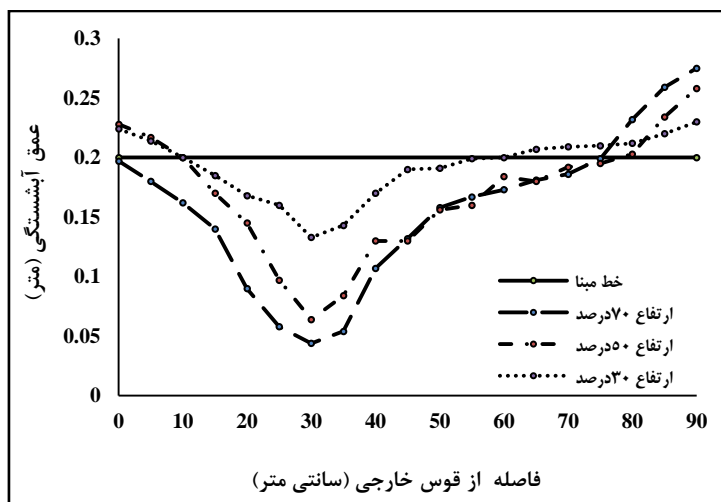
شکل ۵- الگوی فرسایش و رسوبگذاری و موقعیت خط القعر در عدد فرود ۰/۳
برای حالت: الف) بدون وجود سازه و ب) با سازه (ارتفاع ۷۰ درصد)

موضوع آن است که سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد، در مقایسه با ارتفاعهای بزرگتر، مانع از ایجاد گردابه‌های قوی‌تر در اطراف سرریزها می‌شوند و همین امر باعث کاهش آبشستگی در دماغه این سازه‌ها خواهد شد. ماکزیمم عمق آبشستگی (عمق خط القعر) در مقطع مربوط به زاویه ۶۲ درجه از ابتدای قوس (مقطع شماره ۳۵) در عدد فرود ۰/۳ برای حالت بدون سازه برابر با ۱۴/۴ سانتی‌متر است (شکل ۴- ب). اما مقدار آن در دماغه سرریزهای با ارتفاع ۳۰، ۵۰

تأثیر ارتفاع سازه‌ها بر توپوگرافی بستر در مقطع شماره ۳۵ نشان می‌دهد که سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد عمق آب، نسبت به سایر سرریزها در کنترل فرسایش عملکرد مناسب‌تری دارند به طوری که با افزایش ارتفاع سرریزها، میزان فرسایش بستر زیاد می‌شود. به سخی دیگر، میزان فرسایش و رسوبگذاری در محدوده‌های سرریزها و حداکثر عمق آبشستگی اتفاق افتاده در دماغه سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد، کمتر از میزان فرسایش و رسوبگذاری در بقیه سرریزهاست (شکل ۶). دلیل این

و ۷۰ درصد به ترتیب ۶/۷، ۱۳/۶ و ۱۵/۶ سانتی‌متر است (شکل ۶). مقایسه حداکثر عمق آبشستگی در حالت با سازه و بدون سازه در مقطع مذکور نشان می‌دهد که به‌طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی (عمق

خط‌القعر) در سرریزهای با ارتفاع ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد نسبت به حالت بدون سازه به ترتیب ۵۳ درصد کاهش، ۶ درصد کاهش و ۷ درصد افزایش یافته است.



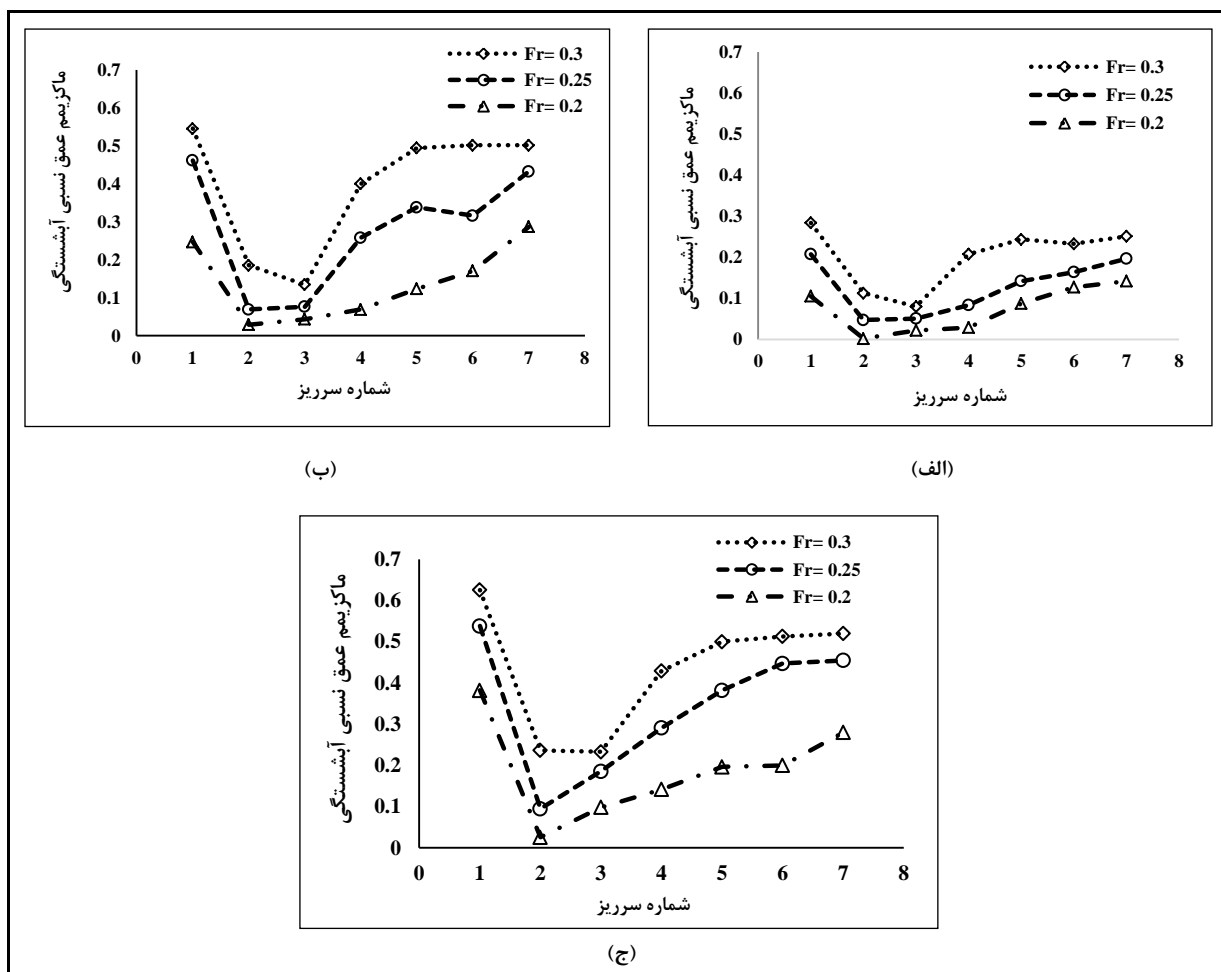
شکل ۶- تأثیر ارتفاع سرریزها بر توپوگرافی بستر در مقطع شماره ۳۵ ($Fr=0.3$)

نخستین مانع را در برابر جریان ایجاد می‌کند و از این‌رو بیشترین مقدار آبشستگی در تمام حالت‌های آزمایش در اطراف این سازه اتفاق افتاده است و شرایط بحرانی‌تری را نسبت به دیگر سرریزها دارد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شدت تلاطم در اطراف سازه اول و انتهایی بیشتر از شدت تلاطم در دیگر سازه‌هاست؛ نتایج بررسی‌های مهرداد (Mehrdar, 2015) برای حالت هیدرولیکی نیز این امر را تأیید می‌کند. اما همتی و همکاران (Hemmati et al., 2016) گزارش داده‌اند که در یک رودخانه پیچان‌رودی، ماکزیمم عمق آبشستگی در دماغه سازه یا سازه‌های آخری روی داده است. اختلاف بین ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سازه‌ها برای سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد عمق آب (شکل ۷- الف) کمتر از ۵۰ درصد (شکل ۷- ب) و ۷۰ درصد (شکل ۷- ج) است.

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر میزان فرسایش و رسوبگذاری

در این بخش تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق واقع در پیچ آبراهه بر ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی (نسبت حداکثر عمق آبشستگی در دماغه سرریزها به طول مؤثر سرریز)، حجم نسبی آبشستگی (نسبت حجم مواد رسوبی فرسایش یافته در حالت با سازه به حالت بدون سازه) و ارتفاع نسبی تپه رسوبی (نسبت حداکثر ارتفاع تپه رسوبی در حالت با سازه به حالت بدون سازه) در قوس داخلی بررسی شده است. شکل ۷ نسبت حداکثر عمق آبشستگی را به طول مؤثر سازه در دماغه سرریزهای مستغرق نشان می‌دهد.

در اینجا می‌بینیم که بیشترین عمق نسبی آبشستگی در تمامی حالات در اطراف دماغه سرریز اول در ابتدای قوس و سرریز انتهایی اتفاق افتاده است. سرریز اول،



شکل ۷- مکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزهای مستغرق برای سرریزهای با ارتفاع: (الف) ۳۰ درصد، (ب) ۵۰ درصد و (ج) ۷۰ درصد

آبشستگی در دماغه سرریزهای مستغرق با ارتفاع ۷۰ درصد عمق آب ورودی، نسبت به سرریزهای با ارتفاع ۳۳ درصد و حالت آبشکن (غیر مستغرق)، کمتر است. از این رو می توان گفت که با توجه به پلان رودخانه، زاویه قوس، نوع قوس (تند یا ملایم) و سایر ویژگی ها، مشخصات سرریزهای مستغرق از جمله ارتفاع آنها می تواند متغیر باشد.

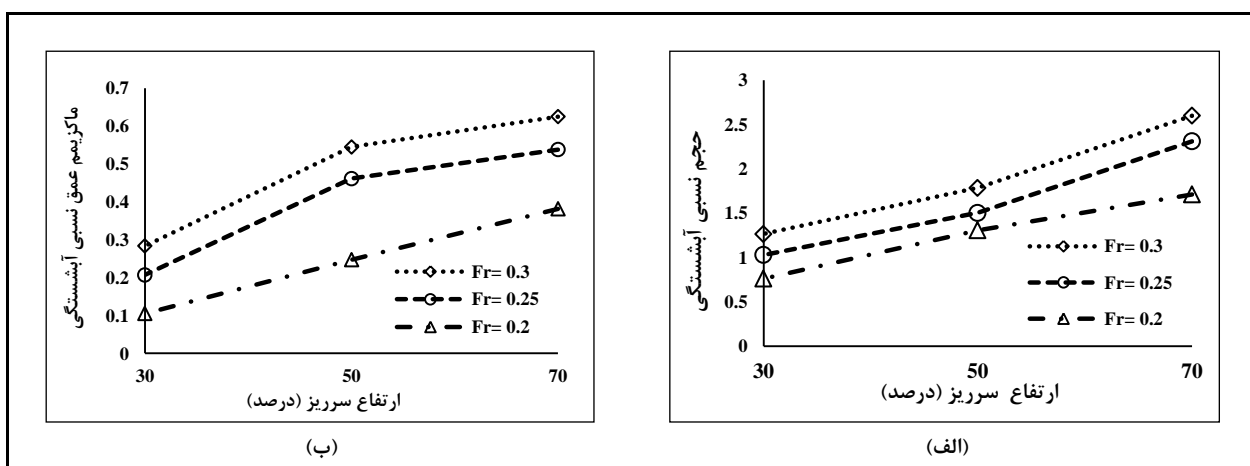
با افزایش ارتفاع سرریزها، نسبت حجم آبشستگی با حضور سرریزها به حجم آبشستگی در حالت بدون حضور سرریز نیز افزایش می یابد (شکل ۸- ب). برابر مشاهدات آزمایشگاهی، با افزایش ارتفاع سرریزها شدت گردابه های شکل گرفته در دماغه و پایین دست آن قوی تر می شود که

متوسط عمق نسبی آبشستگی در تمامی شرایط هیدرولیکی در اطراف آخرین سازه برای سرریزهای با ارتفاع ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد، به ترتیب برابر با ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۴۲ است (شکل ۸- الف) و از این رو می بینیم که مکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزهای با ارتفاع ۵۰ و ۷۰ درصد در حدود ۲ برابر عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد است. با افزایش ارتفاع سرریزها، مکزیم عمق نسبی آبشستگی در دماغه آخرین سازه افزایش می یابد اما مقدار آن در دو ارتفاع ۵۰ و ۷۰ درصد بسیار نزدیک به هم است (شکل ۸- الف). نتایج بررسی های بیگدلی تبار (Bigdeli-Tabar, 2015) نشان می دهد که حداکثر عمق

کاهش می‌یابد که به افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش حجم آبشستگی می‌انجامد.

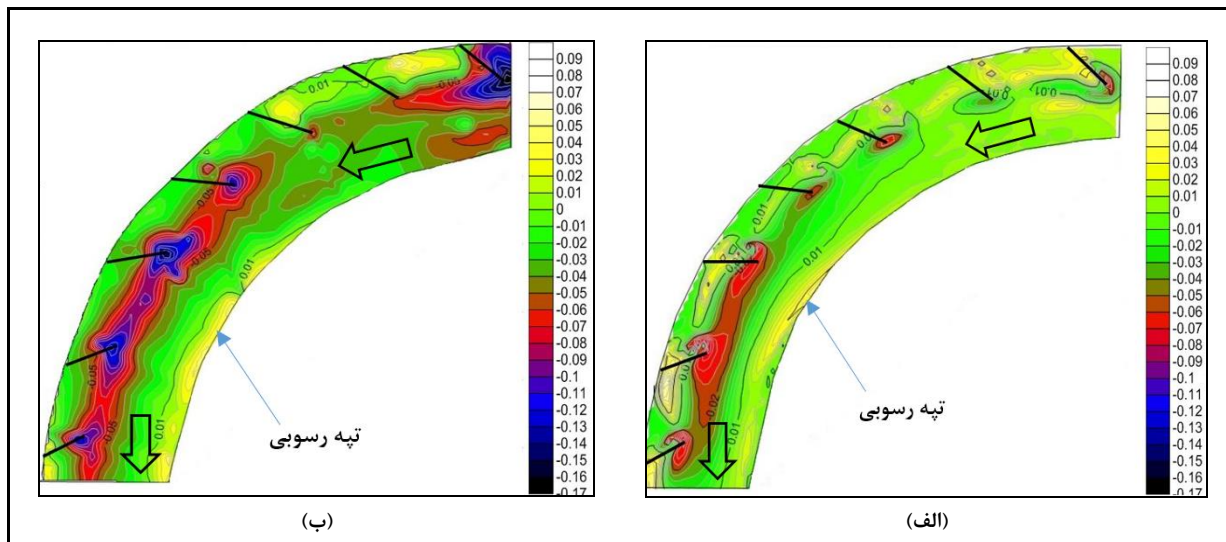
الگوی فرسایش و رسوبگذاری در شکل ۹ نشان‌دهنده بیشتر بودن سطح و شدت فرسایش، به‌ویژه در قسمت ورودی قوس، برای سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد (شکل ۹-ب) نسبت به ۳۰ درصد (شکل ۹-الف) است. همچنین مشاهده می‌شود که ابعاد تپه رسوبی شکل گرفته در سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد، در مقایسه با سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد، ناچیز است. علاوه بر آن، ابعاد چاله فرسایشی شکل گرفته در اطراف سازه‌ها و همچنین فرسایش اتفاق افتاده در بین سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد خیلی بیشتر است تا در بین سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد (شکل ۹). با توجه به اینکه کمترین عمق، کمترین حجم آبشستگی و کمترین تغییرات در توپوگرافی بستر در ناحیه‌ی حادثی سازه‌ها مربوط به سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد دیده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که این سرریزها برای اهداف حفاظت از فرسایش قوس خارجی نسبت به دو ارتفاع دیگر مناسب‌ترند.

این امر باعث افزایش عمق و حجم آبشستگی خواهد شد. متوسط حجم نسبی آبشستگی در تمامی شرایط هیدرولیکی، در سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد برابر ۱ و نشان‌دهنده آن است که حجم آبشستگی با وجود سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد، برابر با حجم آبشستگی در حالت بدون سازه است. اما سرریزهای با ارتفاع ۵۰ درصد باعث افزایش ۵۳ درصد در حجم آبشستگی، نسبت به حالت بدون سازه، شده‌اند و این مقدار در سرریزهای ۷۰ درصد، ۱۲۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد (شکل ۸-ب)؛ یعنی با افزایش ارتفاع سرریزها از ۳۰ درصد به ۷۰ درصد، حجم نسبی آبشستگی ۱۲۰ درصد افزایش یافته است. به بیان دیگر، متوسط حجم نسبی آبشستگی در سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد، ۲/۲ برابر سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد و ۱/۴۳ برابر سرریزهای با ارتفاع ۵۰ درصد است (شکل ۸-ب). دلیل این موضوع آن است که با افزایش ارتفاع سرریزها، علاوه بر افزایش شدت گردابه‌ها در اطراف آنها، سطح اشغال شده آبراهه نیز افزایش و سطح مقطع عبوری جریان



شکل ۸- تأثیر ارتفاع سرریزها بر: الف) ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی و ب) حجم نسبی آبشستگی

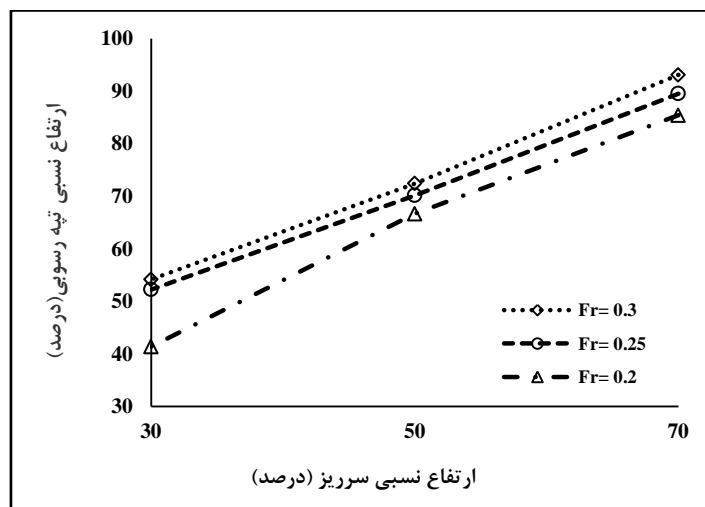
تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق در پیچ آبراهه...



شکل ۹- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در عدد فرود 0.3 برای: الف) ارتفاع 30% درصد و ب) ارتفاع 70% درصد

به ارتفاع‌های دیگر، کمترین ارتفاع رسوبگذاری را در قوس داخلی سرریزها ایجاد کرده‌اند (شکل ۱۰). با احداث سرریزهای با ارتفاع 30% ، 50% و 70% درصد، ارتفاع تپه رسوبی به‌طور متوسط به ترتیب 51% ، 30% و 11% درصد نسبت به حالت بدون سرریز کاهش یافته است. نتایج بررسی‌های هم‌تبی و همکاران (Hemmati *et al.*, 2012) نشان می‌دهد که احداث سرریزهای مستغرق در پیچان‌رود، ارتفاع تپه رسوبی را نسبت به حالت بدون سازه به‌طور متوسط به میزان 19% درصد کاهش می‌دهد.

نسبت ماکزیمم ارتفاع تپه رسوبی در حالت با سازه به حالت بدون سازه در شکل ۱۰ این نتیجه را به‌دست می‌دهد که بعد از احداث سرریزها، ارتفاع رسوبگذاری در قوس داخلی کاهش یافته است. به بیان دیگر، با احداث سازه‌ها در قوس خارجی، جریان از سمت قوس خارجی به میانه کانال و به سمت قوس داخلی تغییر جهت داده که این امر باعث افزایش سرعت در قوس داخلی می‌شود. افزایش سرعت در قوس داخلی از تشکیل تپه رسوبی جلوگیری می‌کند. سرریزهای با ارتفاع 30% درصد، نسبت



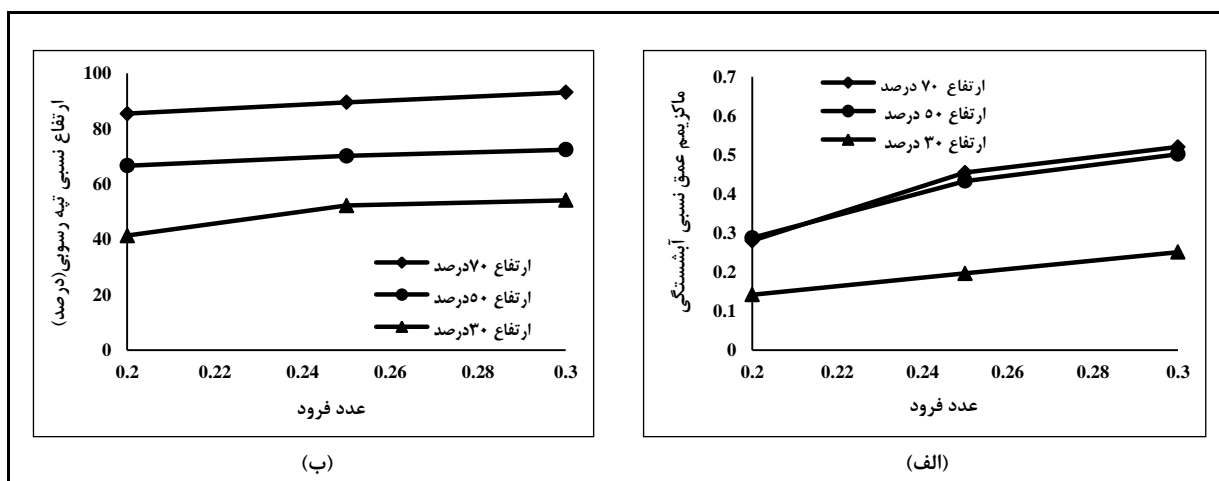
شکل ۱۰- تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی در قوس داخلی

بررسی تأثیر عدد فرود جریان بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری

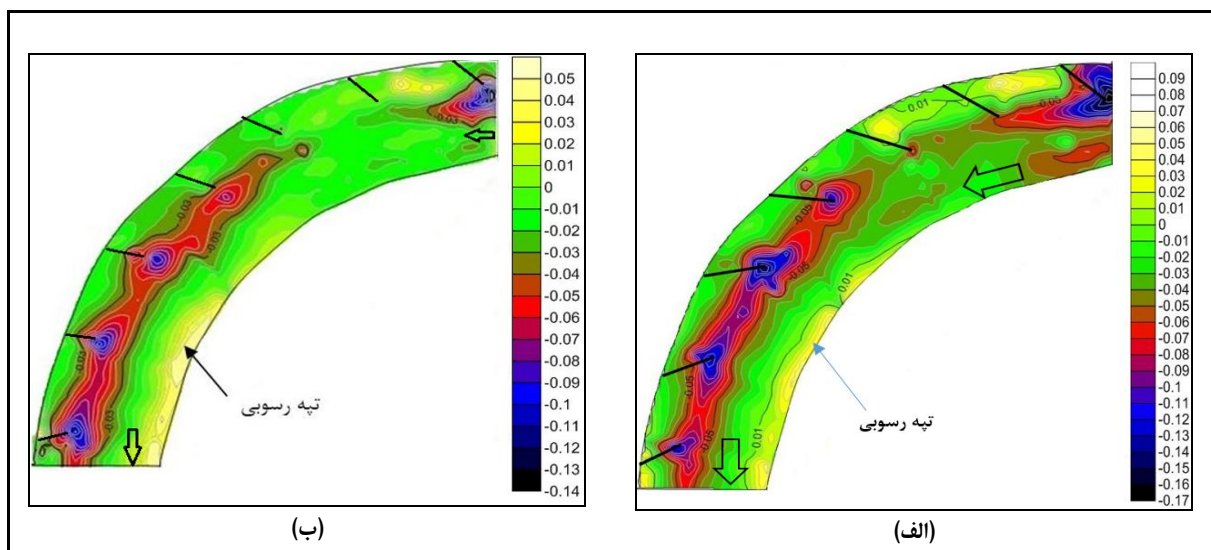
در بررسی دیگر، تأثیر عدد فرود جریان در ارتفاع‌های متفاوت سرریزها، بر ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در دماغه سازه‌ها و ماکزیمم عمق نسبی تپه رسوبی در قوس داخلی مد نظر قرار گرفت. در شکل ۱۱ دیده می‌شود که با افزایش عدد فرود جریان، مقدار آبشستگی نسبی و ارتفاع نسبی تپه رسوبی افزایش می‌یابد. ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی در سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد برای اعداد فرود ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۰/۲۸، ۰/۴۵ و ۰/۵۲ است. یعنی در این حالت، عمق نسبی آبشستگی در عدد فرود ۰/۳ در حدود ۱/۸۵ برابر مقدار آن در عدد فرود ۰/۲ است (شکل ۱۱- الف). اما شیب تغییرات ارتفاع نسبی تپه رسوبی در مقابل عدد فرود جریان کمتر است، یعنی افزایش عدد فرود جریان تأثیر قابل توجهی بر ارتفاع نسبی تپه رسوبی ندارد به طوری که با افزایش عدد

فرود از ۰/۲ تا ۰/۳، ارتفاع نسبی تپه رسوبی در بیشترین حالت ممکن ۱۳ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۱۱- ب). با افزایش عدد فرود، قدرت حمل رسوب با جریان افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش فرسایش در امتداد دماغه سرریزها می‌شود. مواد رسوبی فرسایش یافته از دماغه سرریزها در سمت قوس داخلی می‌نشینند و تپه‌ای رسوبی تشکیل می‌دهند که با افزایش عدد فرود جریان ارتفاع این تپه به دلیل افزایش حجم رسوبات فرسایش یافته، افزایش می‌یابد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

تأثیر عدد فرود بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قسمت ورودی قوس یا اطراف اولین سرریز بسیار مشهود است. در عدد فرود ۰/۳ (شکل ۱۲- الف)، میزان و سطح فرسایش یافته در قسمت ورودی قوس بسیار شدیدتر از حالتی است که برای عدد فرود ۰/۲ (شکل ۱۲- ب) اتفاق افتاده است؛ این نتایج با نتایج بررسی‌های کانینگهام و لین (Cunningham & Lyn, 2016) همخوانی دارد.



شکل ۱۱- تأثیر عدد فرود جریان بر: الف) ماکزیمم عمق نسبی آبشستگی و ب) ماکزیمم ارتفاع نسبی تپه رسوبی



شکل ۱۲- تأثیر عدد فرود جریان بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در سرریزهای با ارتفاع ۷۰ درصد برای: الف) $Fr=0.3$ و ب) $Fr=0.2$

نتیجه‌گیری

بدون سرریز را نشان می‌دهد. - احداث سرریزهای با ارتفاع ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد، ارتفاع تپه رسوبی موجود در قوس داخلی را به ترتیب ۵۰، ۳۰ و ۱۱ درصد نسبت به حالت بدون سازه کاهش می‌دهد.

- با افزایش عدد فرود جریان، شدت فرسایش در ورودی قوس افزایش چشمگیری دارد و همچنین قدرت حمل رسوب با جریان افزایش می‌یابد که باعث افزایش فرسایش در دماغه سرریزها و همچنین افزایش نسبی ارتفاع تپه رسوبی در قوس داخلی می‌شود.

- به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در حفاظت و کنترل فرسایش قوس خارجی، عملکرد سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد عمق آب ورودی، در تمامی شرایط هیدرولیکی مناسب است.

در مطالعه حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و فرسایش در پیچ آبراهه ۹۰ درجه پرداخته شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که:

- در اثر احداث سرریزها، آبستگي از سمت قوس خارجی به مرکز آبراهه و در امتداد سرریزها هدایت می‌شود که این امر از جابه‌جایی قوس‌ها جلوگیری می‌کند.

- با افزایش ارتفاع سرریزها، مقدار و حجم نسبی آبستگي افزایش می‌یابد. حجم آبستگي در اثر احداث سرریزهای با ارتفاع ۳۰ درصد به طور متوسط برابر با حجم آبستگي در حالت بدون سازه است. در حالی که این نسبت برای سرریزهای با ارتفاع ۵۰ و ۷۰ درصد به ترتیب ۵۳ و ۱۲۰ درصد بیشتر از حالت

مراجع

- Abad, J., Rhoads, B., Guneralp, 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.
- Abolghasemi, M. 2012. The effects of flow diversion on sediments entering the intake in 90 deg. diversion angle in sinus river. J. Civil Environ. Eng. 44(1): 43-54. (in Persian)

- Anon. 2001. Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance. 3rd Ed. FHWA, HEC-23.
- Bigdeli-Tabar, H. 2015. Numerical investigation of the effect of Bendway weirs on flow and sediment pattern in a meander river by Mike 3 Flow Model FM. M. Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)
- Castro, J. 1999. Design of stream barbs. Engineering Notes. No. 23. USDA-NRCS Technical Notes. USDA-NRCS. Portland, OR.
- Cunningham, R. and Lyn, D. 2016. Laboratory study of bendway weirs as a bank erosion countermeasure. J. Hydraul. Eng. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.
- Derrick, D. L. 1999. Bendway Weir History, Theory and Design. Available at: <http://chl.wes.army.mil>.
- 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.
- Jarrahzade, F. and Shafai-Bejestan, M. 2011. Comparison of maximum scour depth in bank line and nose of submerged weirs in a sharp bend. Sci. Res. Essays. 6(5): 1071-1076.
- Hemmati, M., Ghomeshi, M. and Kashefipour, S. M. 2013. Experimental investigation on the effect of the bendway weir angle on the erosion and sedimentation pattern in meandering river. Iran-Water Resour. Res. 8(3): 66-76. (in Persian)
- 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., 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.
- 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. Vol. 1, 2. 64 HEC-23, FHWA-NHI-09-111. Federal Highway Administration. U. S. Department of Transportation. Washington, D. C.
- Mehrdar, L. 2015. Experimental investigation of the effect of height and crest slope of Bendway weirs on flow pattern in 90 degree Bend. M. Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)
- Przedwojski, B., Blazejweske, R. and Pilarczyk, K. W. 1995. River Training Techniques. Rotterdam, Netherlands.
- Rhoads, B. L. 2003. Protocols for geomorphic characterization of meander bends in Illinois. University of Illinois. Urbana-Champaign, Urbana.
- Shields, F.D. Jr., Knight, S. S. and Cooper, C. M. 1998. Addition of spurs to stone toe protection for warm water fish habitat. J. Am. Water Resour. Assoc. 34(6): 1427-1436.

- Smith, S. P. and Wittler, R. J. 1998. Bendway weirs and highway protection in Colorado: a case study on the Blue River. Proceeding of the 9th Conference on Water Resources Engineering. Aug. 3-7.
- Watson, C. C. 2003. Dikes, dikes, dikes. CE 610 Stream Restoration-Class Notes. Colorado State University. Fort Collins, CO.
- Winkler, M. F. 2003. Defining angle and spacing of bendway weirs. US Army Corps of Engineers. Coastal Hydraulics Laboratory.
- Zahiri, J., Kashefipour, S. M., Shafai-Bajestan, M. and Ghomeshi, M. 2013. Effect of riprap geometric parameters on spur stability at the 90° bend. J. Irrig. Sci. Eng. 35(4): 49-58. (in Persian)



Effect of Bendway Weirs Height on Scour and Sedimentation Pattern at a 90 Degree Bend

P. Darabi, M. Hemmati* and N. A. Haghdoost

* Corresponding Author: Assistant professor, Water Engineering Department of Agriculture Faculty, Urmia University, Urmia, Iran. Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

Received: 21 June 2016, Accepted: 11 October 2016

An important tool in current multi-purpose erosion control, stream restoration, and habitat improvement projects is the bendway weir. A series of upstream-angled low-elevation stone sills (bendway weirs) are designed to control and redirect currents and velocities throughout a bend of a river or stream. Consideration of scour and sedimentation pattern at a 90 degree bend (with relative radius of curvature equal to 3.3) in the presence of weirs and without weirs is the aim of this study. To reach the purpose of this study, series of bendway weirs (7 weirs) with height of 30, 50 and 70 percent of flow depth were constructed in multiple flow conditions at the outer bank side. The inclination angle, length and distance of weirs were kept fixed in all tests, and set equal to 60 degree, 30 percent of canal width and three times of weir length, respectively. The results showed that the channel talweg moved as effective length of weir from outer bank to the center and along the weirs tips at the result of bendway weirs installation. Owing to installation of bendway weirs with 0.5D and 0.7D height the scour volume accessed 53% and 120% higher than no-weir state, respectively. While for weirs with 0.3D height, it was equal to no-weir condition. Also, the maximum relative scour depth at the tip of weirs with height of 0.5D and 0.7D were two times of weirs with 0.3D height.

Key words: Bend Migration, Erosion Control, Height of Bendway Weirs, Local Scour, 90 Degree Bend